

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno – matematički fakultet
Geofizički odsjek

Krešimir Pavlić

**Utjecaj nelinearnog odziva tla na elemente potresne
opasnosti na lokaciji NE Krško**

Diplomski rad

Mentor: prof. dr. sc. Marijan Herak

Zagreb, 2010.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEORIJSKA PODLOGA	2
2.1. AMPLIFIKACIJA	2
2.1.1. LINEARNI EFEKTI	2
2.1.2. NELINEARNI EFEKTI	8
2.1.2.1. Ekvivalentni linearni model	10
2.1.2.2. Nelinearni i histerezni model	11
2.1.2.3. Rasap energije tijekom jednog ciklusa deformacije	13
2.2. SEIZMIČNOST KRŠKOG	17
2.3. ATENUACIJSKE RELACIJE	20
3. DETERMINISTIČKA ANALIZA GIBANJA TLA U NUKLEARNOJ ELEKTRANI KRŠKO ZA REALNE POTRESNE SCENARIJE	21
3.1. ŽARIŠTE POTRESA KOD BREŽICA	25
3.2. ŽARIŠTE POTRESA KOD ZAGREBA (MEDVEDNICA) I METLIKE	30
3.3. ŽARIŠTE POTRESA KOD LJUBLJANE	34
4. ZAKLJUČAK	39
5. DODATAK	43
A. PROGRAM ZA SINTETIZIRANJE AKCELEROGRAMA	43
B. PROGRAM ZA ANALIZU NELINEARNOG ODZIVA USLOJENOG SREDSTVA – NERA	45
6. LITERATURA	47

1. Uvod

Nuklearna elektrana Krško (NEK) nalazi se na lijevoj (sjevernoj) obali rijeke Save 2 km istočno od Krškog. Na sjeveru se nalaze istočno Alpski, zapadno Karpatski te sjeverno Panonski tektonski blokovi (*ALCAPA*), na istoku Tisza mikroploča, a na jugozapadu i jugu su Dinaridi. Konvergentna tektonika rubova ovih ploča razvila se tijekom Alpskog orogena. Postrojenje je smješteno na pjeskovito-glrenom materijalu čija je debljina oko 100 m.

Bitna stavka u sigurnosti nuklearne elektrane je građa reaktorske zgrade otporne na potrese. Drugim riječima zgrada mora moći izdržati najjače potrese koji se mogu dogoditi u blizini te lokacije. Jedna od točaka u protupotresnom inženjerstvu je određivanje potrebne dubine temeljenja zgrade. Nailaskom seizmičkih valova slojevi zemlje ispod zgrade ne gibaju se istim akceleracijama. U pravilu akceleracija opada s dubinom, odnosno akceleracija se povećava što smo bliže površini zbog amplifikacije trešnje u površinskim slojevima tla. Prema tome, potrebno je naći optimalnu dubinu na kojoj je akceleracija znatno manja od akceleracije na površini. Naravno, različiti potresi uzrokovat će različita gibanja u slojevima ispod zgrade pa je tako moguće da uopće ne dođe do povećanja amplitude gibanja, nego da se ona čak i smanji.

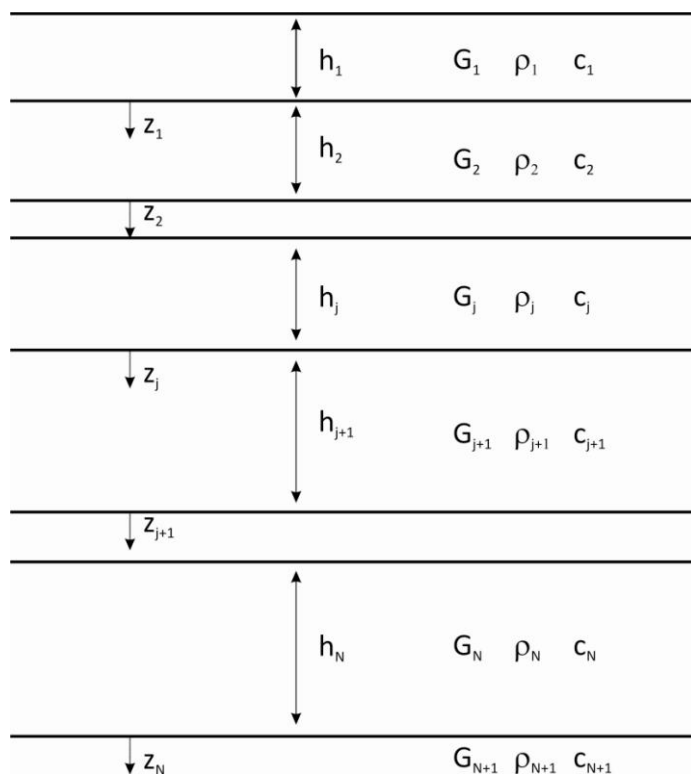
Seizmički aktivna područja koja ću promatrati i koja mogu utjecati na sigurnost Nuklearne elektrane Krško jesu Zagreb (Medvednica), Brežice, Metlika i Ljubljana pa će i akceleroگرامi potresa koje ću sintetizirati imati tamo svoja žarišta. Pri tome ću razmatrati determinističke, realistične potresne scenarije što se tiče magnitude i dubine njihovog žarišta. Dobiveni sintetički akceleroگرامi vrijedit će za temeljnu stijenu ispod NEK. Karakteristike slojeva ispod elektrane (brzine, gustoće, moduli smicanja, debljine pojedinih slojeva te njihov sastav) dobro su poznate na temelju brojnih provedenih geofizičkih istraživanja. Mjerenja su se vršila bušenjem, seizmičkim metodama te na kraju laboratorijskim mjerenjima. S ovim ulaznim podacima koristit ću numeričke modele pomoću kojih se može izračunati teorijska razdioba akceleracija po slojevima tla uzimajući u obzir i nelinearni odziv tla.

2. Teorijska podloga

2.1. Amplifikacija

2.1.1. Linearni efekti¹

Razmotrimo slojevito sredstvo koje se sastoji od N vodoravnih, homogenih i elastičnih slojeva iznad poluprostora (slika 1), slijedeći postupak koji je predložio Tsai (1970), a kod nas ga je primijenio i modificirao M. Herak (1985). Slojevi su okarakterizirani brzinom elastičnog vala c_j , debljinom h_j , modulom smicanja G_j te gustoćom ρ_j . Svakom sloju pridružimo i koordinatni sustav s $+z_j$ osi usmjerenoj prema dolje s ishodištem na donjoj granici sloja.



Slika 1 Slojevito sredstvo

Pretpostavimo da iz poluprostora ($N+1$) okomito dolazi harmonijski transversalni val amplitude A_{N+1} , frekvencije ω opisan pomakom y :

$$y\left(t + \frac{z_N}{c_{N+1}}\right) = A_{N+1} e^{i\omega\left(t + \frac{z_N}{c_{N+1}}\right)}. \quad (2.1.1.1)$$

¹ Prema predavanjima kolegija *Inženjerska seizmologija* (prof. M. Herak), ak. god. 2008/2009.

Pomak u j -tom sloju opisan je valnom jednadžbom:

$$c_j^2(\omega) \frac{\partial^2 u_j(z_j, t)}{\partial z_j^2} = \frac{\partial^2 u_j(z_j, t)}{\partial t^2}, \quad (2.1.1.2)$$

a sam pomak u tom sloju iznosi:

$$u_j(z_j, t) = (A_j e^{ik_j z_j} + B_j e^{-ik_j z_j}) e^{i\omega t}, \quad (2.1.1.3)$$

gdje je rješenje napisano kao superpozicija valova koji putuju prema gore amplitudom A_j i onih što putuju prema dolje amplitudom B_j , a k_j je valni broj.

Amplitude A_j i B_j dobivamo preko rubnih uvjeta. Rubni uvjet na $z_1 = -h_1$ kaže da površina mora biti slobodna od napetosti:

$$\tau_{zy}(0, t) = G_j \left(\frac{\partial u_j}{\partial z_j} + \frac{\partial w_j}{\partial y_j} \right) = 0 \quad | \quad j = 1, \quad (2.1.1.4)$$

gdje je G_j modul smicanja u j -tom sloju. Komponenta pomaka w ne postoji, pa jednadžba (2.1.1.4) postaje:

$$G_j \frac{\partial u_j}{\partial z_j} = 0. \quad (2.1.1.5)$$

Uvrštavanjem izraza za pomak (2.1.1.3) u j -tom sloju u jednadžbu (2.1.1.5) dobivamo:

$$\begin{aligned} G_1 A_1 k_1 i e^{i(\omega t - k_1 h_1)} &= G_1 B_1 k_1 i e^{i(\omega t + k_1 h_1)} \\ B_1 &= A_1 e^{-2ik_1 h_1} = \{S_j = k_j h_j \mid j = 1, \dots, N\} = A_1 e^{-2is_1}. \end{aligned} \quad (2.1.1.6)$$

Sljedeći rubni uvjet kaže da pomaci i napetosti na graničnim plohama moraju biti kontinuirani.

Primijenjeno na pomake:

$$\begin{aligned} u_j &= u_{j+1} \\ A_j e^{i(\omega t + k_j z_j)} + B_j e^{i(\omega t - k_j z_j)} &= A_{j+1} e^{i(\omega t + k_{j+1} z_{j+1})} + B_{j+1} e^{i(\omega t - k_{j+1} z_{j+1})}. \end{aligned} \quad (2.1.1.7)$$

Sa slike 1 vidi se da vrijedi:

$$z_j = 0 \Rightarrow z_{j+1} = -h_{j+1}, \quad (2.1.1.8)$$

pa jednadžba (2.1.1.7) postaje:

$$A_j + B_j = A_{j+1}e^{-is_{j+1}} + B_{j+1}e^{is_{j+1}}. \quad (2.1.1.9)$$

Primijenjeno na napetosti:

$$\begin{aligned} \tau_{zy,j-1} &= \tau_{zy,j} \begin{cases} z_{j-1} = 0 \\ z_j = -h_j \end{cases} \\ G_{j-1}(k_{j-1}A_{j-1}e^{i(\omega t + k_{j-1}z_{j-1})} - k_{j-1}B_{j-1}e^{i(\omega t - k_{j-1}z_{j-1})}) &= G_j(k_jA_je^{i(\omega t + k_jz_j)} - k_jB_je^{i(\omega t - k_jz_j)}) \end{aligned} \quad (2.1.1.10)$$

Primijenivši uvjet (2.1.1.8), te $k_j = \frac{\omega}{c_j}$ dobivamo:

$$G_{j-1}c_j(A_{j-1} - B_{j-1}) = G_jc_{j-1}(A_je^{-is_j} - B_je^{is_j}). \quad (2.1.1.11)$$

Izraz za brzinu transverzalnih valova je $c_j^2 = \frac{G_j}{\rho_j} \Rightarrow \frac{G_j}{c_j} = \rho_jc_j$ pa (2.1.1.11) postaje:

$$\alpha_{j-1}(A_{j-1} - B_{j-1}) = A_je^{-is_j} - B_je^{is_j}, \quad (2.1.1.12)$$

gdje je

$$\alpha_{j-1} = \frac{\rho_{j-1}c_{j-1}}{\rho_jc_j}$$

relativna seizmička impedancija.

Zbrajanjem i oduzimanjem jednadžbi (2.1.1.9) i (2.1.1.12), izraze za amplitude u j -tom sloju možemo zapisati matricno:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_j \\ B_j \end{bmatrix} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1 + \alpha_{j-1})e^{is_j} & (1 - \alpha_{j-1})e^{is_j} \\ (1 - \alpha_{j-1})e^{-is_j} & (1 + \alpha_{j-1})e^{-is_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{j-1} \\ B_{j-1} \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{is_j} & 0 \\ 0 & e^{-is_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + \alpha_{j-1} & 1 - \alpha_{j-1} \\ 1 - \alpha_{j-1} & 1 + \alpha_{j-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{j-1} \\ B_{j-1} \end{bmatrix} = S_j T_{j-1} \begin{bmatrix} A_{j-1} \\ B_{j-1} \end{bmatrix} \quad j = 2, \dots, N \end{aligned} \quad (2.1.1.13)$$

Matrice S_j i T_j jesu:

$$S_j = \begin{bmatrix} e^{is_j} & 0 \\ 0 & e^{-is_j} \end{bmatrix} \quad T_j = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \alpha_j & 1 - \alpha_j \\ 1 - \alpha_j & 1 + \alpha_j \end{bmatrix}$$

Na vrhu poluprostora ($j = N$), jednadžbe (2.1.1.9) i (2.1.1.12) postaju:

$$A_N + B_N = A_{N+1} + B_{N+1}$$

$$\alpha_N(A_N - B_N) = A_{N+1} - B_{N+1}$$

odnosno matrično:

$$\begin{bmatrix} A_{N+1} \\ B_{N+1} \end{bmatrix} = T_N \begin{bmatrix} A_N \\ B_N \end{bmatrix}. \quad (2.1.1.14)$$

a pomak proizlazi iz jednadžbe (2.1.1.3) uzevši $j = N+1$:

$$u_{N+1} = (A_{N+1}e^{ik_{N+1}z_N} + B_{N+1}e^{-ik_{N+1}z_N})e^{i\omega t}.$$

Izraz (2.1.1.13) je rekurzivna relacija za pomake u j -tom sloju. Njezinom iterativnom primjenom uz korištenje relacije (2.1.1.6) dobivamo:

$$\begin{bmatrix} A_j \\ B_j \end{bmatrix} = S_j T_{j-1} S_{j-1} T_{j-2} \cdots S_2 T_1 \begin{bmatrix} A_1 \\ A_1 e^{-2is_1} \end{bmatrix}. \quad (2.1.1.15)$$

Napišemo li matricu na desnoj strani u malo zgodnijem obliku:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_1 e^{-2is_1} \end{bmatrix} = A_1 e^{-is_1} \begin{bmatrix} e^{is_1} \\ e^{-is_1} \end{bmatrix} = A_1 e^{-is_1} S_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

tada izraz (2.1.1.15), uz grupiranje matrica S i T prema zajedničkim indeksima postaje:

$$\begin{bmatrix} A_j \\ B_j \end{bmatrix} = A_1 e^{-is_1} S_j (T_{j-1} S_{j-1}) \cdots (T_1 S_1) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} A_j \\ B_j \end{bmatrix} = A_1 e^{-is_1} S_j \begin{bmatrix} X_j + iY_j \\ X'_j + iY'_j \end{bmatrix} \quad (2.1.1.16)$$

gdje je matrica na desnoj strani:

$$\begin{bmatrix} X_j + iY_j \\ X'_j + iY'_j \end{bmatrix} = \left[\prod_{k=1}^{j-1} (T_k S_k) \right] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1.1.17)$$

Uzmimo $j = N$ u izrazu (2.1.1.16) i uvrstimo ga u izraz (2.1.1.14):

$$\begin{bmatrix} A_{N+1} \\ B_{N+1} \end{bmatrix} = T_N A_1 e^{-is_1} S_N \begin{bmatrix} X_N + iY_N \\ X'_N + iY'_N \end{bmatrix} = A_1 e^{-is_1} \begin{bmatrix} X_{N+1} + iY_{N+1} \\ X'_{N+1} + iY'_{N+1} \end{bmatrix} \quad (2.1.1.18)$$

Iz ovog izraza sada je moguće dobiti amplitudu A_1 preko amplitude dolazećeg vala iz poluprostora A_{N+1} :

$$\begin{aligned} A_{N+1} &= A_1 e^{-is_1} (X_{N+1} + iY_{N+1}) \\ A_1 &= \frac{e^{is_1}}{X_{N+1} + iY_{N+1}} A_{N+1} \end{aligned} \quad (2.1.1.19)$$

Uvrstimo li jednadžbu (2.1.1.19) u jednadžbu (2.1.1.16), dobit ćemo izraz pomoću kojeg možemo izračunati amplitudu u j -tom sloju pomoću amplitude nadolazećeg vala A_{N+1} :

$$\begin{bmatrix} A_j \\ B_j \end{bmatrix} = \frac{A_{N+1}}{X_{N+1} + iY_{N+1}} S_j \begin{bmatrix} X_j + iY_j \\ X'_j + iY'_j \end{bmatrix} \quad (2.1.1.20)$$

Nađimo sada amplitudu, tj. pomak na površini preko gore izvedene relacije. Na površini je $j = 1$ i $z_1 = -h_1$, pa imamo:

$$u_1 = (A_1 e^{-ik_1 h_1} + B_1 e^{ik_1 h_1}) e^{i\omega t} = (A_1 e^{-is_1} + B_1 e^{is_1}) e^{i\omega t}$$

uz uvjet (2.1.1.6)

$$u_1 = A_1 e^{i\omega t} (e^{-is_1} + e^{-2is_1} e^{is_1}) = 2A_1 e^{i\omega t} e^{-is_1}$$

Uvrstimo li izraz (2.1.1.19) u ovu jednadžbu, dobivamo:

$$u_1 = \frac{2}{X_{N+1} + iY_{N+1}} A_{N+1} e^{i\omega t}$$

odnosno:

$$u_1 = \frac{2A_{N+1}}{\sqrt{X_{N+1}^2 + Y_{N+1}^2}} e^{i\left(\omega t - \arctg \frac{Y_{N+1}}{X_{N+1}}\right)} \quad (2.1.1.21)$$

Jednadžba (2.1.1.21) omogućuje nam izračun gibanja tla na površini uzrokovanog trajnom harmonijskom pobudom iz poluprostora.

Za jasniji prikaz ovog koncepta, pogledat ćemo kakvo bi bilo gibanje u slučaju kada iznad poluprostora ne bi bilo nijednog sloja. Zamislimo da se na poluprostoru nalazi beskonačno tanak sloj gustoće nula. Iz jednadžbe (2.1.1.17) možemo dobiti veličine X_2 i Y_2 koje se odnose na poluprostor. Uz $s_1 = 0$ i $\alpha_1 = 0$ imamo:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_2 + iY_2 \\ X'_2 + iY'_2 \end{bmatrix} &= T_1 S_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \alpha_1 & 1 - \alpha_1 \\ 1 - \alpha_1 & 1 + \alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{is_1} & 0 \\ 0 & e^{-is_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$X_2 = X'_2 = 1 \quad Y_2 = Y'_2 = 0$$

U ovom slučaju jednačba (2.1.1.21) glasi:

$$u_1 = 2A_1 e^{i\left(\omega t - \arctg \frac{Y_1}{X_1}\right)} \quad (2.1.1.22)$$

Iz izraza (2.1.1.22) vidi se da će površina oscilirati dvostrukom amplitudom dolazećeg vala iz poluprostora. Do ovog efekta dolazi zbog pozitivne interferencije dolazećeg vala amplitude A i reflektiranog vala amplitude B . Iz (2.1.1.22) i (2.1.1.21) možemo definirati veličinu $AMP(\omega)$ kao:

$$AMP(\omega) = \frac{1}{\sqrt{X_{N+1}^2 + Y_{N+1}^2}} \quad (2.1.1.23)$$

Veličina $AMP(\omega)$ pokazuje koliko će puta slobodna površina slojevitog poluprostora oscilirati većom amplitudom pri frekvenciji ω nego što bi oscilirala da ne postoji nijedan sloj i zove se *amplifikacijski spektar modela*.

