

**NELINEÁRNE EFEKTY V SEIZMICKOM POHYBE
POČAS ZEMETRASENÍ**

Diplomová práca

Bc. Lenka Kubišová

Univerzita Komenského v Bratislave

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

Fyzika Zeme a planét

Vedúci: doc. Mgr. Jozef Kristek, PhD.

Ev. č. : 71c965ed-542f-4118-9e6f-ce838d177234

Bratislava 2011

Pod'akovanie : Autor d'akuje svojmu vedúcemu, docentovi Jozefovi Kristekovi, profesorovi Petrovi Moczovi a doktorovi Martinovi Gálisovi za pomoc, rady a podporu.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Čestne prehlasujem, že na diplomovej práci som pracovala samostatne na základe vlastných teoretických a praktických poznatkov, konzultácií a štúdia odbornej literatúry, ktorej úplný prehľad je uvedený v zozname použitej literatúry.

5.5. 2011 Bratislava

Bc. Lenka Kubišová

ABSTRAKT

Bc. Lenka Kubišová

Nelineárne efekty v seizmickom pohybe počas zemetrasení

Univerzita Komenského v Bratislave

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

Vedúci: doc. Mgr. Jozef Kristek, PhD.

Bratislava 2011

51 strán

Kmitavý pohyb zemského povrchu je v niektorých lokalitách značne ovplyvnený lokálnou geologickou štruktúrou. Rozhrania vrstiev rôznych materiálov, tvar rozhraní ako aj ich mocnosť sú často zodpovedné za vznik anomálneho seizmického pohybu. Tieto anomálie môžu spôsobiť rôzne neočakávané prejavy seizmického pohybu - lokálne efekty. Lokálny efekt je anomália prejavujúca sa na niektorej z charakteristík seizmického pohybu. Ak je charakter lokálneho efektu výrazne iný pre slabé a silné

seizmické pohyby hovoríme o nelineárnych efektoch. Za tie sú väčšinou zodpovedné materiály sedimentov, ktoré vykazujú hysterézne správanie pri aplikácii časovo závislého napätia. Na popis hysterézneho správania sa používajú reologické elasto-plastické modely. Najjednoduchším elasto-plastickým modelom je Iwanov model.

V úvode práce sa venujeme popisu pozorovaných nelineárnych lokálnych efektov. V ďalšej časti sa venujeme reologickému popisu hysterézneho modelu a jeho častí a definujeme si ciele práce. Vo výsledkovej časti popisujeme odvodený algoritmus závislosti napätia od deformácie pre Iwanov reologický model. Ďalej popisujeme, akým spôsobom určujeme parametre Iwanovho modelu zo známych charakteristík nelineárnych vlastností materiálov. Nakoniec na sérii výpočtov ilustrujeme nelineárne správanie vrstvy na polpriestore vypočítané upraveným programom pre výpočet seizmického pohybu v 1D elastoplastických prostrediach.

Kľúčové slová : lokálne efekty, nelineárne javy, hysterézna krivka, Iwanov model.

ABSTRACT

Bc. Lenka Kubišová

Nonlinear effects in seismic ground motion during earthquakes

Comenius University Bratislava

Faculty of Mathematics, Physics and Informatics

Department of Astronomy, Physics of the Earth, and Meteorology

Supervisor : doc. Mgr. Jozef Kristek, PhD.

Bratislava 2011

51 pages

Oscillatory Earth ground motion is in some locations significantly influenced by the local geological structure. Interfaces of layers of different materials, the shape of the interfaces as well as their thickness are in most cases the responsible for the anomalous seismic motion. The local effect is an anomaly of some of the characteristics of seismic motion. If there is a significant difference in the character of local effect in case of weak and strong ground motion then we speak about nonlinear effects. The sediments with the hysteretic response to time-dependent stress are the main responsible for the

nonlinear effects. For the description of hysteresis relationship we use rheological elasto-plastic models. The Iwan model is the simplest elasto-plastic model.

In the first part of this thesis we will describe some of observed non-linear local effects. The next section deals with rheological description of hysteresis model and we define objectives of thesis. In the results section we describe derived algorithm estimation of stress for a given strain for Iwan rheological model. Then we describe calculation of parameters of Iwan model from know characteristics of non-linear behavior of materials. Endless we illustrated on series of calculations non-linear behavior of layer on half space. For this calculation we used adapted program for calculating of seismic movement in 1D elasto-plastic