2.1.2. Nelinearni efekti²

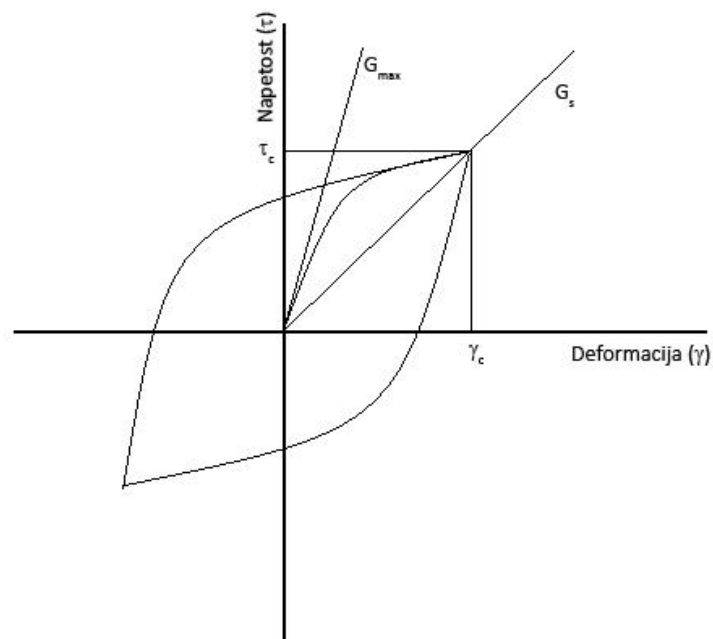
Razvojem instrumentacije za bilježenje gibanja tla sve je veće zanimanje za teorijom nelinearnog odziva tla. Različiti geotehnički modeli potvrđuju nelinearnu i histereznu ovisnost napetosti i deformacije tla, posebice za smične deformacije veće od 10^{-5} do 10^{-4} . Efekti koje primjećujemo su povećanje atenuacije i smanjenje brzine transversalnih valova pri povećanju razine pobude. Dokazi deamplifikacije koja nastaje nailaskom valova velike amplitude (strong-motion), a koju prati i promjena rezonantne frekvencije, nađeni su u zapisima potresa *Michoacan* 1985. u Meksiku te *Loma Prieta* 1989. u Kaliforniji. Ti efekti su prepoznatljivi pri akceleracijama većim od 0.1 do 0.2 g, a znatniji su u slabo vezanim tlima. U tlima veće krutosti nelinearni efekti su zanemarivi.

Primijenimo li smičnu napetost τ na uzorak tla, ono će reagirati nekom deformacijom γ . Ove dvije veličine povezane su Hookeovim zakonom pa modul smicanja G možemo pisati kao

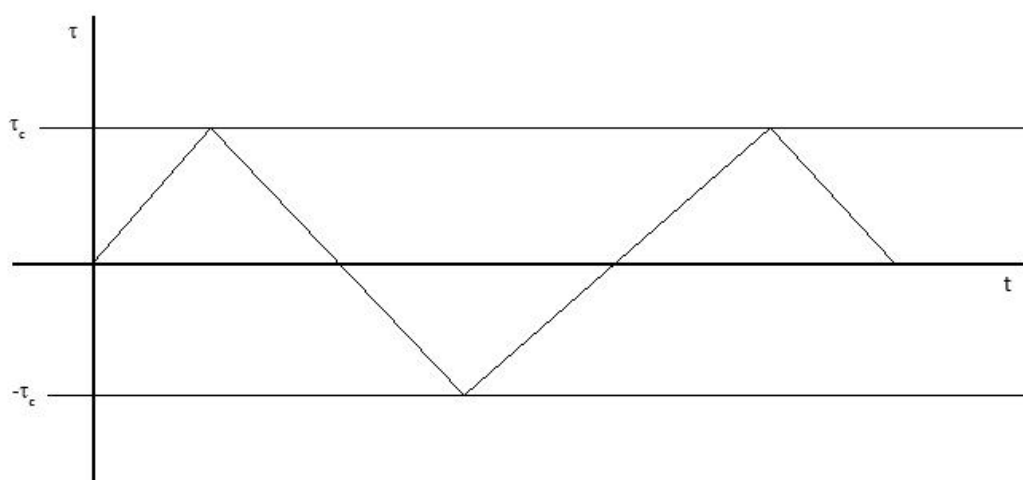
$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (2.1.2.1)$$

Primijetimo da je modul smicanja jednak nagibu tangente na krivulju histereze u svakoj njezinoj točki. Pri infinitezimalno malim napetostima, deformacija će biti vrlo mala i tada je vrijednost modula smicanja G najveća (slika 2). Daljnjim povećavanjem napetosti do vrijednosti τ_c (ciklična amplituda napetosti), modul smicanja G smanjuje se i konačno doseže vrijednost $G_s = \tau_c / \gamma_c$ (sekantni modul smicanja). Ova krivulja, koja opisuje deformaciju pri početnoj primjeni napetosti, naziva se osnovna krivulja (engl. *backbone curve*). Englesko ime *backbone* dobila je zbog toga što podsjeća na kralježnicu, preslikamo li ju simetrično u odnosu na ishodište u treći kvadrant. No naziva se i osnovna, jer pomoću nje možemo dobiti konačnu krivulju histereze, primijenimo li *Masingovo* (1926) pravilo sličnosti kojim je moguće dobiti konačnu krivulju histereze poznavajući samo izgled osnovne krivulje. Postupak je takav da se čitava funkcija koja opisuje osnovnu krivulju pomnoži određenim faktorom (najčešće je to 2) i nizom rotacija i translacija preslika u ostala tri kvadranta. Ako je osnovna krivulja po dijelovima linearna, onda se postupak radi sa svakim dijelom krivulje. Primjer primjene ovog pravila na osnovnoj krivulji opisanoj s dvije linearne funkcije prikazan je na slici 6. Ovo svojstvo bitno olakšava laboratorijska mjerenja. Histereza na slici 2 ima izražene diskontinuitete u točkama (γ_c, τ_c) i $(-\gamma_c, -\tau_c)$. Razlog tome je trokutasti oblik napetosti po ciklusu (slika 3).

² Prema: J. P. Bardet, T. Tobita (2001)



Slika 2 Krivulja histereze napetosti-deformacije



Slika 3 Trokutasti oblik ciklične napetosti

U stvarnosti se ovakav oblik napetosti ne susreće često, te je on tek prva aproksimacija za sinusoidalni oblik kojemu odgovara eliptični oblik krivulje histereze.

Dakle, nelinearnost i neelastičnost tla u odnosu napetosti i deformacije očituje se u stalnoj promjeni modula smicanja G , te u histeretnom obliku krivulje napetost-deformacija, a proporcionalna je površini koju ta krivulja zatvara.

Postoje dva numerička pristupa tome problemu. Jedan je linearna aproksimacija nelinearnosti i naziva se *ekvivalentni linearni model*, a drugi je „pravi“ nelinearni i histeretni model.

2.1.2.1. Ekvivalentni linearni model

U ovom pristupu radi se linearna analiza svojstava tla koja se iteracijski prilagođavaju efektivnim vrijednostima smične napetosti koja je inducirana u tlu. Vrijednost modula smicanja izabrana je kao sekantni modul smicanja G_s koji je aproksimacija srednje vrijednosti modula smicanja za čitav ciklus povećanja i smanjenja napetosti. Njegova vrijednost je

$$G_s = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2.1.2.1.1)$$

Povećanjem smične deformacije γ_c smanjuje se vrijednost G_s . Odnos ovih dviju veličina prikazan je krivuljom redukcije modula smicanja (slika 4). Omjer prigušenja ξ definiran je omjerom disipirane energije preko čitavog ciklusa histereze W_d i maksimalne energije pohranjene u sustavu W_s :

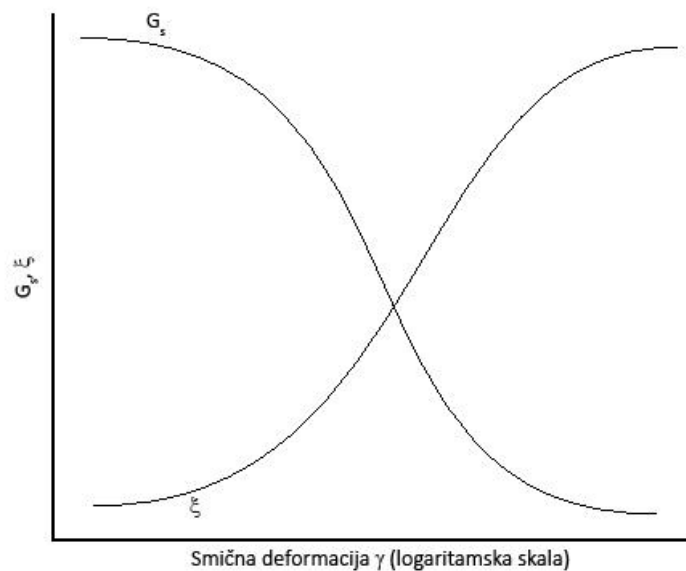
$$\xi = \frac{W_d}{4\pi W_s}, \quad (2.1.2.1.2)$$

gdje su

$$W_d = \oint_{\tau_c} \tau d\gamma$$

$$W_s = \frac{1}{2} \tau_c \gamma_c = \frac{1}{2} G \gamma_c^2 \quad (2.1.2.1.3)$$

Odnos ove vrijednosti o smičnoj deformaciji γ_c prikazan je krivuljom prigušenja (slika 4).



Slika 4 Varijacija modula smicanja G_s i omjera prigušenja ξ s amplitudom smične deformacije

U ekvivalentnom linearnom modelu prva iteracija izvodi se tako da se izaberu vrijednosti G_s i ξ koje odgovaraju nekoj početnoj vrijednosti smične deformacije γ . Nakon toga se računa efektivna vrijednost γ_{eff} preko:

$$\gamma_{eff} = S_\gamma \cdot \gamma_{max} \quad (2.1.2.1.4)$$

a S_γ je reduksijski faktor deformacije i obično se uzima $S_\gamma = 0.65$. Iteracije se izvode dok razlika efektivne i maksimalne smične deformacije ne zadovolji traženu točnost.

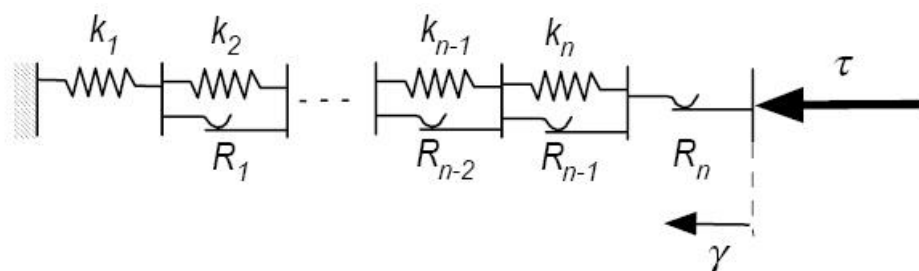
2.1.2.2. Nelinearni i histerezni model

Iwan (1967) i Mroz (1967) predložili su modeliranje nelinearne krivulje napetosti-deformacije pomoću niza od n opruga različitih konstanti krutosti k_i i otpora klizanja R_i (slika 5). Zovimo dalje taj model *IM* modelom. Otpor klizanja raste $R_1 < R_2 < \dots < R_n$. U samom početku, rezidualne napetosti u svim klizačima jesu nula. Jednolikom kompresijom sustava opruga, klizač i popušta kada smična napetost τ dosegne R_i . Nakon što je popustio, klizač i zadržava pozitivnu rezidualnu napetost iznosa R_i . U *IM* modelu s n klizača, inkrement napetosti $d\tau$ i inkrement deformacije $d\gamma$ povezani su veličinom H :

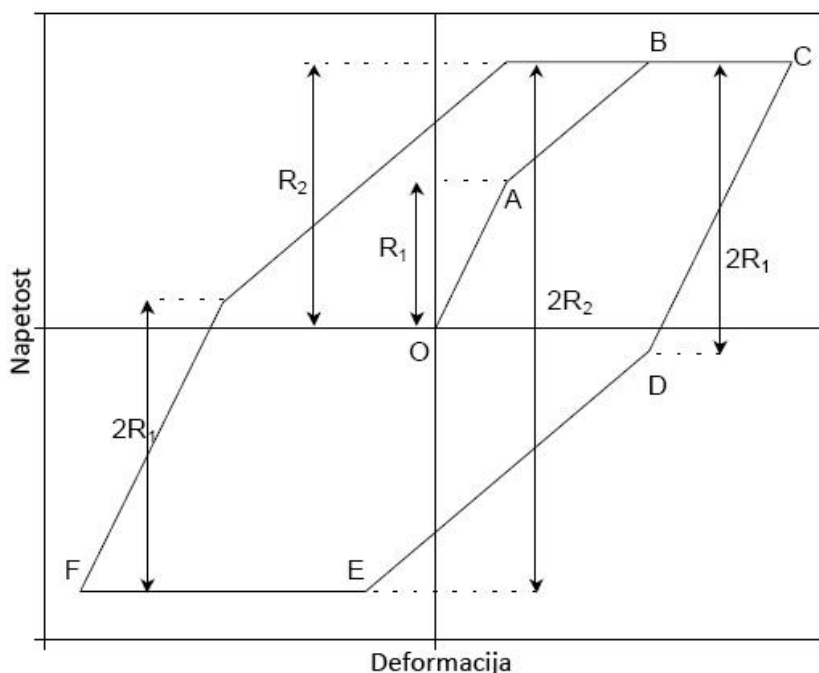
$$\frac{d\tau}{d\gamma} = H \quad (2.1.2.2.1)$$

gdje je tangencijalni modul H ekvivalentan modulu smicanja G i jednak je:

$$H = \begin{cases} H_1 = k_1 & 0 \leq \tau < R_1 \\ H_2 = (k_1^{-1} + k_2^{-1})^{-1} & R_1 \leq \tau < R_2 \\ \dots & \\ H_{n-1} = (k_1^{-1} + k_2^{-1} + \dots + k_{n-1}^{-1})^{-1} & R_{n-2} \leq \tau < R_{n-1} \\ H_n = (k_1^{-1} + k_2^{-1} + \dots + k_{n-1}^{-1} + k_n^{-1})^{-1} & R_{n-1} \leq \tau < R_n \\ 0 & \tau = R_n \end{cases} \quad (2.1.2.2.2)$$



Slika 5 Shematski prikaz IM modela



Slika 6 Krivulja histereze napetosti-deformacije IM modela tijekom jednog ciklusa (slika preuzeta iz Bardet, J.P., Tobita, T. (2001))

Krivulja $OABC$ na slici 6 osnovna je krivulja. Kada kompresija promijeni predznak, rezidualna napetost u klizaču i se smanjuje. Klizač i popušta u dekompresiji sustava kada rezidualna napetost dosegne $-R_i$, tj. kada se napetost τ smanji $-2R_i$. Umjesto veličine *napetost popuštanja* zgodno je uvesti veličinu *povratna napetost* α_i . Klizač i popušta u kompresiji i dekompresiji kada je τ jednak $\alpha_i + R_i$ i $\alpha_i - R_i$. IM model pretpostavlja da je R_i konstantan, dok se α_i mijenja tijekom kompresije, odnosno dekompresije. Iz slike 6 vidimo da je krivulja napetosti-deformacije histereza i slijedi *Masingovo* pravilo sličnosti. Krivulja $CDEF$ dobivena je iz krivulje $OABC$ tim pravilom s faktorom 2.

Nelinearnu osnovnu krivulju sa slike 6 možemo opisati sekantnim modulom smicanja G koji ovisi o smičnoj deformaciji γ preko n diskretnih točaka (G_i, γ_i $i = 1, \dots, n$). Budući da u IM modelu radimo s konačnim brojem opruga i klizača, krivulja histereze neće biti kontinuirana, nego će biti po dijelovima linearna. Prema tome, svaki element bit će prikazan jednom takvom krivuljom čiji je nagib tangencijalni modul smicanja H_i i može se izraziti preko G_i :

$$H_i = \frac{G_{i+1}\gamma_{i+1} - G_i\gamma_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}, \quad i = 2, \dots, n-1, \quad H_n = 0 \quad (2.1.2.2.3)$$

Pretpostavimo li da je povratna napetost α_i jednaka nuli, R_i je tada:

$$R_i = G_i\gamma_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.1.2.2.4)$$

Zadnje dvije jednačbe ukazuju da je maksimalni smični otpor $R_n = G_n\gamma_n$, tj. definiran je posljednjom točkom G - γ krivulje. U praksi se radi s G/G_{max} - γ krivuljama pa nam tada jednačbe (2.1.2.2.3) i (2.1.2.2.4) postaju:

$$H_i = G_{max} \frac{G'_{i+1}\gamma_{i+1} - G'_i\gamma_i}{\gamma_{i+1} - \gamma_i}, \quad i = 2, \dots, n-1 \quad i \quad R_i = G_{max} G'_i \gamma_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.1.2.2.5)$$

gdje je $G'_i = G_i/G_{max}$.

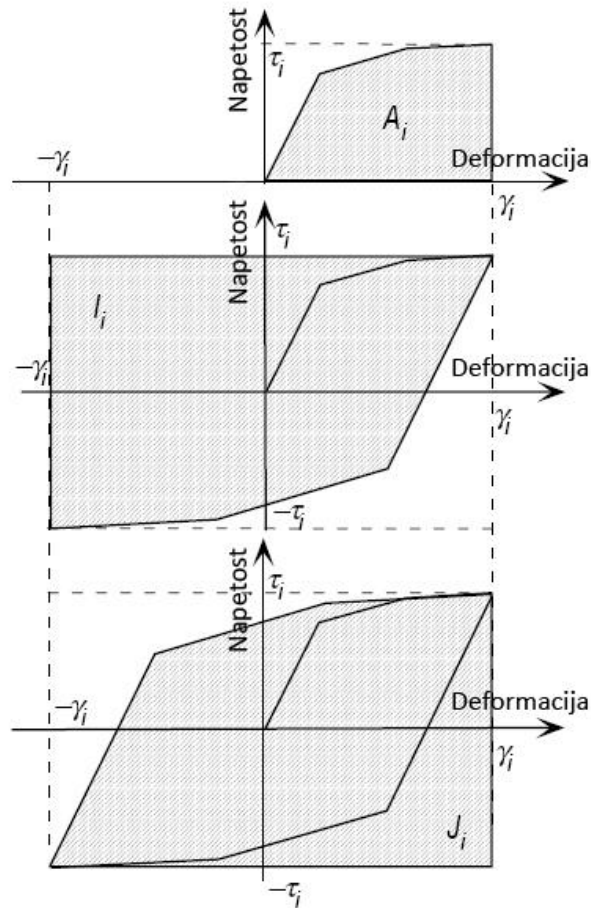
2.1.2.3. Rasap energije tijekom jednog ciklusa deformacije

Kada krivulja napetosti-deformacije slijedi *Masingovo* pravilo sličnosti, površine I_i i J_i koje odgovaraju dekompresiji od $+\gamma_i$ do $-\gamma_i$ i kompresiji od $-\gamma_i$ do $+\gamma_i$, četiri puta su veće od površine A_i koju zatvara osnovna krivulja pri kompresiji od 0 do γ_i (slika 7). Površine A_i , I_i i J_i jesu:

$$A_i = \int_0^{\gamma_i} \tau d\gamma, \quad I_i = \int_{\gamma_i}^{-\gamma_i} (\tau_i - \tau) d\gamma = -4A_i \quad i \quad J_i = \int_{-\gamma_i}^{\gamma_i} (\tau_i + \tau) d\gamma = 4A_i \quad (2.1.2.3.1)$$

Rasuta energija W_{d_i} tijekom jednog kompletnog ciklusa deformacije amplitude γ_i jednaka je površini krivulje histereze i iznosi:

$$W_{d_i} = \oint \tau d\gamma = \int_{\gamma_i}^{-\gamma_i} \tau d\gamma + \int_{-\gamma_i}^{\gamma_i} \tau d\gamma = -I_i + J_i - 4\tau_i\gamma_i = 8A_i - 4\tau_i\gamma_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.1.2.3.2)$$



Slika 7 Površine A_i , I_i i J_i (slika preuzeta iz Bardet, J.P., Tobita, T. (2001))

Kada je krivulja deformacije-napetosti linearna po dijelovima i generirana iz n diskretnih točaka $(\gamma_i, G_i \gamma_i)$, izraz za A_i postaje:

$$A_1 = 0, \quad A_i = \frac{1}{2} \sum_{j=2}^i (G_j \gamma_j + G_{j-1} \gamma_{j-1}) (\gamma_j - \gamma_{j-1}), \quad i = 2, \dots, n \quad (2.1.2.3.3)$$

pa jednačba (2.1.2.3.2) postaje:

$$W_{d_i} = 8A_i - 4G_i \gamma_i^2, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.1.2.3.4)$$

Kako je maksimalna energija deformacije pohranjena u sustavu:

$$W_{s_i} = \frac{1}{2} \tau_i \gamma_i = \frac{1}{2} G_i \gamma_i^2, \quad (2.1.2.3.5)$$

omjer prigušenja ξ možemo napisati kao i u (2.1.2.1.2):

$$\xi_1 = 0, \quad \xi_i = \frac{W_{d_i}}{4\pi W_{s_i}} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{2A_i}{G_i \gamma_i^2} - 1 \right), \quad i = 2, \dots, n \quad (2.1.2.3.6)$$

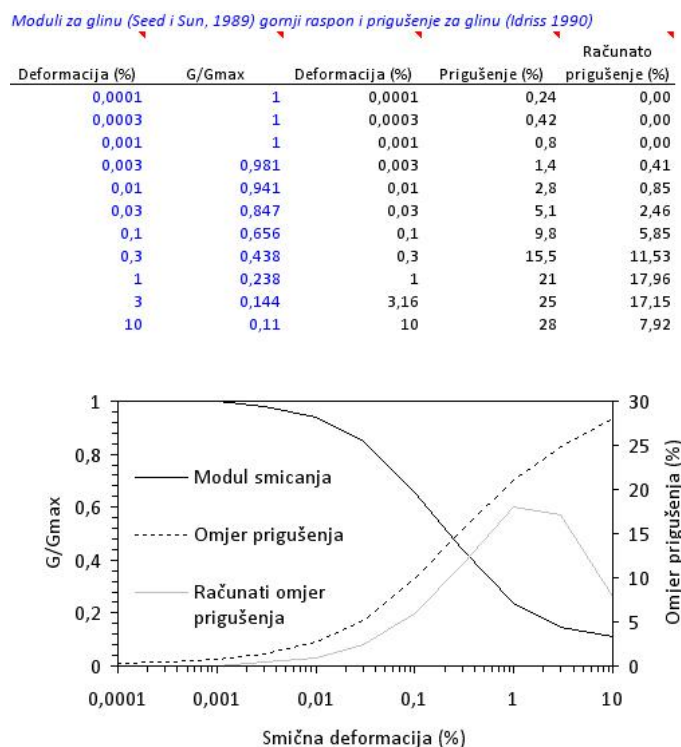
Kada smična deformacija γ prijeđe γ_n , *IM* model pretpostavlja da je smična napetost jednaka smičnom otporu R_n . U ovom slučaju sekantni modul smicanja G_s i kritični omjer prigušenja ξ postaju:

$$G_s = \frac{R_n}{\gamma}, \quad \xi = \frac{2}{\pi} \left(\frac{2(A_n + R_n(\gamma - \gamma_n))}{R_n \gamma} - 1 \right) \quad \text{za } \gamma > \gamma_n \quad (2.1.2.3.7)$$

Za vrlo velike smične deformacije, sekantni modul smicanja teži k nuli, a omjer prigušenja teži k $2/\pi$.

$$\gamma \rightarrow \infty, \quad G \rightarrow 0 \quad i \quad \xi \rightarrow \frac{2}{\pi} \quad (2.1.2.3.8)$$

Iz jednadžbe (2.1.2.3.6) slijedi da ξ ovisi o obliku krivulje $G/G_{max}-\gamma$, ali ne ovisi o G_{max} . Parametri *IM* modela (H i R) u potpunosti se izračunavaju iz $G-\gamma$ krivulje. Iste $G-\gamma$ krivulje koje se koriste u ekvivalentnom linearnom modelu mogu se koristiti i u ovom modelu. Jedina je razlika u tome što se u ovom modelu omjer prigušenja ξ računa izravno iz jednadžbe (2.1.2.3.6). Primjer krivulja za glinu vidimo na slici 8.



Slika 8 Izračun omjera prigušenja iz $G/G_{max}-\gamma$ krivulje i usporedba omjera prigušenja iz ekvivalentno linearnog modela

Za razliku od ekvivalentno linearnog modela, u *IM* modelu nema prigušenja za male deformacije i u nekim rasponima deformacije prigušenje može opasti zbog relativnih varijacija A_i i W_s s amplitudom

smične deformacije. No omjer prigušenja ipak u konačnici teži k $2/\pi$ za velike smične deformacije po izrazu (2.1.2.3.8). Iz jednadžbe (2.1.2.3.7) možemo dobiti prvu derivaciju ξ u odnosu na γ :

$$\frac{d\xi}{d\gamma} = \frac{4}{\pi} \frac{R_n \gamma_n - A_n}{R_n \gamma^2} \quad \text{za } \gamma > \gamma_n \quad (2.1.2.3.9)$$

koja je za velike smične deformacije uvijek pozitivna jer je $R_n \gamma_n$ tada veće od A_n . Jednadžba (2.1.2.3.9) objašnjava porast omjera prigušenja za velike smične deformacije (porast pri kraju krivulje).

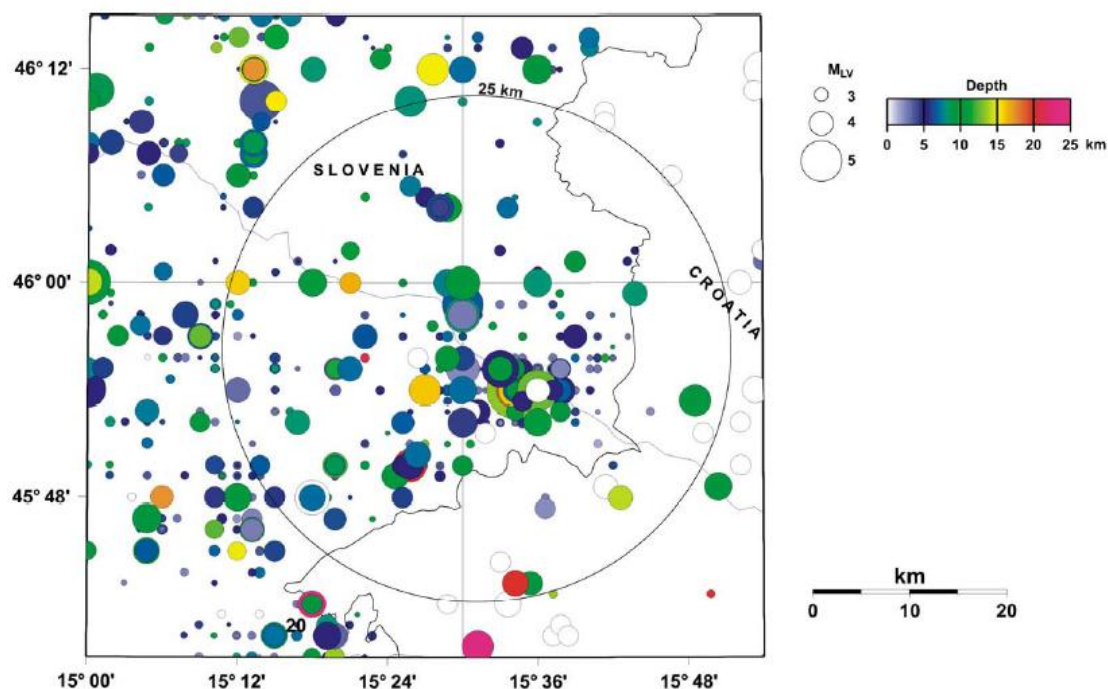
IM model može simulirati materijale različitog indeksa plastičnosti (*PI*) pa npr. za savršeno kruti materijal vrijedi $H_1 \rightarrow \infty$ i $n = 0$ pa imamo:

$$W_d = 4\gamma R_1, \quad W_s = \frac{1}{2}\gamma R_1 \quad \text{i} \quad \xi = \frac{W_d}{4\pi W_s} = \frac{2}{\pi} \quad (2.1.2.3.10)$$

Jednadžba (2.1.2.3.10) daje gornju granicu omjera prigušenja za *IM* model jer savršeno kruti materijal daje najveću površinu histereze.

2.2. Seizmičnost Krškog

Smatra se da je bazen Krškog jedno od seizmički najaktivnijih područja Slovenije (slika 9). Najstariji podaci o potresima iz ovog područja sežu još u 1628. godinu. Pouzdaniji podaci dostupni su tek od kraja 19. stoljeća, od kada se oni sustavno skupljaju.



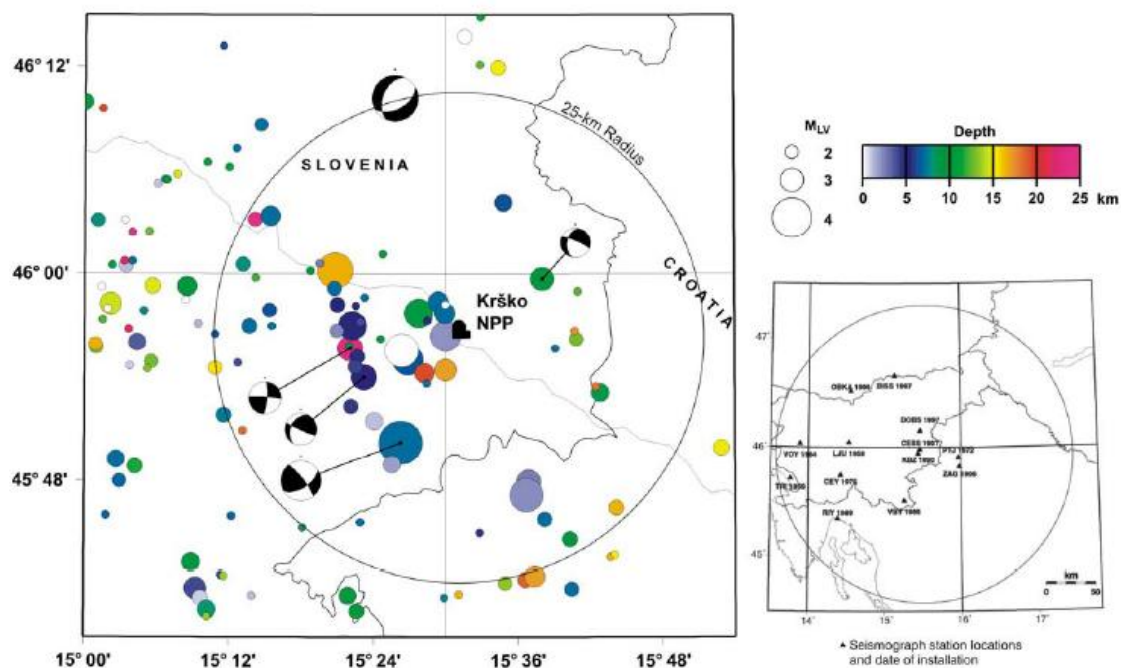
Slika 9 Potresi u užem području (25 km) NEK 1628.–2001. (USAR – Updated Safety Analysis Report, NEK, 2008). Epicentri su prema slovenskom katalogu potresa, pa nedostaju mnogi mali potresi u Hrvatskoj.

Najjači zabilježeni potres u tom području dogodio se 29. siječnja 1917. Najveći intenzitet procijenjen je na VIII °MSK te magnitude $M_{LH} = 5.7$. Lokacija epicentra bila je nekoliko kilometara sjeverno od Brežica, a procjenjuje se da je žarište bilo na dubini od 6 do 13 km.

Slikom 9 prikazana je seizmičnost područja oko NEK na temelju revidiranog slovenskog kataloga potresa iz 2001. g za razdoblje 1628.–2001. Većina žarišta nalazi se u gornjih 10 km, neka između 10 i 15 km, a samo rijetka dublje. Najjači potres u ovom razdoblju imao je magnitudu $M_{LH} = 4.2$ i maksimalni intenzitet VI °MSK. Zbog raštrkane raspodjele žarišta i loše preciznosti njihovog lociranja, teško je povezati potrese s određenim geološkim formacijama.

Na području same elektrane nalazi se akceleroграф A0 koji je tijekom 1994. i prve polovice 1995. zabilježio 21 lokalni potres. U tom razdoblju zabilježio je tri najjača potresa ($M_{WA} = 3.5, 2.8$ i 3.5). Unatoč relativno velikom nemiru, zapisi su vrlo vrijedni za određivanje seizmičnosti oko same elektrane. Većina zapisa ima $t_s - t_p$ oko 0.8 s što odgovara žarišnoj udaljenosti oko 3 do 4 km. Isti je uređaj zabilježio još šest potresa udaljenosti manje od 5 km do kraja 1999. godine. Najjači u tom razdoblju (od sredine 1995. do kraja 1999.) imao je magnitudu $M_L = 2.8$.

Na području NEK nalazi se još devet akceleroagrafa (A1-A9) sa zajedničkim okidanjem. Podaci ovih uređaja pokazali su se vrijednima u određivanju parametara lokalnih potresa. Analiza triju najjačih potresa iz 1995. pokazala je da su žarišta otprilike 2 km zapadno od NEK na dubinama 1 do 3 km. Analizom serije potresa iz 1989./90., *Gilbert/Commonwealth International Inc.* (1992) dobili su dubinu žarišta od 2 km. Budući da je valni oblik potresa 28. prosinca 1989. magnitude $M_L = 3.4$ bio vrlo sličan onima iz 1995, moguće je da su se barem neki potresi iz 1989./90. dogodili na istoj geološkoj strukturi.



Slika 10 Potresi u užem području (25 km) NEK-a 1978.-svibanj 2002. (USAR – Updated Safety Analysis Report, NEK, 2008)

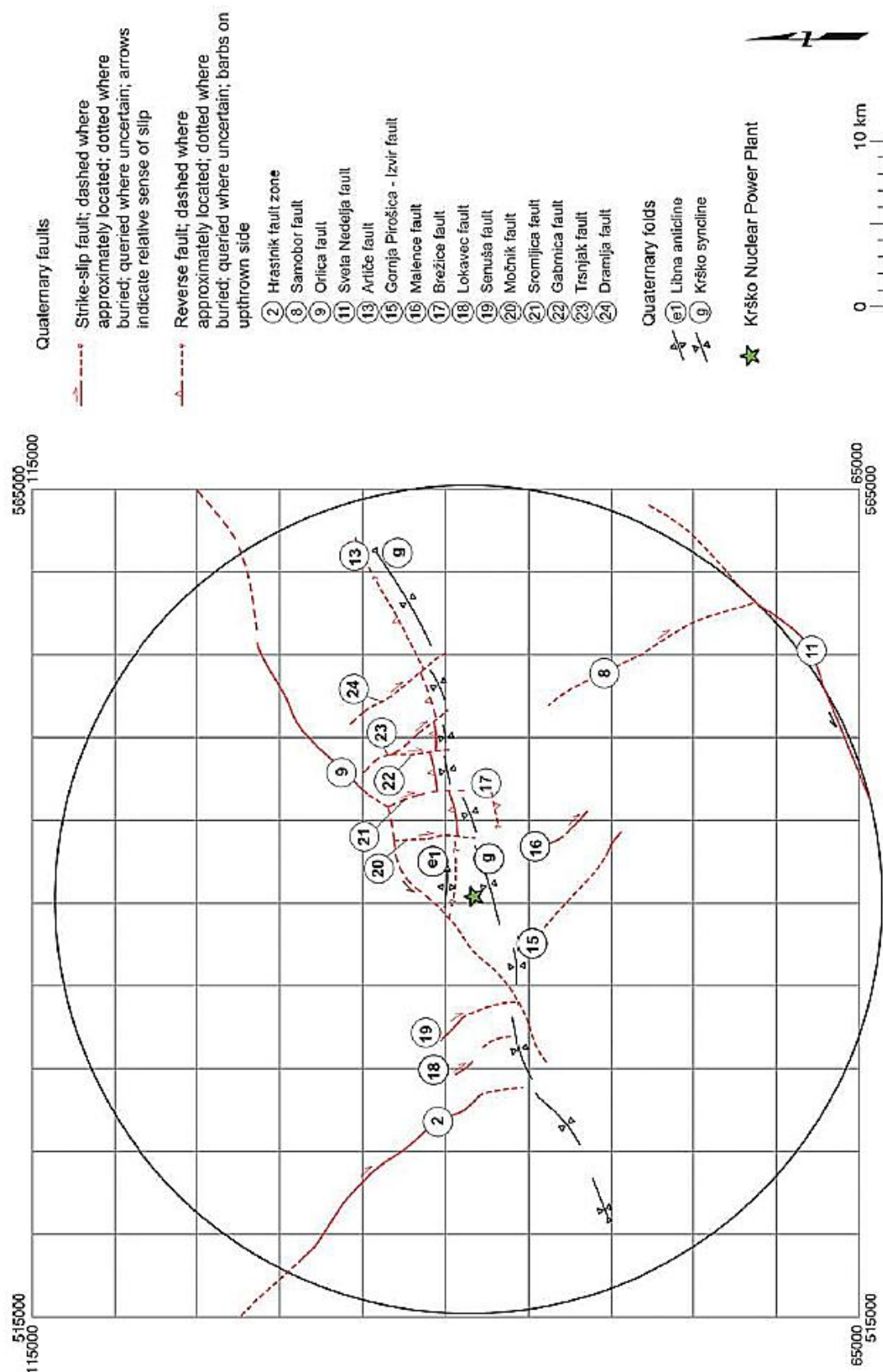
Spomenuli smo već da se pojedini potresi teško mogu povezati s geološkim formacijama. Dokazi o aktivnosti rasjeda prvenstveno se temelje na geološkim dokazima o pomacima u kvartaru. Karta poznatih rasjeda u užem području NEK-a prikazana je na slici 11.

Općenito se smatra da je rasjed Artiče aktivan rasjed. Proteže se sjevernim rubom istočnog dijela Krškog bazena. Ukupna duljina pružanja tog rasjeda nije sasvim poznata.

Interpretacija rasjeda Brežice koji se proteže u bazen Krškog kontroverzna je glede njegove aktivnosti.

Rasjed Hrastnik mogao bi biti usklađen s nedavnom seizmičnošću no neprecizna lokacija epicentara potresa isključuje tu mogućnost. Orijentacija rasjeda sugerira da bi u trenutnim uvjetima rasjed imao desni horizontalni pomak. Južni kraj rasjeda nije poznat.

Još neki aktivni rasjedi u blizini Krškog jesu Orlica, Gornja Pirošica-Izvir i Malenica.



Slika 11 Poznati kvartarni rasjedi u užem području Krškog (25 km) (USAR – Updated Safety Analysis Report, NEK, 2008)

2.3. Atenuacijske relacije

Atenuacijske krivulje ili relacije daju empirijsku vezu između magnitude potresa i udaljenosti žarišta s određenim parametrima gibanja tla. Ti parametri mogu biti npr. maksimalne vrijednosti akceleracije (*peak ground acceleration, PGA*), brzine (*peak ground velocity, PGV*), pomaka (*peak ground displacement, PGD*), intenzitet potresa, duljina trajanja gibanja tla, prevladavajući period i spektri odziva (npr. *relative displacement response spectrum, SD*). Dobivene su statističkom analizom velikog broja zapisa potresa na nekom području određene geološke morfologije. Relacije su grupirane po regijama i, striktno uzevši, vrijede samo za područja u kojima su izvedene. Ipak, kako su zapisi jakih potresa rijetki, u praksi se u nedostatku lokalnih atenuacijskih relacija koriste one koje su izvedene za tektonski i geološki slična područja u svijetu. Valja napomenuti da su relacije dobre koliko i podaci iz kojih su izvedene pa su tako npr. relacije za sjeverozapadni dio SAD-a najpouzdanije.

Za područje oko NEK ne postoji lokalna atenuacijska relacija za najveće horizontalno ubrzanje tla (PGA), pa ću se za skaliranje sintetičkih seizmograma koristiti izrazom koji su za područje Dinarida izveli Herak et al. (2001), te srednjakom tzv. NGA relacija (*Next Generation Attenuation Relationships*, 2008). Pri korištenju izraza Herak et al. (2001), dobivenu vrijednost PGA množio sam faktorom 0.8, kako bih iznos PGA reducirao na osnovnu stijenu, jer se pokazalo da skup podataka na temelju kojih je relacija izvedena sadrži prosječnu amplifikaciju od oko 25% (M. Herak, osobno priopćenje).

Izraz za maksimalnu akceleraciju prema Herak et al. (2001) je

$$a_{max} = 10^{-1.300+0.331*m-1.152*\log\left(\sqrt{\Delta^2+(11.8)^2}\right)} * 100$$

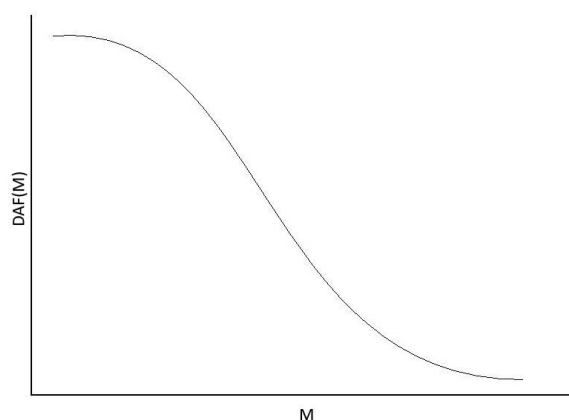
gdje je m magnituda potresa, Δ epicentralna udaljenost, a PGA je izraženo u postocima ubrzanja teže (g). Podaci korišteni u ovoj relaciji nalaze se u tablici 1. Korištene NGA relacije su Abrahamson & Silva (2008), Campbell & Bozorgnia (2008), Chiou & Youngs (2008) i Idriss (2008). Uzeta je njihova srednja vrijednost tako da je svaka imala istu težinu. NGA relacije ovise o magnitudi potresa, maksimalnoj brzini transverzalnih valova u prvih 30 metara dubine, tipu rasjeda, širini pukotine na rasjedu, najmanjoj udaljenosti od pukotine rasjeda do površine i do točke promatranja te o epicentralnoj udaljenosti. Parametri su odabrani tako da relacije daju iznose PGA reprezentativne za izdanak osnovne stijene na lokaciji NEK.

3. Deterministička analiza gibanja tla u Nuklearnoj elektrani Krško za realne potresne scenarije

U poglavlju 2.1.2. naveo sam u kojim slučajevima možemo očekivati nelinearnost i kako se ona očituje. Očekujemo ju pri smičnim deformacijama većim od $10^{-5} \sim 10^{-4}$ i akceleracijama većim od $0.1 \sim 0.2$ g, a češća je u rastresitijim nego u dobro vezanim tlima. Očituje se povećanjem atenuacije i smanjenjem brzine transversalnih valova pri jačoj pobudi. Mi ćemo gledati kako se mijenja dinamički faktor amplifikacije (*DAF*), definiran kao omjer maksimalne akceleracije na površini i na izdanku osnovne stijene

$$DAF(M) = \frac{PGA_{površina}}{PGA_{osnovna\ stijena}}(M) \quad (3.1)$$

u ovisnosti o magnitudi potresa. *PGA* na osnovnoj stijeni procijenit će se prema odabranim atenuacijskim relacijama, te će služiti kao pobuda za račun *PGA* na površini modela. Očekivana ovisnost prikazana je na slici 12. U ekstremnim slučajevima, tj. pri vrlo jakim potresima, može doći i do deamplifikacije tako da amplituda gibanja na površini bude manja od amplitude na osnovnoj stijeni.



Slika 12 Ovisnost amplifikacije o magnitudi potresa

Profil tla koji promatramo prikazan je na slici 13, a preuzet je iz *Revised PSHA for NPP Krško site* (Fajfar & Lapajne, 2004). Sastoji se od 19 slojeva iznad osnovne stijene koja je na dubini od 79 m i u kojoj je brzina transversalnih valova $v_s = 800$ m/s. Poluprostor iznad osnovne stijene horizontalno je uslojen. Raspon brzine transversalnih valova je od 340 m/s u površinskom sloju, pa do 760 m/s u najdubljem sloju iznad osnovne stijene. Slojevi imaju debljinu od 2 do 10 m. U prvih dvadesetak metara profila imamo pijesak i šljunak, a u ostatku profila prah i glinu. Ovi materijali relativno su mekani, a u površinskim slojevima i poprilično rastresiti pa su stoga pogodni za nastanak nelinearnog

efekta. Vrsta tla označena je simbolima SP (engl. *poorly-graded sand*), GW (engl. *well-graded gravel*), SM (engl. *silty sand*), ML (engl. *silt*) i CL (engl. *clay*) prema USCS (*Unified Soil Classification System*) iz 1985.

79.0	2.0	1	$v_{s1}=340.0 \text{ m/s}$	$\rho_1=1800 \text{ kg/m}^3$	SP
	4.0	2	$v_{s2}=350.0 \text{ m/s}$	$\rho_2=2130 \text{ kg/m}^3$	GW
	2.0	3	$v_{s3}=365.0 \text{ m/s}$	$\rho_3=2080 \text{ kg/m}^3$	GW
	3.0	4	$v_{s4}=415.0 \text{ m/s}$	$\rho_4=1950 \text{ kg/m}^3$	GW/SM
	3.0	5	$v_{s5}=450.0 \text{ m/s}$	$\rho_5=2080 \text{ kg/m}^3$	ML
	3.0	6	$v_{s6}=480.0 \text{ m/s}$	$\rho_6=1800 \text{ kg/m}^3$	ML/CL
	3.0	7	$v_{s7}=580.0 \text{ m/s}$	$\rho_7=1940 \text{ kg/m}^3$	SM
	3.0	8	$v_{s8}=550.0 \text{ m/s}$	$\rho_8=2000 \text{ kg/m}^3$	ML
	3.0	9	$v_{s9}=540.0 \text{ m/s}$	$\rho_9=2000 \text{ kg/m}^3$	ML/CL
	3.0	10	$v_{s10}=585.0 \text{ m/s}$	$\rho_{10}=2050 \text{ kg/m}^3$	ML/CL
	5.0	11	$v_{s11}=590.0 \text{ m/s}$	$\rho_{11}=2080 \text{ kg/m}^3$	ML/CL
	5.0	12	$v_{s12}=590.0 \text{ m/s}$	$\rho_{12}=2020 \text{ kg/m}^3$	ML/CL
	5.0	13	$v_{s13}=630.0 \text{ m/s}$	$\rho_{13}=2060 \text{ kg/m}^3$	ML
	5.0	14	$v_{s14}=560.0 \text{ m/s}$	$\rho_{14}=2060 \text{ kg/m}^3$	ML
	5.0	15	$v_{s15}=675.0 \text{ m/s}$	$\rho_{15}=2050 \text{ kg/m}^3$	ML
	5.0	16	$v_{s16}=680.0 \text{ m/s}$	$\rho_{16}=2040 \text{ kg/m}^3$	SM/ML
	5.0	17	$v_{s17}=680.0 \text{ m/s}$	$\rho_{17}=2090 \text{ kg/m}^3$	ML
	5.0	18	$v_{s18}=710.0 \text{ m/s}$	$\rho_{18}=2020 \text{ kg/m}^3$	ML
	10.0	19	$v_{s19}=760.0 \text{ m/s}$	$\rho_{19}=2070 \text{ kg/m}^3$	ML/CL
		20	$v_{s20}=800.0 \text{ m/s}$	$\rho_{20}=2100 \text{ kg/m}^3$	BEDROCK

Slika 13 Matematički model tla ispod Nuklearne elektrane Krško (Revised PSHA for NPP Krško site, Fajfar & Lapajne, 2004)

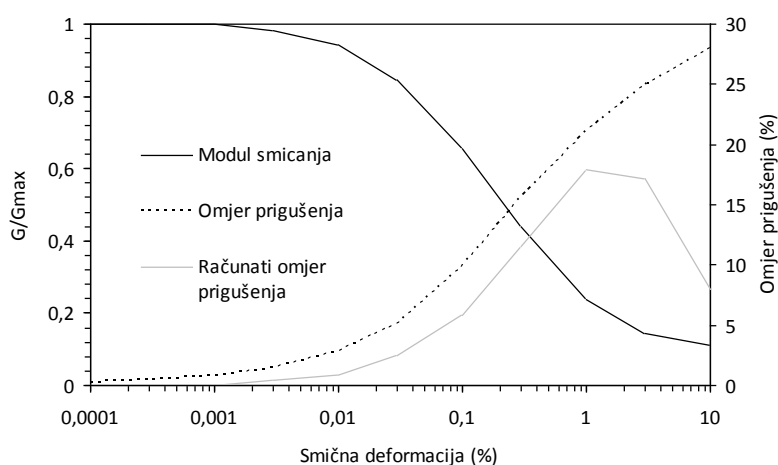
Za ulazno gibanje u navedeni geotehnički model pretpostavit ćemo akceleroگرام kakav odgovara realnim potresima iz epicentralnih područja koja za NEK mogu biti relevantna. To su Zagrebačko (Medvedničko) epicentralno područje, te potresne zone oko Ljubljane, Metlike i Brežice. Za sintetiziranje ulaznog akcelerograma koristio sam program *Sintakc_amplif* (autor: M. Herak) napisan u programskom jeziku *Matlab*. Detalji o programu nalaze se u dodatku A. Parametri potresa korišteni za sintezu akcelerograma nalaze se u tablici 1. Za svaku lokaciju sintetizirani su akceleroگرامi u istom rasponu magnituda, od 4.5 do 7.0 s korakom od 0.5 zbog jasnije usporedbe. No to ne znači da su sve magnitude i realno moguće na pojedinoj lokaciji. Najveće moguće magnitude za Zagreb (Medvednicu), Metliku i Ljubljanu su oko 6.5, a za Brežice su tek nešto manje.

Tablica 1 Epicentralne udaljenosti, dubine žarišta i magnitude potresa za sintetičke akceleroگرامe

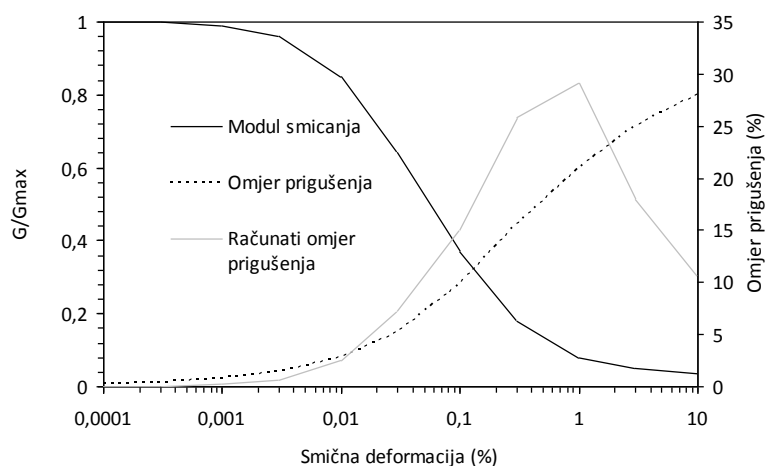
	Δ [km]	h [km]	M
Medvednica	45	12	4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0
Metlika	45	12	4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0
Brežice	10	10	4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0
Ljubljana	80	12	4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0

Za svaku magnitudu sintetizirano je po deset akcelerograma. Dobiveni akceleroگرامi su bez amplifikacije i vrijede za izdanak osnovne stijene. Takve akceleroگرامe koristimo kao ulazna gibanja u programu *NERA* (Bardet i Tobita, 2001), čiji su osnovni principi rada opisani u poglavlju 2.1.2. i u dodatku B.

Pri računanju u programu *NERA* korištene su četiri $G/G_{max}-\gamma$ krivulje. Na slikama 14, 15, 16 i 17 prikazane su krivulje za glinu (CL), pijesak (SM i SP) te šljunak (GW). Krivulje za glinu (CL) i pijesak (SM) preuzete su iz programa *NERA*.

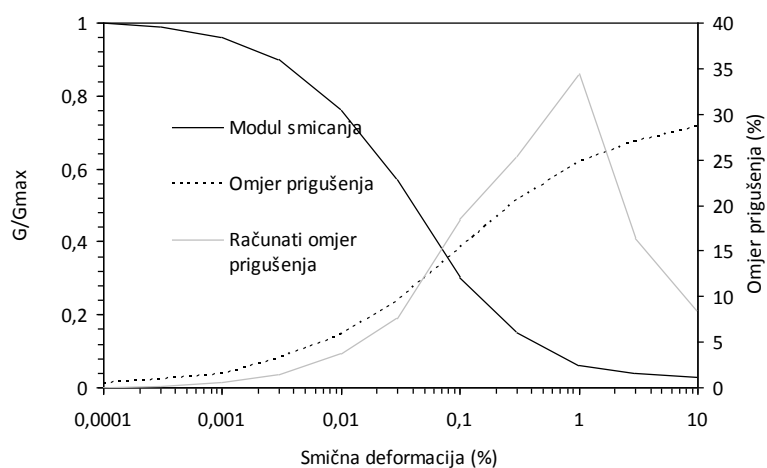


Slika 14 $G/G_{max}-\gamma$ za glinu (CL), *NERA* (Bardet i Tobita, 2001)

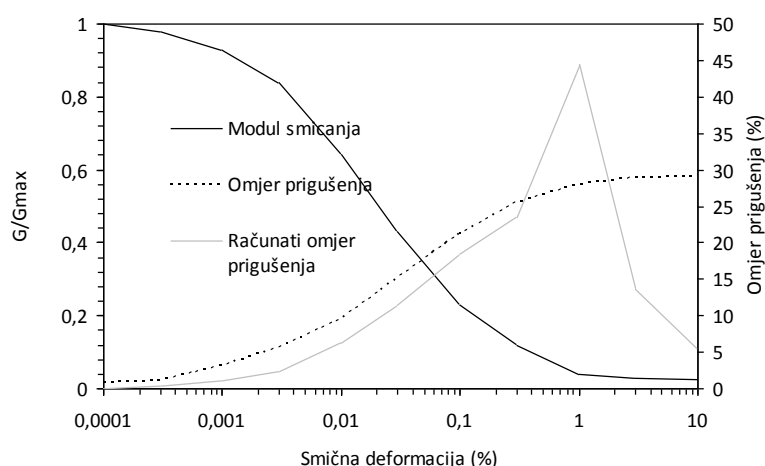


Slika 15 $G/G_{max} - \gamma$ za pijesak (SM), NERA (Bardet i Tobita, 2001)

Krivulja za pijesak (SP) i šljunak (GW) preuzeta je iz programa *Deepsoil* (Hashash, Groholski, Phillips, Park, 2008) modifikacijom indeksa plastičnosti (PI) na krivulji za pijesak prema Seed & Idriss (1991).



Slika 16 $G/G_{max} - \gamma$ za pijesak (SP), Deepsoil (Hashash, Groholski, Phillips, Park, 2008)



Slika 17 $G/G_{max} - \gamma$ za šljunak (GW), Deepsoil (Hashash, Groholski, Phillips, Park, 2008)

3.1. Žarište potresa kod Brežica

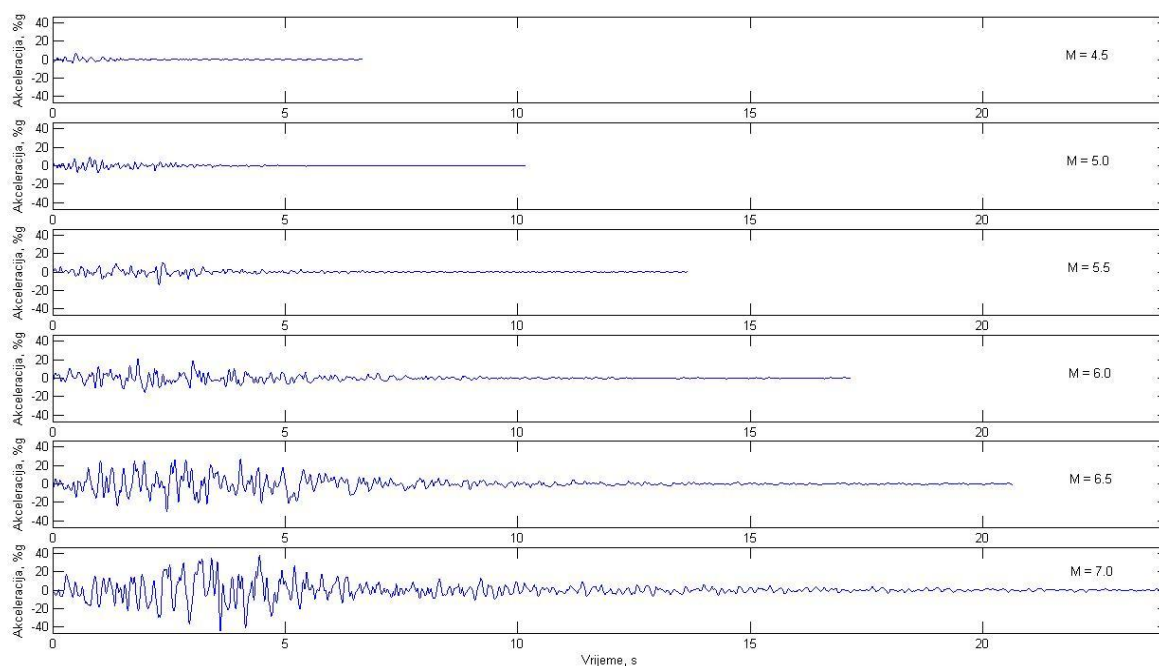
Odabrana epicentralna udaljenost je 10 km, a dubina žarišta 10 km. Dobivene *PGA* (engl. *peak ground acceleration*) prema Herak et al. (2001) i NGA atenuacijskim relacijama za pojedine magnitude na osnovnoj stijeni gdje ona izlazi na površinu (*outcrop*) prikazane su u tablici 2.

Tablica 2 PGA na osnovnoj stijeni, žarište kod Brežica

M	PGA (g)	
	Herak et al.	NGA
4.5	0.05277	0.05571
5.0	0.07725	0.08735
5.5	0.11308	0.13066
6.0	0.16554	0.17757
6.5	0.24232	0.25309
7.0	0.35472	0.33770

Ulazno gibanje (sintetički akceleroگرام) skalirano je na srednju vrijednost ovih dviju relacija. Duljine trajanja akceleroگرامa magnituda 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5 i 7.0, izračunate prema Trifuncu i Bradyu (1975) redom su 6.65 s, 10.15 s, 13.64 s, 17.14 s, 20.63 s te 24.13 s. Nakon propuštanja akceleroagrama kroz program *NERA* dobiven je profil akceleracija po slojevima. Za ovaj proračun zanimljive su akceleracije u prvih tridesetak metara dubine te akceleracija na osnovnoj stijeni. Srednje vrijednosti maksimalnih akceleracija dobivene iz deset ulaznih akceleroagrama za svaku magnitudu prikazane su u tablici 3 i grafički na slici 19.

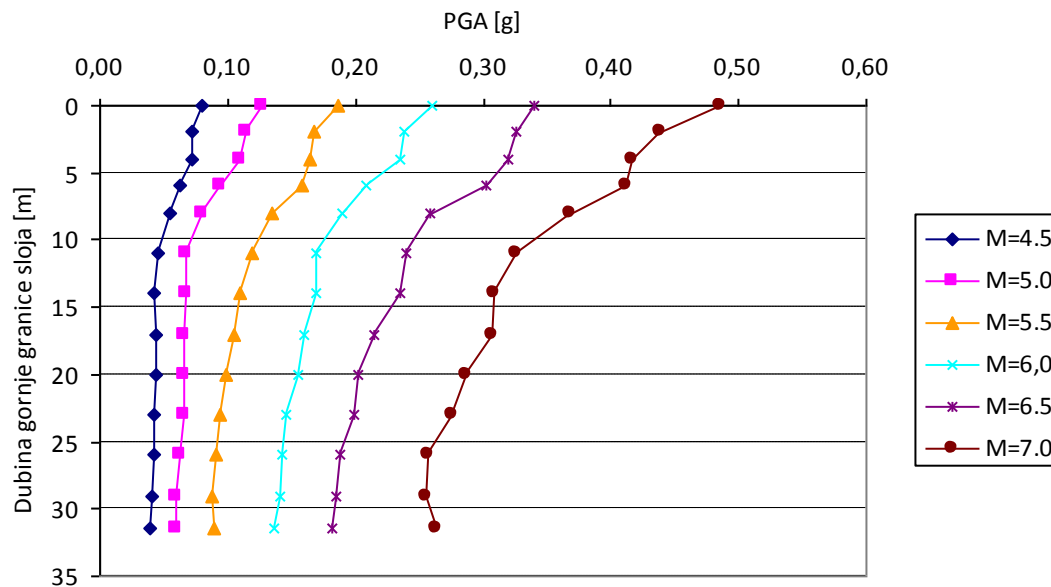
Na slici 18 prikazani su sintetički akceleroگرامи magnituda 4.5–7.0 za žarište kod Brežica.



Slika 18 Sintetički akceleroگرامи na izdanku osnovne stijene potresa magnituda 4.5–7.0 za žarište kod Brežica

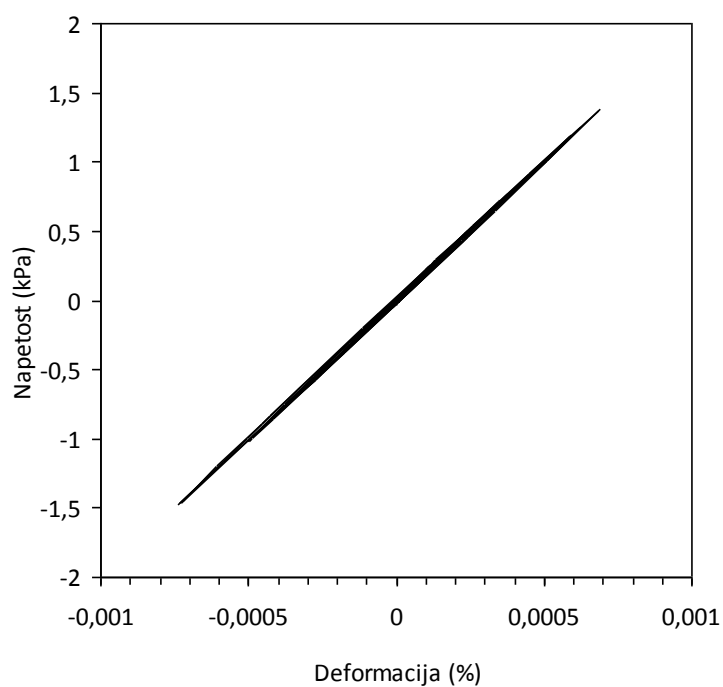
Tablica 3 PGA na različitim dubinama za pojedine magnitude, žarište kod Brežica

Dubina (m)	PGA (g)					
	M					
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.0	0.0799	0.1268	0.1871	0.2599	0.3406	0.4857
2.0	0.0720	0.1141	0.1674	0.2387	0.3257	0.4380
4.0	0.0713	0.1094	0.1646	0.2357	0.3195	0.4168
6.0	0.0632	0.0934	0.1579	0.2086	0.3025	0.4120
8.0	0.0550	0.0792	0.1355	0.1897	0.2584	0.3678
11.0	0.0460	0.0672	0.1184	0.1699	0.2400	0.3260
14.0	0.0430	0.0678	0.1091	0.1691	0.2349	0.3080
17.0	0.0432	0.0656	0.1046	0.1603	0.2150	0.3068
20.0	0.0437	0.0651	0.0986	0.1558	0.2019	0.2871
23.0	0.0427	0.0652	0.0946	0.1454	0.1985	0.2762
26.0	0.0431	0.0623	0.0903	0.1432	0.1877	0.2564
29.0	0.0414	0.0593	0.0875	0.1408	0.1841	0.2551
31.5	0.0387	0.0589	0.0897	0.1358	0.1821	0.2631
79.0	0.0327	0.0521	0.0799	0.1132	0.1624	0.2332



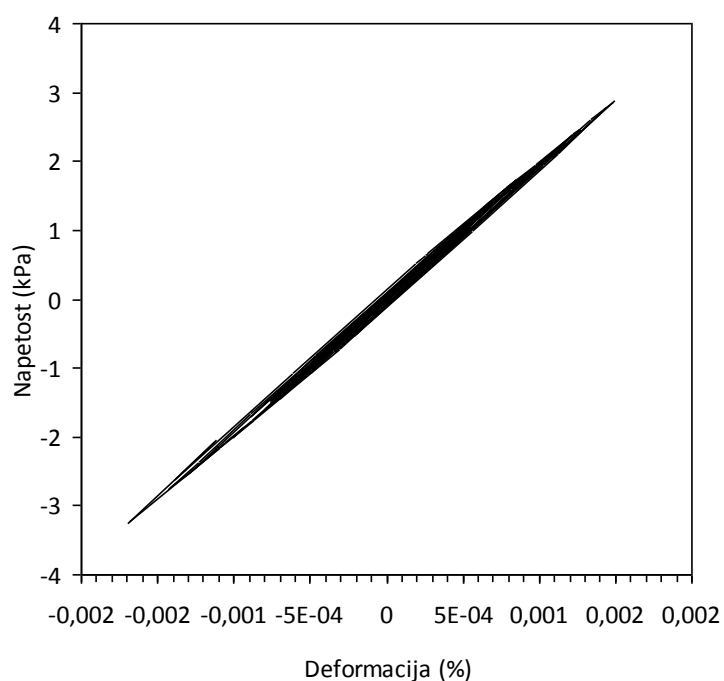
Slika 19 PGA na različitim dubinama za pojedine magnitude, žarište kod Brežica

Vidi se da je već pri magnitudi 4.5 maksimalna akceleracija na površini gotovo 0.1 g i da deformacija doseže 10^{-3} % odnosno 10^{-5} pa bi teoretski već tu trebao nastupiti nelinearni efekt, no gledajući krivulju napetost-deformacija na slici 20 očito je da nema dovoljno razvijenog oblika histereze i nelinearnost je slaba.

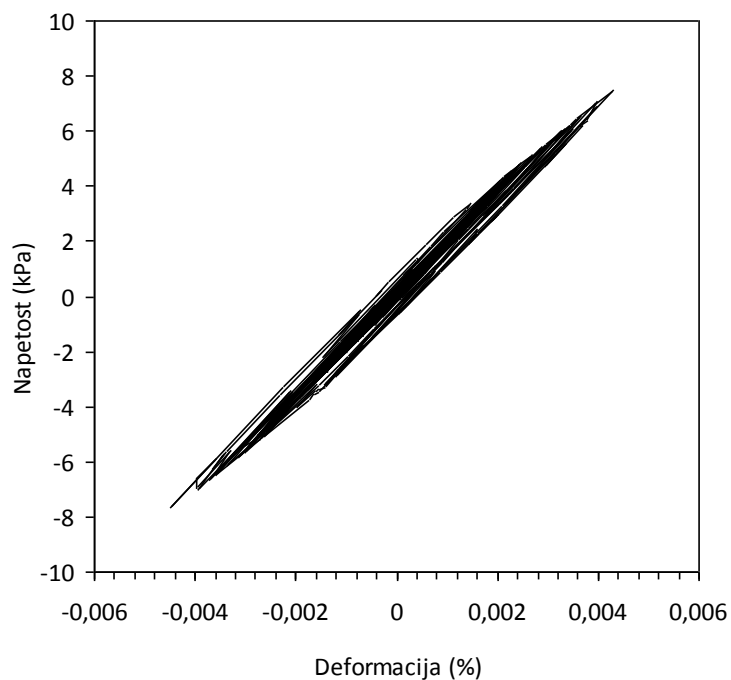


Slika 20 Krivulja napetost-deformacija za potres magnitude 4.5 kod Brežica

Tek pri magnitudi 5.5 dolazi do zamjetnog razvoja histereze na krivulji napetost-deformacija (slika 21), a najveća površina histereze, očekivano, je pri magnitudi 7.0 (slika 22).



Slika 21 Krivulja napetost-deformacija za potres magnitude 5.5 kod Brežica



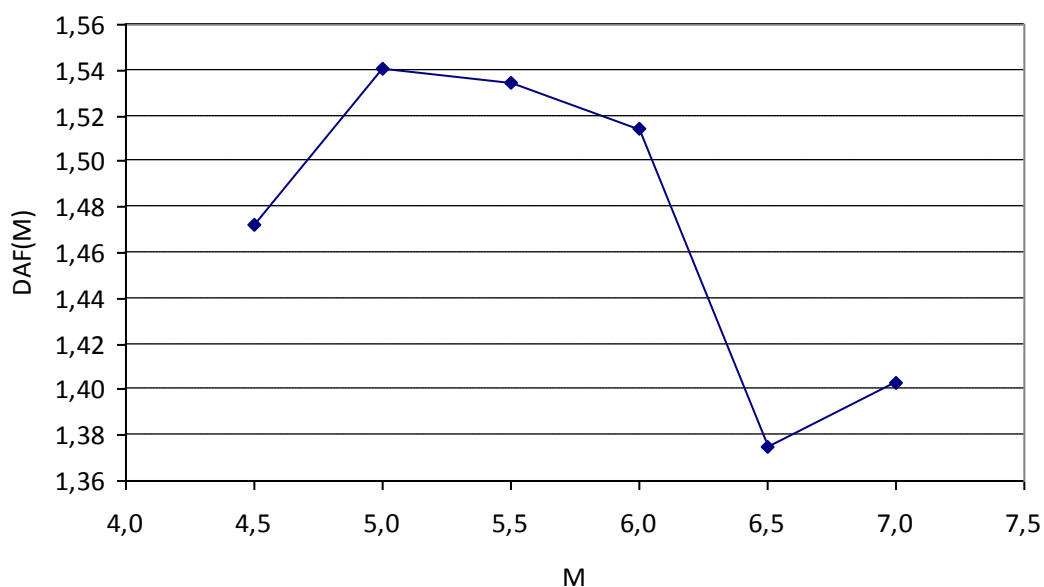
Slika 22 Krivulja napetost-deformacija za potres magnitude 7.0 kod Brežica

Konačno, provjera nelinearnosti ide preko relacije 3.1. PGA iz atenuacijskih relacija dane su u tablici 2 a na površini u tablici 3. Vrijednosti veličine $DAF(M)$ dane su u tablici 4.

Tablica 4 Vrijednosti DAF(M) u ovisnosti o magnitudi

M	DAF(M)
4.5	1.47
5.0	1.54
5.5	1.53
6.0	1.51
6.5	1.38
7.0	1.40

Vrijednosti amplifikacije DAF(M) monotonno opadaju od magnitude 5.0 do magnitude 6.5. Pri magnitudama 4.5 i 7.0 DAF odstupa od krivulje na slici 12, no to nije neočekivano, budući da početak i kraj te krivulje nisu točno definirani. Nelinearnost je prema tome izražena od magnitude 5.0, gdje je ona najmanja, što se vidi po relativno velikoj amplifikaciji i maloj površini histereze, a veća pri velikim magnitudama što se vidi po manjoj amplifikaciji i velikoj površini histereze. Efekt deamplifikacije mogao bi se očekivati pri akceleracijama većim od 1 g no vjerojatnost takvog potresnog scenarija je vrlo mala. Grafički prikaz amplifikacije za potrese u Brežicama magnituda 4.5–7.0 nalazi se na slici 23. Dobivena krivulja odgovara cijeloj krivulji sa slike 12.



Slika 23 Smanjenje amplifikacije između osnovne stijene (outcrop) i površine za potrese kod Brežica

3.2. Žarište potresa kod Zagreba (Medvednica) i Metlike

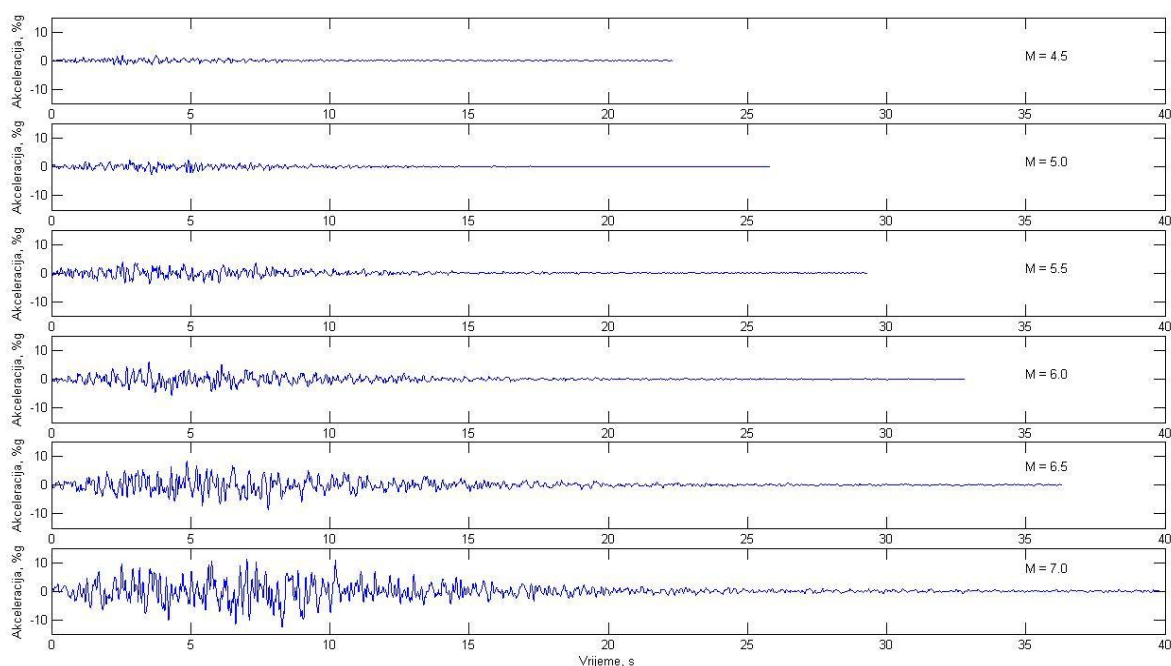
Epicentralna udaljenost je 45 km a dubina žarišta 12 km. Parametri lokacije žarišta kod Zagreba isti su i za žarište kod Metlike, tako da ova analiza vrijedi za Zagreb i Metliku. PGA za ovu lokaciju prema *Herak et al. (2001)* i *NGA* atenuacijskim relacijama za svaku magnitudu nalazi se u tablici 5.

Tablica 5 PGA na osnovnoj stijeni, žarište kod Zagreba (Metlike)

PGA (g)		
M	Herak et al.	NGA
4.5	0.01484	0.01020
5.0	0.02173	0.01799
5.5	0.03180	0.03061
6.0	0.04655	0.04710
6.5	0.06815	0.07150
7.0	0.09976	0.10135

Kao i u proračunu za žarište kod Brežica, i ovdje uzimamo srednju vrijednost maksimalnih akceleracija iz tablice 5 za skaliranje sintetičkih akceleroograma u *NERI*. Duljine trajanja ovih sintetičkih akceleroograma redom su 22.30 s, 25.79 s, 29.29 s, 32.78 s, 36.27 s i 39.77 s. Dobiveni profil srednjih vrijednosti maksimalnih akceleracija po dubinama do dubine 31.50 m i na osnovnoj stijeni prikazan je u tablici 6 i grafički na slici 25.

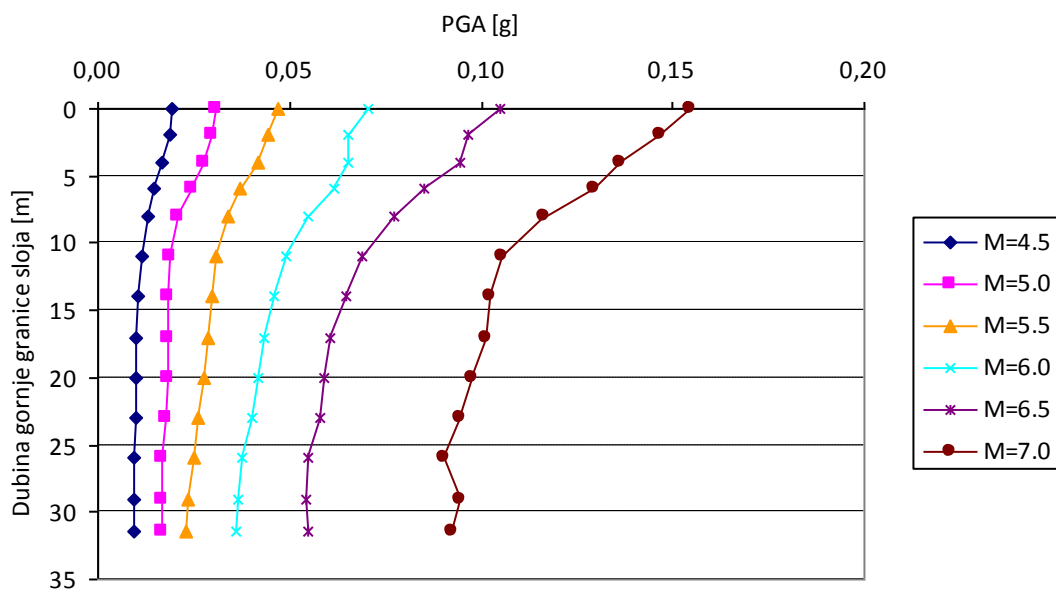
Na slici 24 prikazani su sintetički akceleroگرامи magnituda 4.5–7.0 za žarište kod Zagreba (Metlike).



Slika 24 Sintetički akceleroگرامи na izdanku osnovne stijene magnituda 4.5–7.0 za žarište kod Zagreba (Metlike)

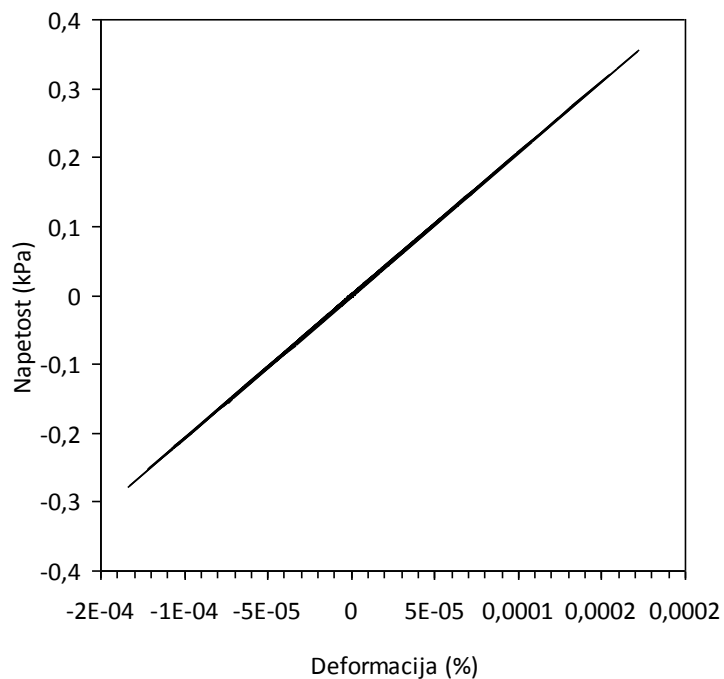
Tablica 6 PGA na različitim dubinama za pojedine magnitude, žarište kod Zagreba (Metlike)

Dubina (m)	PGA (g)					
	M					
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.0	0.0195	0.0309	0.0469	0.0703	0.1049	0.1546
2.0	0.0186	0.0295	0.0445	0.0650	0.0967	0.1466
4.0	0.0169	0.0278	0.0416	0.0652	0.0947	0.1361
6.0	0.0148	0.0246	0.0372	0.0614	0.0851	0.1294
8.0	0.0133	0.0211	0.0337	0.0546	0.0772	0.1164
11.0	0.0115	0.0187	0.0306	0.0493	0.0690	0.1056
14.0	0.0103	0.0185	0.0297	0.0461	0.0647	0.1025
17.0	0.0101	0.0184	0.0285	0.0432	0.0607	0.1013
20.0	0.0099	0.0182	0.0274	0.0420	0.0592	0.0976
23.0	0.0097	0.0175	0.0259	0.0402	0.0578	0.0947
26.0	0.0096	0.0168	0.0249	0.0378	0.0549	0.0904
29.0	0.0092	0.0166	0.0235	0.0365	0.0543	0.0946
31.5	0.0092	0.0166	0.0231	0.0361	0.0549	0.0923
79.0	0.0091	0.0141	0.0220	0.0317	0.0457	0.0733



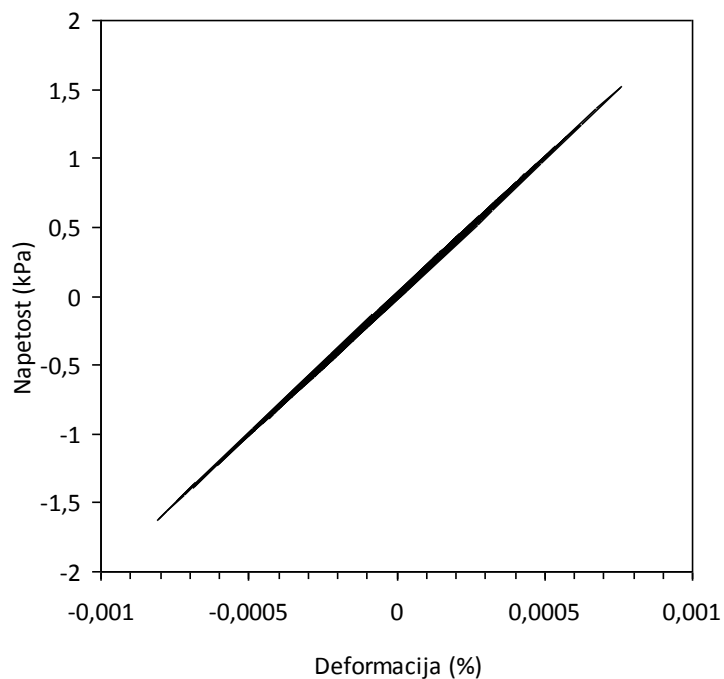
Slika 25 PGA na različitim dubinama za pojedine magnitude, žarište kod Zagreba (Metlike)

Epicentralna udaljenost u ovom slučaju bitno je veća nego u slučaju žarišta u Brežicama pa se može očekivati da će se nelinearnost očitovati tek pri jako velikim magnitudama. U tablici 6 vidi se da je maksimalna akceleracija na površini najbliža 0.1 g tek pri magnitudi 6.5 pa se tu i očekuje nelinearni efekt. Pri nižim magnitudama očekuje se klasična linearnost što se vidi po malo deformaciji (10^{-6}) i vrlo slaboj izraženoj histerezi na krivulji napetost-deformacija (slika 26).

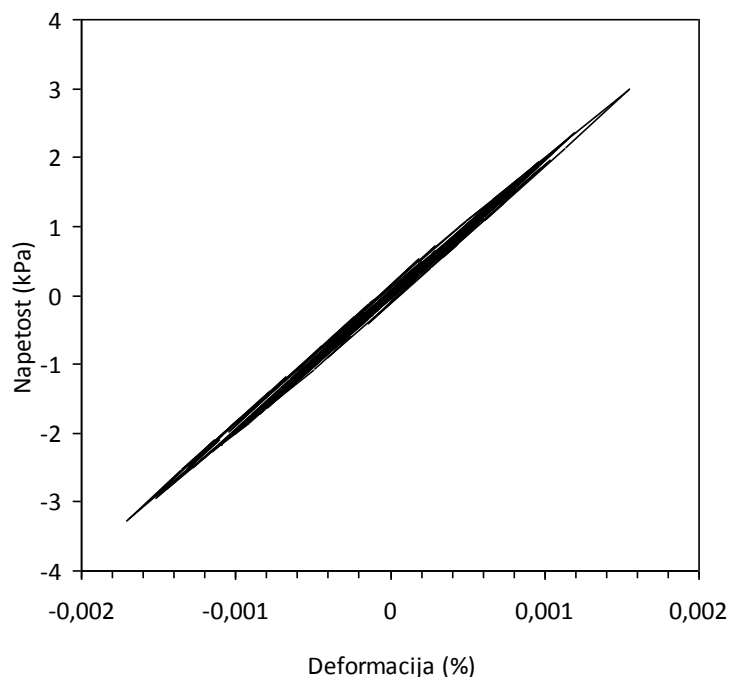


Slika 26 Krivulja napetost-deformacija za potres magnitude 4.5 kod Zagreba (Metlike)

Dakle, pri magnitudi 6.5 dolazi do deformacija većih od 10^{-5} pa tako i do znatnije izraženosti histereze na krivulji deformacija-napetost (slika 27) pa je, kao i prije, nelinearnost najizraženija pri magnitudi 7.0 (slika 28).



Slika 27 Krivulja napetost-deformacija za potres magnitude 6.5 kod Zagreba (Metlike)



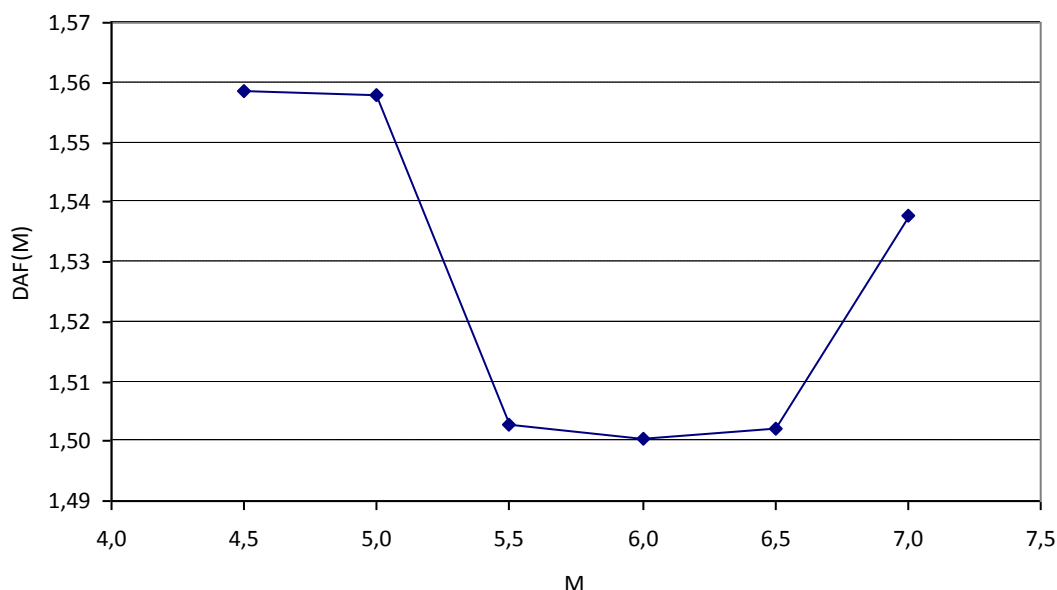
Slika 28 Krivulja napetost-deformacija za potres magnitude 7.0 kod Zagreba (Metlike)

Vrijednosti amplifikacije iz relacije 3.1 nalaze se u tablici 7.

Tablica 7 Vrijednosti DAF(M) u ovisnosti o magnitudi

M	DAF(M)
4.5	1.56
5.0	1.56
5.5	1.50
6.0	1.50
6.5	1.50
7.0	1.54

Amplifikacija ne opada monotono niti na jednom dijelu krivulje DAF(M) kao što je bio slučaj u poglavlju 3.1. Pri magnitudama 4.5 i 5.0 amplifikacije su jednake. Nakon toga amplifikacija počinje opadati i ima isti iznos pri magnitudama 5.5, 6.0 i 6.5. Amplifikacija pri magnitudi 7.0 iznosom je veća od onih pri magnitudama 5.5, 6.0 i 6.5. Početna pretpostavka bila je da će se nelinearnost pojaviti pri magnitudi 6.5, no gledajući sliku 29 može se zaključiti da nelinearnost postoji pri svim razmatranim magnitudama i da krivulja odgovara srednjem i desnom dijelu krivulje sa slike 12. Profinjenje koraka između razmatranih magnituda zasigurno bi potvrdilo sličnost s teorijskom krivuljom sa slike 12.



Slika 29 Smanjenje amplifikacije između osnovne stijene i površine za potrese kod Zagreba ili Metlike

3.3. Žarište potresa kod Ljubljane

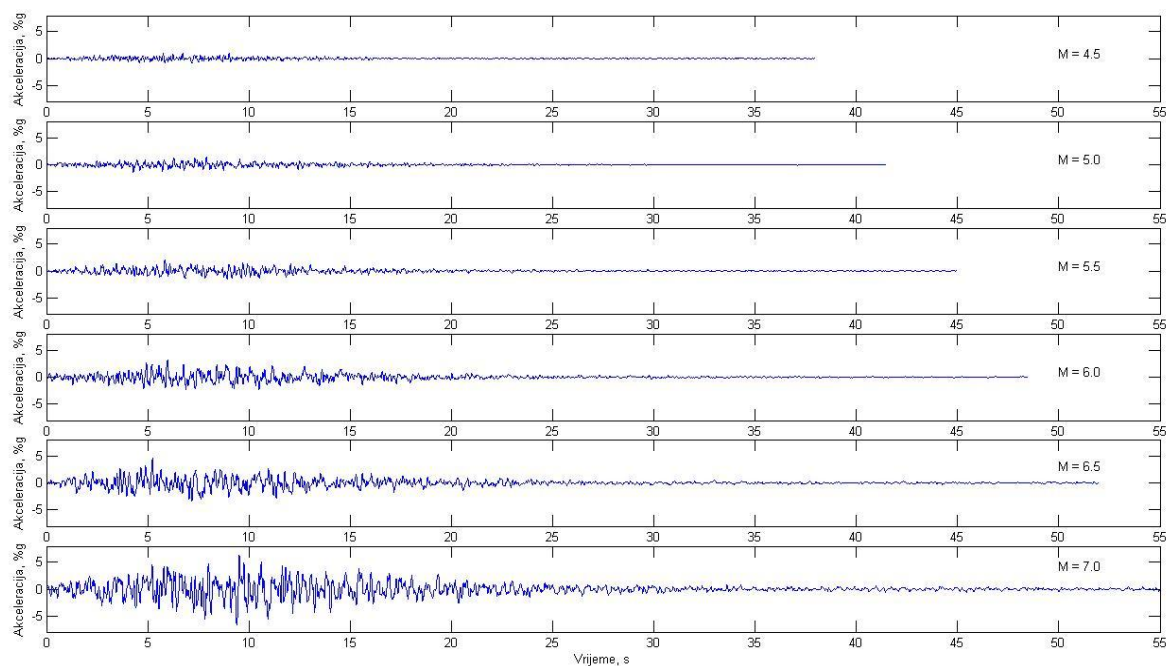
Ovo je najudaljenija lokacija žarišta koja može imati znatan utjecaj na sigurnost Nuklearne elektrane Krško. Epicentralna udaljenost je 80 km a dubina žarišta je 12 km. U tablici 8 prikazane su PGA prema *Herak et al. (2001)* i *NGA (2008)* relacijama.

Tablica 8 PGA na osnovnoj stijeni, žarište kod Ljubljane

M	PGA (g)	
	Herak et al.	NGA
4.5	0.00785	0.00431
5.0	0.01149	0.00808
5.5	0.01682	0.01467
6.0	0.02462	0.02395
6.5	0.03605	0.03861
7.0	0.05277	0.05813

Duljine trajanja sintetičkih akcelorograma su 37.94 s, 41.44 s, 44.93 s, 48.43 s, 51.92 s i 55.42 s. Dobiveni profil srednjih vrijednosti maksimalnih akceleracija po dubinama prikazan je u tablici 9 i grafički na slici 31. Gledano samo teorijski, nelinearnost se može očekivati samo pri magnitudi 7.0 jer je tada akceleracija na površini najbliža vrijednosti 0.1 g.

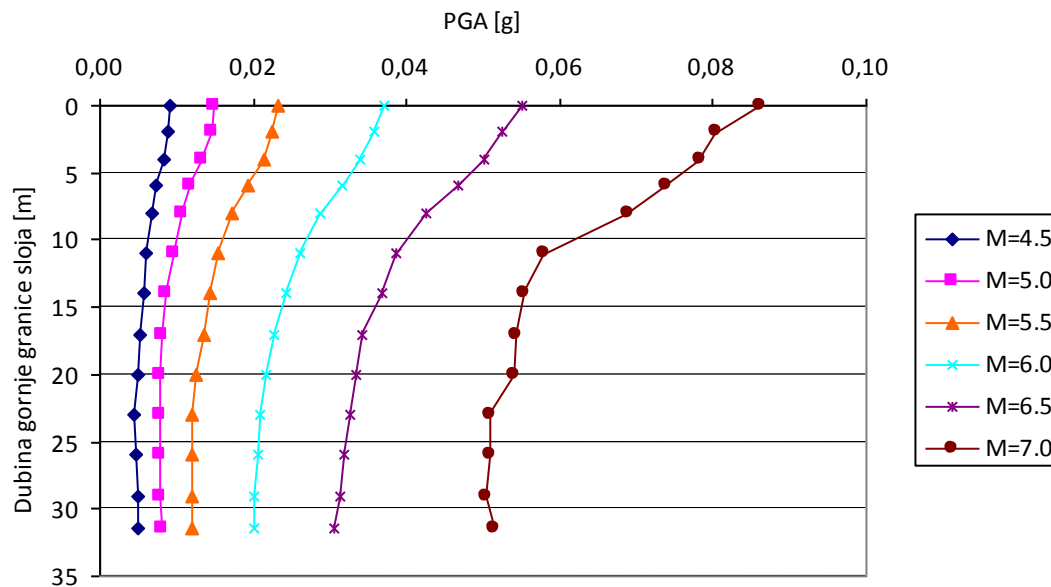
Na slici 30 prikazani su sintetički akcelorogrami magnituda 4.5–7.0 za žarište kod Ljubljane.



Slika 30 Sintetički akceleroگرامи на изданку основне стийене магнитуда 4.5–7.0 за жариште код Лjublјане

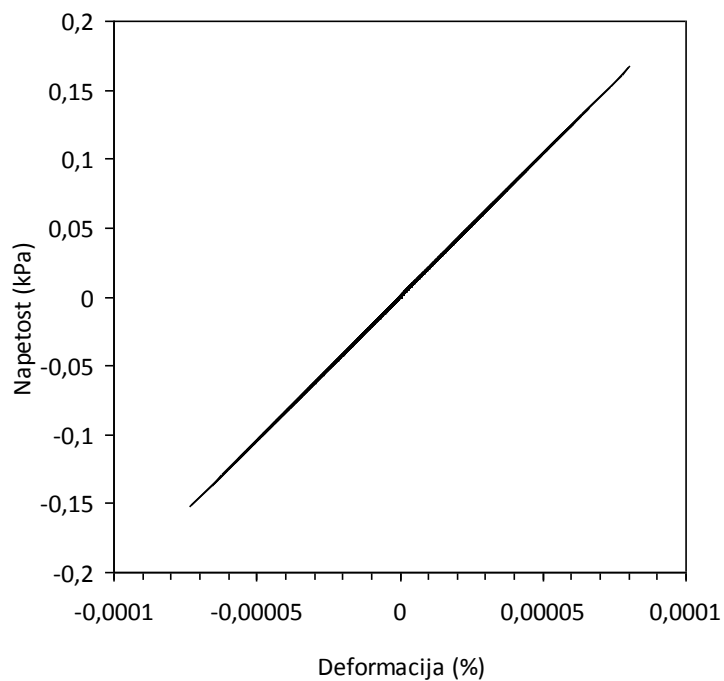
Tablica 9 PGA на различитим dubinama за pojedine magnitude, žarište код Ljublјане

Dubina (m)	PGA					
	M					
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
0.0	0.0092	0.0150	0.0233	0.0370	0.0550	0.0862
2.0	0.0088	0.0147	0.0223	0.0357	0.0525	0.0803
4.0	0.0083	0.0133	0.0214	0.0338	0.0501	0.0783
6.0	0.0074	0.0118	0.0193	0.0316	0.0466	0.0738
8.0	0.0067	0.0106	0.0172	0.0287	0.0424	0.0689
11.0	0.0060	0.0096	0.0154	0.0260	0.0385	0.0580
14.0	0.0057	0.0086	0.0144	0.0242	0.0367	0.0555
17.0	0.0052	0.0082	0.0135	0.0227	0.0342	0.0543
20.0	0.0049	0.0079	0.0126	0.0216	0.0335	0.0541
23.0	0.0046	0.0077	0.0121	0.0208	0.0327	0.0508
26.0	0.0046	0.0079	0.0120	0.0207	0.0319	0.0510
29.0	0.0049	0.0080	0.0121	0.0201	0.0313	0.0503
31.5	0.0050	0.0080	0.0119	0.0202	0.0306	0.0514
79.0	0.0043	0.0069	0.0101	0.0175	0.0270	0.0428

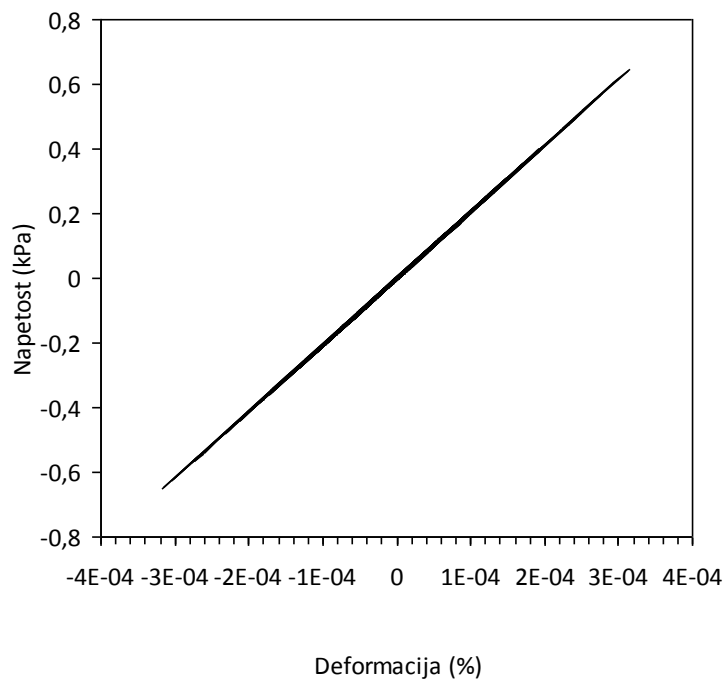


Slika 31 PGA na različitim dubinama za pojedine magnitude, žarište kod Ljubljane

Ako se gleda nastala deformacija i pri tome razvoj histereze na krivulji napetost-deformacija, također se može doći do istog zaključka, jer su deformacije magnituda manjih od 7.0 reda veličine 10^{-6} i nema zamjetnog razvoja histereze (slika 32 i 33).

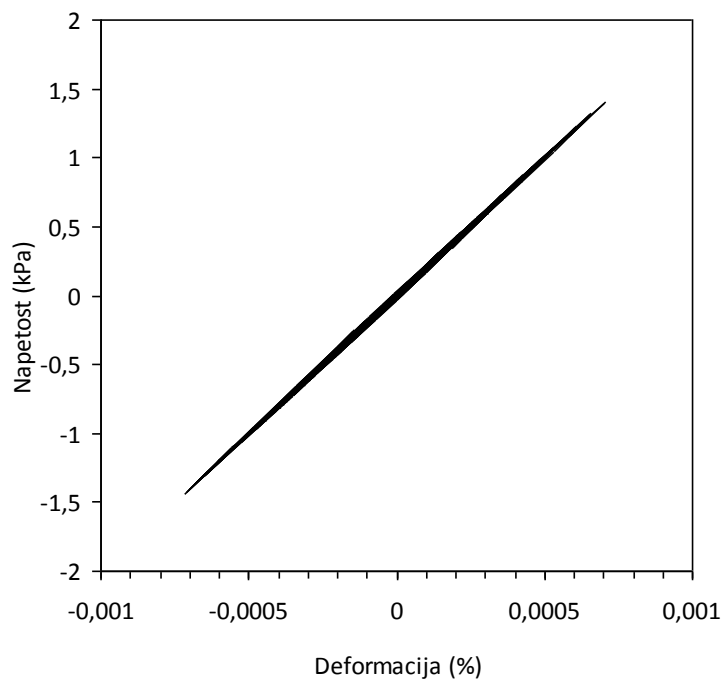


Slika 32 Krivulja napetost-deformacija za potres magnitude 4.5 kod Ljubljane



Slika 33 Krivulja napetost-deformacija za potres magnitude 6.0 kod Ljubljane

Uvjet za deformaciju reda veličine 10^{-5} i zamjetniju površinu histereze zadovoljen je tek pri magnitudi 7.0 (slika 34).



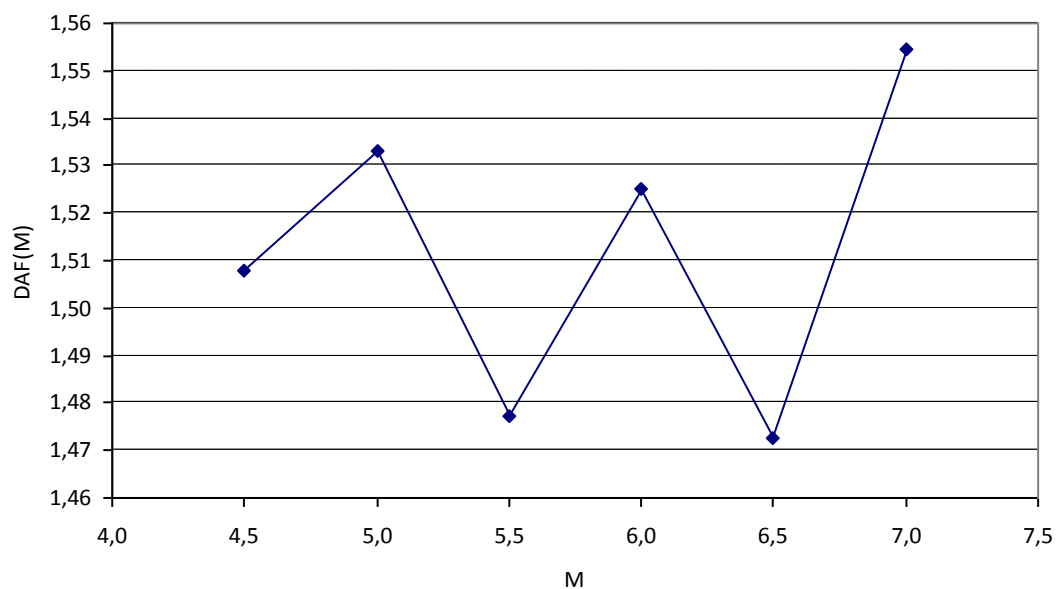
Slika 34 Krivulja napetost-deformacija za potres magnitude 7.0 kod Ljubljane

Slijedi provjera nelinearnosti preko relacije 3.1. Vrijednosti amplifikacija nalaze se u tablici 10.

Tablica 10 Vrijednosti DAF(M) u ovisnosti o magnitudi

M	DAF(M)
4.5	1.51
5.0	1.53
5.5	1.48
6.0	1.52
6.5	1.47
7.0	1.55

Grafički prikaz vrijednosti iz tablice 10 vidi se na slici 35. Amplifikacija u čitavom rasponu razmatranih magnituda ima nepravilan hod i na prvi pogled ne odgovara nijednom dijelu teorijske krivulje sa slike 12. No raspon izračunate amplifikacije je vrlo malen (0.08), pa se može reći da DAF za potrese svih razmatranih magnituda ima približno istu vrijednost.



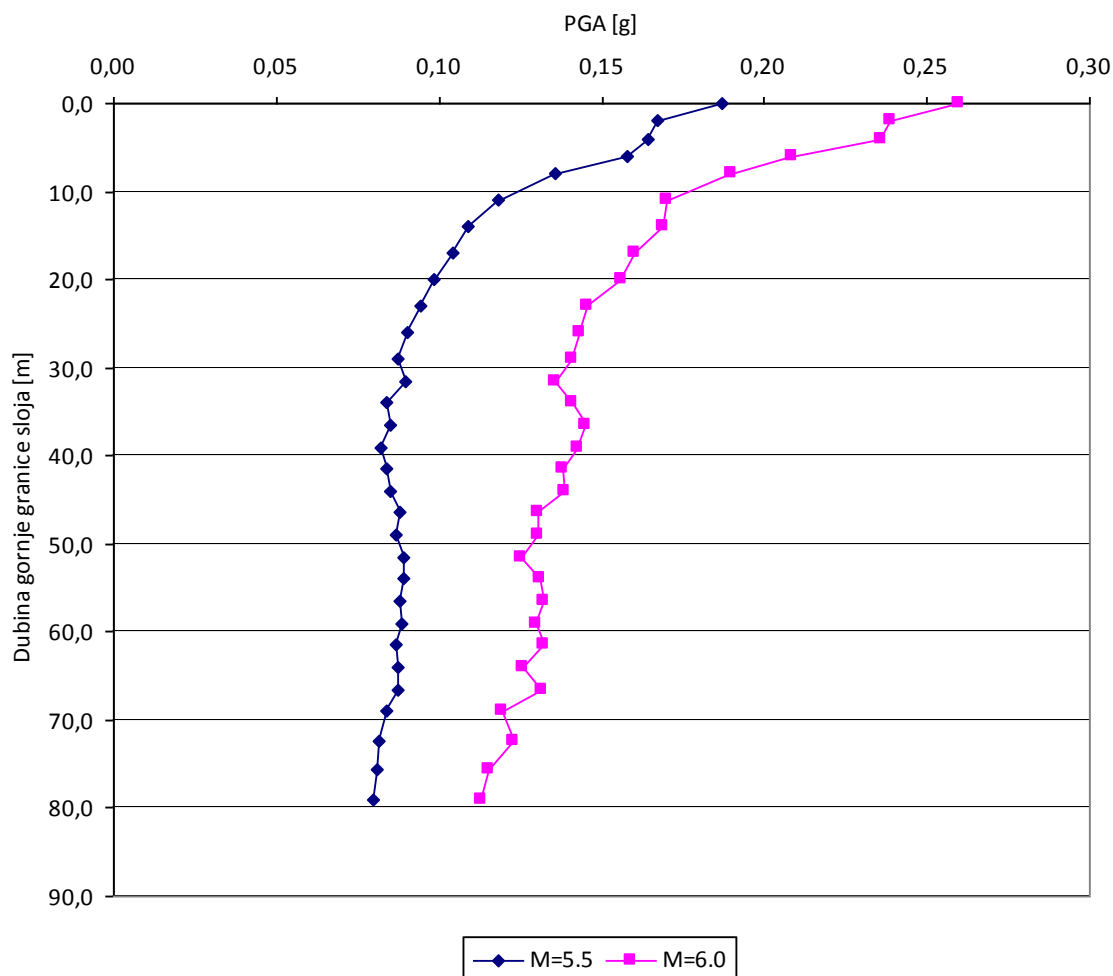
Slika 35 Varijacija amplifikacije između osnovne stijene (outcrop) i površine za potrese kod Ljubljane

4. Zaključak

Geotehnički model tla ispod Nuklearne elektrane Krško pogodan je za promatranje nelinearnog efekta. U prvih dvadesetak metara tlo je mekano, rastresito i uglavnom nekoherentno. Slojevi se sastoje od nesepariranog pijeska, finog šljunka i pijeska te praha. Na dubini većoj od dvadeset metara tlo je velikim dijelom koherentno i sastoji se od kombinacije praha i gline. Osnovna stijena je na dubini od 79 m.

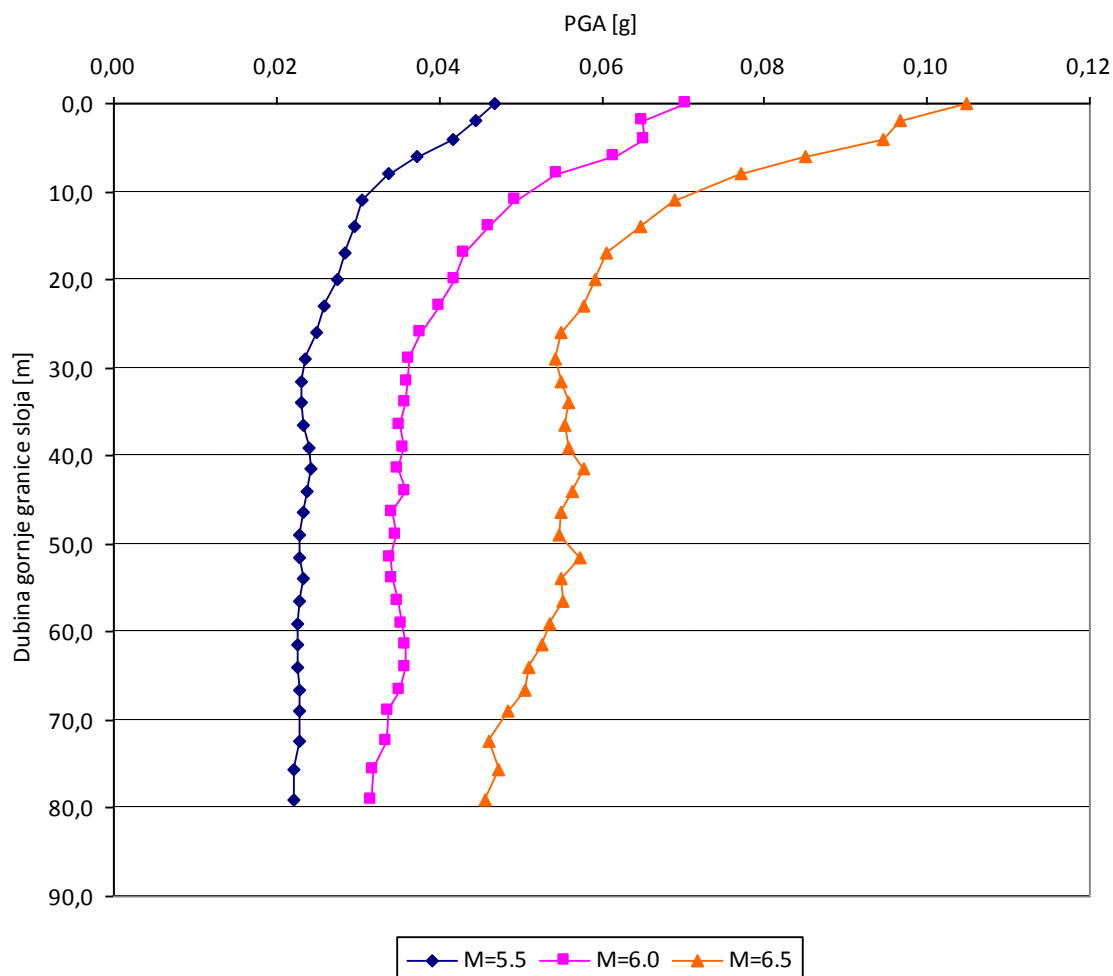
Dobiveni sintetički akceleroگرامи vrijede za izdanak osnovne stijene, dakle za lokacije na kojima osnovna stijena izlazi na površinu. Maksimalna horizontalna akceleracija (PGA) na koju skaliramo ulazno gibanje dobivena je kao srednja vrijednost atenuacijskih relacija koje su predložili *Herak et al. (2001)* te srednjaka četiri NGA relacije (*Abrahamson & Silva, 2008; Campbell & Bozorgnia, 2008; Chiou & Youngs, 2008; Idriss, 2008*).

Zbog svoje relativne blizine potresi s područja Brežica generiraju najveće akceleracije. Na slici 19 vidi se da je raspon akceleracija od 0.08 g za potres magnitude 4.5 do 0.49 g za potres magnitude 7.0. Također se vidi da pri svim magnitudama krivulje akceleracija nisu glatke u površinskim slojevima. Krivulje za magnitude 4.5–5.5 imaju nepravilan tok od 0 do 10 m dubine, a krivulje za magnitude 6.0–7.0 nepravilan tok imaju od 0 do 15 m dubine. Upravo u tim slojevima nalaze se mekani i nekoherentni materijali (šljunak, pijesak). To je još jedan pokazatelj prisutnosti nelinearnog efekta. Na slikama 20–22 vidi se razvoj histereze na krivulji napetost-deformacija. No najzorniji prikaz prisutnosti nelinearnosti pri svim razmatranim magnitudama vidi se na slici 23, koja prikazuje monotono opadanje omjera PGA iz atenuacijskih relacija na površini i PGA na osnovnoj stijeni od magnitude 5.0 do magnitude 6.5 (relacija 3.1). Na slici 36 prikazan je čitav profil akceleracija za magnitude 5.5 i 6.0. Akceleracije imaju lagan porast od osnovne stijene pa sve do 20–30 m dubine. Na nekim dijelovima imaju toliko lagan porast da se može reći da su konstantne (magnituda 5.5 od 70 do 40 m dubine). Na dubinama od 30 do 20 m akceleracije počinju znatnije rasti.



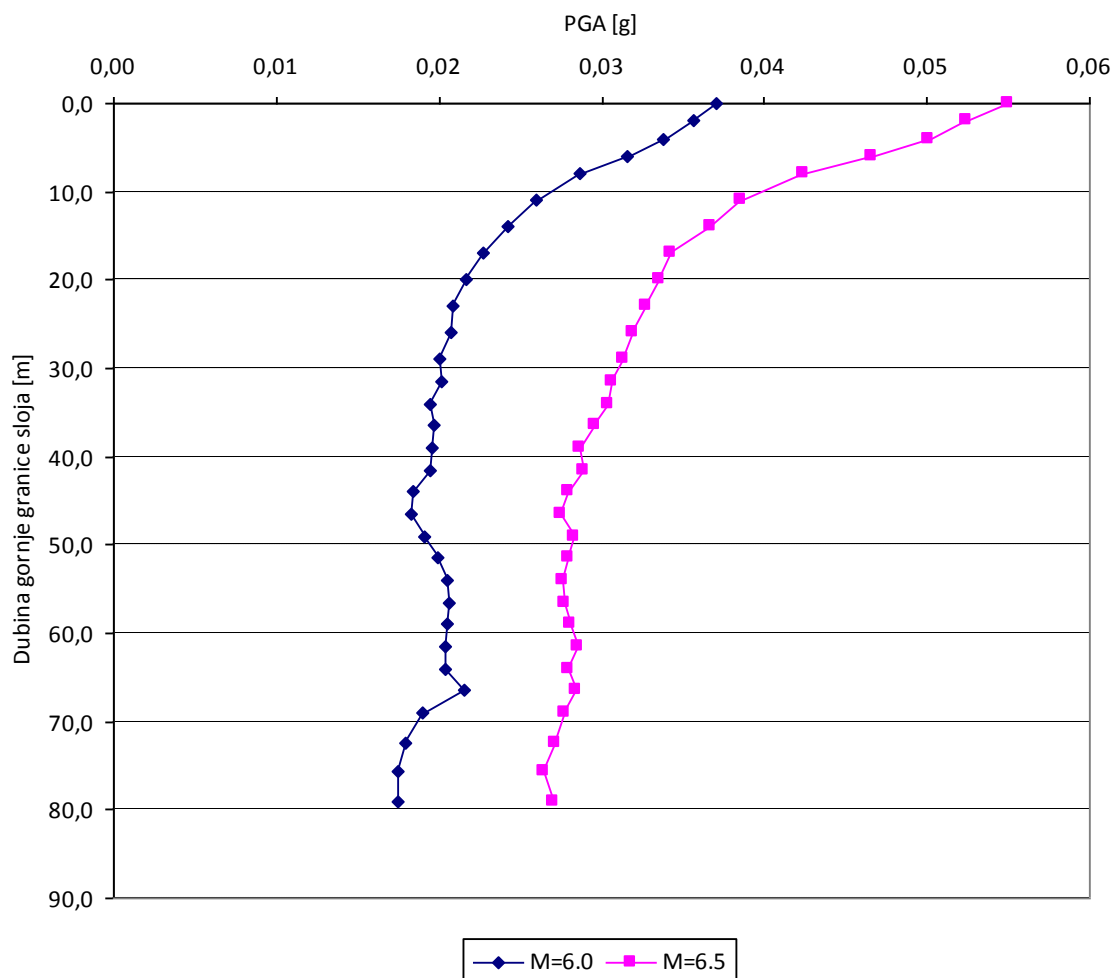
Slika 36 Akceleracije kroz čitav profil za magnitude 5.5 i 6.0 kod Brežica

Potresi s područja Zagreba (Medvednica), odnosno Metlike daju akceleracije na površini veće od 0.10 g tek pri magnitudi 6.5 (slika 25). Raspon akceleracija je od 0.02 g za magnitudu 4.5 do 0.15 g za magnitudu 7.0. Tok krivulja akceleracija gladak je za magnitude 4.5, 5.0 i 5.5 dok za magnitude 6.0, 6.5 i 7.0 postoje skokovi na dubinama do 5 m. Prema slici 29 kod tih magnituda primijećena je nelinearnost. Na slici 37 prikazan je puni profil akceleracija za magnitude 5.5, 6.0 i 6.5. Akceleracije magnituda 5.5 i 6.0 skoro su konstantne od osnovne stijene do dubine 30 m, gdje počinje nagli porast do površine. Akceleracije uzrokovane potresom magnitude 6.5 imaju blago nepravilan hod od osnovne stijene pa do dubine 30 m gdje kao i u prethodne dvije magnitude nastupa nagli porast.



Slika 37 Akceleracije kroz čitav profil za magnitude 5.5, 6.0 i 6.5 kod Zagreba odnosno Metlike

Potresi s područja Ljubljane generiraju relativno male akceleracije (u odnosu na Brežice i Zagreb). Iz slike 31 vidi se da bi tek potres magnitude 7.0 generirao akceleraciju približnu 0.10 g na površini, no takav scenarij vrlo je malo vjerojatan. Raspon akceleracija je od 0.009 g za magnitudu 4.5 do 0.09 g za magnitudu 7.0. Samo krivulja akceleracija za magnitudu 7.0 nije glatka pri površini pa bi tako samo pri toj magnitudi trebala postojati nelinearnost. Na slici 38 prikazan je puni profil akceleracija za magnitude 6.0 i 6.5. Kao i u prijašnjim razmatranjima, i ovdje akceleracije dobivaju znatan porast od dubine 20–30 m prema površini.



Slika 38 Akceleracije kroz čitav profil za magnitude 6.0 i 6.5 kod Ljubljane

Slike 36, 37 i 38 prikazuju pune profile akceleracija potresa najvećih magnituda koje se realno može očekivati na lokacijama Brežice, Medvednica, Metlika i Ljubljana. U svakom pojedinom slučaju primijećen je efekt nelinearnosti koji se manifestirao smanjenjem omjera *PGA* iz atenuacijskih relacija na površini i na osnovnoj stijeni. Nigdje nije uočena pojava deamplifikacije. Za to bi bila potrebna akceleracija ulaznog gibanja veća od 1 g, što se realno ne može očekivati na promatranim područjima. Primijećeno je da na svim profilima akceleracije prestaju vidno opadati s dubinom na dubini od oko 20 m. Ova činjenica opravdava odabranu dubinu temelja reaktorske zgrade Nuklearne elektrane Krško koja iznosi upravo 20 m, jer dublje temeljenje ne bi znatno doprinijelo smanjenju potresne pobude reaktorske zgrade.

Lokacija NEK nalazi se na tlu tipa C prema klasifikaciji u Eurokodu-8. Prema tom europskom propisu pripadna amplifikacija za tip C iznosi između 1.15 i 1.5, što se dobro slaže i s vrijednostima dinamičkog faktora amplifikacije (*DAF*) koji su izračunati u ovom radu.

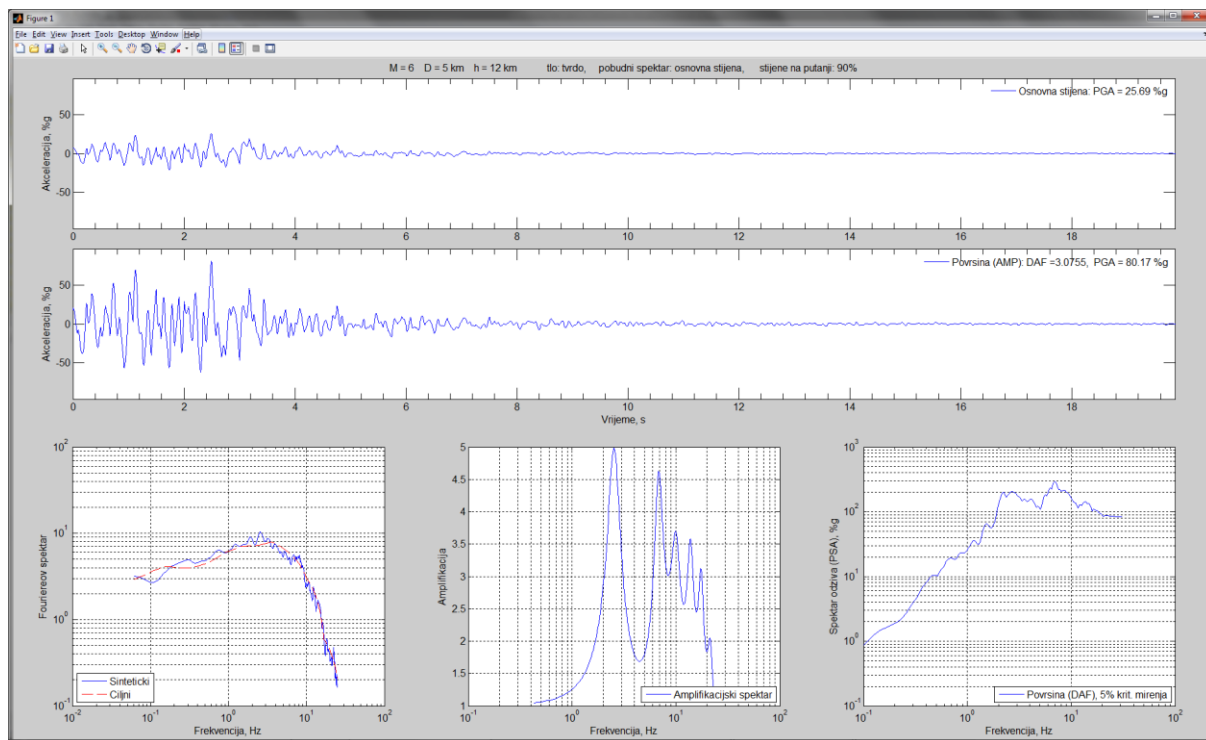
5. Dodatak

A. Program za sintetiziranje akceleroograma

Program *Sintakc_amplif* napisao je prof. M. Herak u programskom jeziku Matlab, a služi za sintetiziranje akceleroograma potresa uz pretpostavku linearne amplifikacije u površinskim slojevima tla ili bez nje (na razini osnovne stijene). Pretpostavke koje su u programu korištene su sljedeće:

- a) reprezentativni oblik Fourierovog spektra amplituda (S_0) akceleroograma može se opisati funkcijom magnitude potresa i udaljenosti njegovog žarišta od lokacije, klase tla (meko, srednje i tvrdo), geoloških obilježja tla na lokaciji (sedimenti, srednje tlo, osnovna stijena), te svojstava stijena na putu zrake, kako su to predložili Trifunac (1993) te Lee i Trifunac (1995);
- b) fazni spektar je slučajna funkcija frekvencije;
- c) trajanje signifikantnog dijela trešnje u skladu je s izrazom koji su predložili Trifunac i Brady (1975);
- d) oblik ovojnice akceleroograma može se modelirati Berlageovom funkcijom kojoj su parametri prilagođeni očekivanom trajanju.

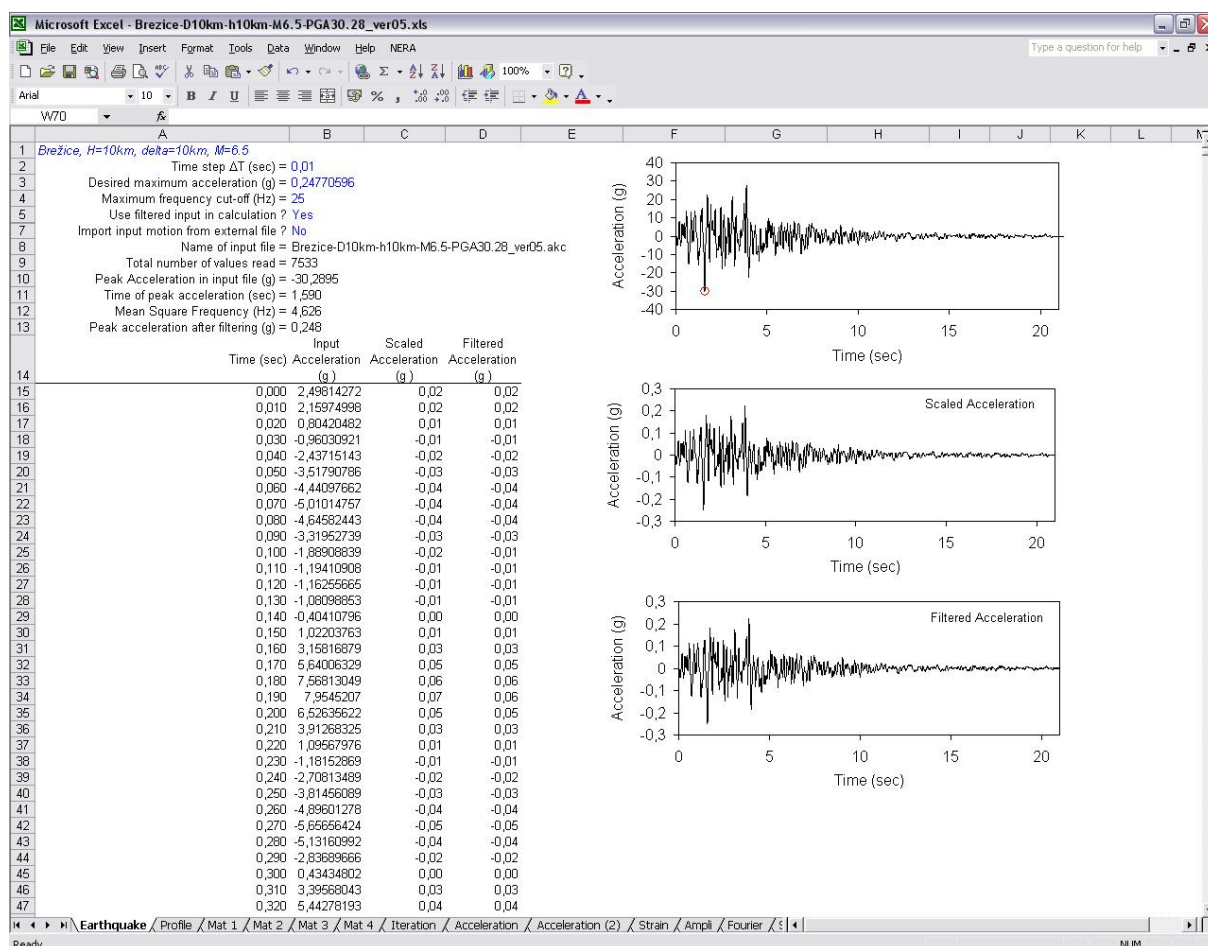
Maksimalna akceleracija prilagođava se unaprijed odabranoj empiričkoj atenuacijakoj relaciji. Program radi iterativno, tako da najprije sintetizira vremenski niz s amplitudnim spektrom koji odgovara parametrima željenog potresa, te slučajnim spektrom faze u skladu sa stavkama a) i b). Taj se niz tada množi s Berlageovom funkcijom u skladu s d), čime se dobije niz s modificiranim ('pokvarenim') spektrom amplituda $S_1 = S_B S_0$ (S_B je spektar odabrane Berlageove funkcije), te on više ne odgovara ciljnom spektru S_0 . Iterativnim postupkom baziranim na usporedbi spektara S_1 i S_0 , određuje se novi početni spektar S_0^1 , te se spektar akceleroograma približava željenom (ciljnom) spektru S_0 sve dok njihova razlika na svim frekvencijama ne bude manja od unaprijed zadanoga praga. Slika A1 prikazuje primjer takve sinteze za potres magnitude $M = 6.0$ na udaljenosti od 5 km i s dubinom žarišta od 12 km, lokaciju na tvrdom tlu i na osnovnoj stijeni uz 90 % putanje zrake kroz čvrstu stijenu (gornji graf), kao i na površini slojevitog rastresitog tla (srednji graf) čiji je amplifikacijski spektar prikazan srednjim grafom u donjem redu. Lijevi donji graf prikazuje ciljni spektar amplituda (crveno) kao i konačni spektar sintetiziranog akceleroograma, dok je desno dolje prikazan spektar odziva izračunatog akceleroograma na površini modela uz prigušenje 5% od kritičnoga.



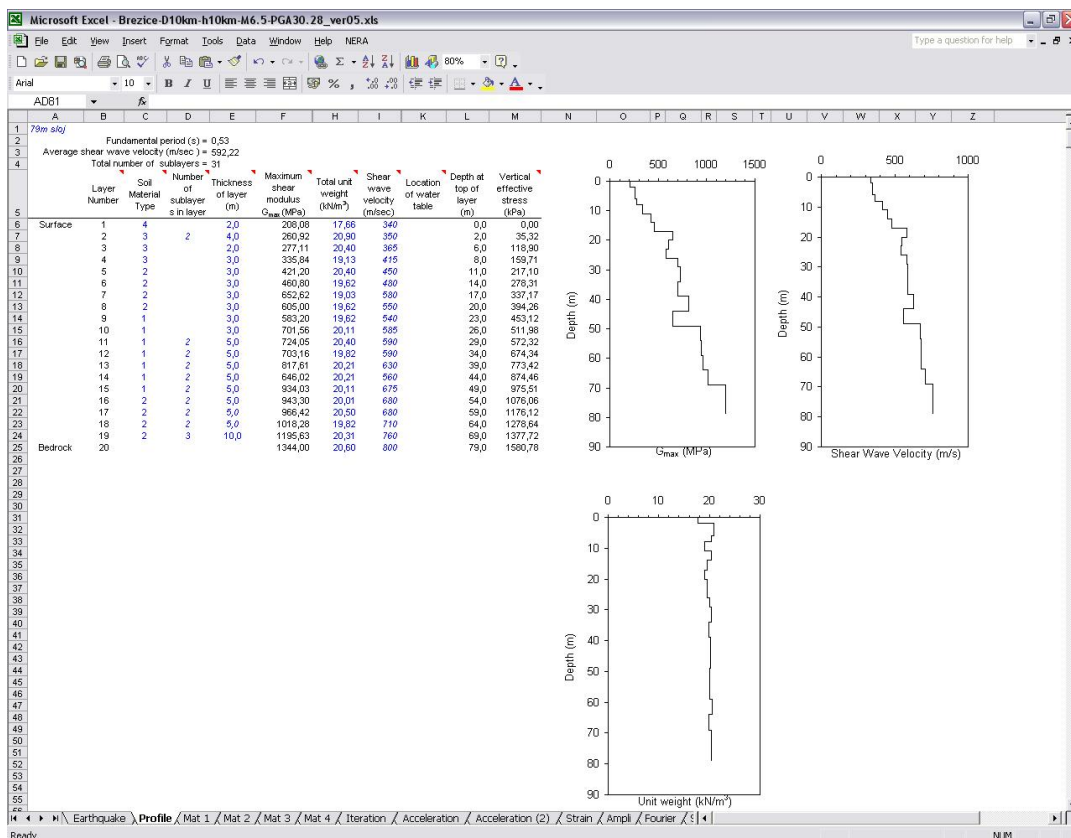
Slika A1 Primjer sintetičkih akceleroograma izračunatih programom Sintakc_amplif (vidi tekst za detaljni opis)

B. Program za analizu nelinearnog odziva uslojenog sredstva – NERA

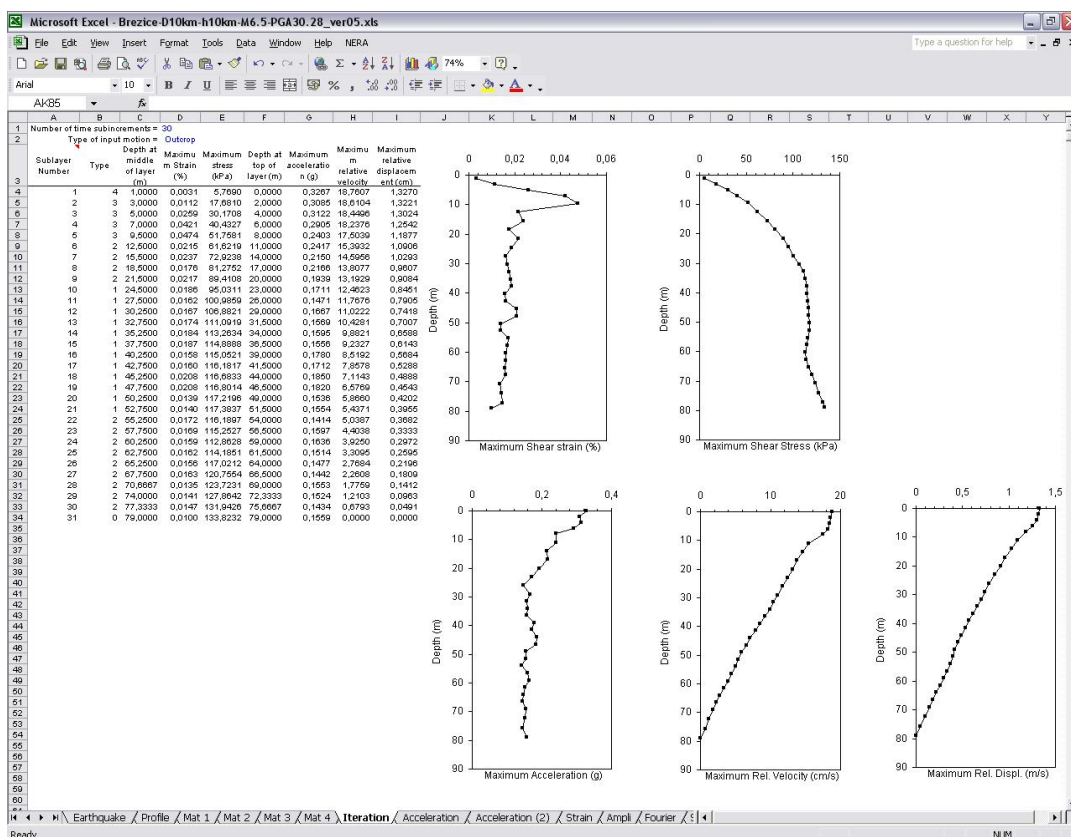
Program *NERA* napisali su J.P. Bardet i T. Tobita 2001. g. koristeći programski jezik *Fortran* i tablični kalkulator *Excel*. Ime *NERA* je kratica, a znači Nonlinear Earthquake Response Analysis. Za ulazne podatke koristi digitalizirane akceleroگرامe (sintetičke ili realne) zapisane na osnovnoj stijeni. Ovisno o zadanom geološkom profilu koji je definiran brojem i debljinom slojeva i podslojeva, tipom materijala, gustoćom slojeva te brzinom transverzalnih valova u njima, dobivaju se iznosi maksimalnih akceleracija u svakom pojedinom podsloju, relativne brzine i pomaci. Također se dobivaju napetosti i deformacije u željenom sloju te amplifikacijski spektar između željenih slojeva, Fourierov spektar odziva i spektri odziva relativnog pomaka i brzine. Slike B1, B2 i B3 pokazuju primjer računa za ulazni sintetički akceleroگرام magnitude $M = 6.5$, epicentralne udaljenosti 10 km i s dubinom žarišta od 10 km, definiciju modela i dobivene vrijednosti napetosti, deformacija, akceleracija te relativnih brzina i pomaka.



Slika B1 Primjer računa za ulazni sintetički akceleroگرام (vidi tekst za detaljni opis)



Slika B2 Definicija modela tla



Slika B3 Dobivene vrijednosti napetosti, deformacija, akceleracija, brzina i pomaka

6. Literatura

- Abrahamson, N. A. and Silva, W. J.* (2008): Summary of the Abrahamson & Silva NGA groundmotion relations, *Earthquake Spectra* 24, 67–97.
- Bardet, J.P., Tobita, T.* (2001): NERA, A Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analysis of Layered Soil Deposits, User's Manual.
- Beresnev, I.A. and Kuo-Liang Wen* (1996): Nonlinear Soil Response – A Reality?, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 6, 1964-1978.
- Boore, D. M. and Atkinson, G. M.* (2008): Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s, *Earthquake Spectra* 24, 99–138.
- Campbell, K. W. and Bozorgnia, Y.* (2008): NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s, *Earthquake Spectra* 24, 139–171.
- Chiou, B. S. J. and Youngs, R. R.* (2008): Chiou-Youngs NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters, *Earthquake Spectra* 24, 173–215.
- Doroudian, M. and Vucetic, M.* (1997): Development of 3-D Geotechnical Database and Its Application to the Evaluation of Nonlinear Site Response and Seismic Zonation, *UCLA Research Report*, No. ENG-97-186, Civil and Environmental Engineering Department, University of California, Los Angeles – UCLA, CA, 347 pp.
- EduPro Civil Systems, Inc.*, Redmont, Washington: ProShake, Ground Response Analysis Program V1.1, User's Manual.
- Fajfar, P. and Lapajne, J. (eds.)* (2004): Revised PSHA for NPP Krško site: Report PSR-NEK-2.7.2 (Revision 1); prepared for Nuclear Power Plant Krško, Vrbina 12, Krško, Slovenia; by University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Institute of Structural Engineering, Earthquake Engineering and Construction IT; in cooperation with Environmental Agency of the Republic of Slovenia, Office of Seismotogy; Geological Survey of Slovenia; Geomatrix Consultants, Inc, Oakland, California, USA; and researchers from the University of Zagreb, Croatia.
- Gilbert/Commonwealth International Inc.* (1992): Deterministic Assessment of Seismic Hazard at Krško NPP Using Available Instrumental Data: Final Report to Nuklearna Elektrarna Krško, No. DC:0254.008-2, Revision 0.
- Hashash, Y.M.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D.* (2009): DEEPSOIL V3.7beta, User Manual and Tutorial.

- Herak, M.* (1985): Ovisnost parametara potresa o geotehničkim svojstvima površinskih slojeva tla, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu.
- Herak, M., Markušić, S., Ivančić, I.* (2001): Attenuation of peak horizontal and vertical acceleration in the Dinarides area, *Studia Geophysica et Geodaetica* 45, 383-394.
- Huey-Chu Huang, Chie-Song Shieh, Hung-Chie Chiu* (2001): Linear and Nonlinear Behaviors of Soft Soil Layers Using Lotung Downhole Array in Taiwan, *TAO*, Vol. 12, No. 3, 503-524.
- Idriss, I. M.* (2008): An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes, *Earthquake Spectra* 24, 217–242.
- Iwan, W. D.* (1967): On a class of models for the yielding behavior of continuous and composite systems, *Journal of Applied Mechanics, ASME*, Vol. 34, 612-617.
- Lee, V.W., Trifunac, M.D.* (1995): Frequency dependent attenuation function, and Fourier amplitude spectra of strong earthquake ground motion in California, USC Report No. CE 95-03.
- Masing, G.* (1926): Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing, *Proceedings of the Second International Congress of Applied Mechanics*, 332-335.
- Mróz, Z.* (1967): On the description of anisotropic workhardening, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol.15, 163-175.
- Next Generation Attenuation Relationships* (2008): <http://peer.berkeley.edu/nga/index.html>, (srpanj 2010.)
- Nuklearna elektrana Krško* (2008): Updated Safety Analysis Report (USAR), Rev 14
- Trifunac, M.D.* (1993): Broad band extension of Fourier Amplitude spectra of strong motion acceleration, USC Report No. CE 93-01.
- Trifunac, M.D., Brady, A.G.* (1975): A study on the duration of strong earthquake ground motion, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 65, No. 2, 581-626.
- Tsai, N.C.* (1970): A note on the steady-state response of an elastic half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America* 60, 795–808.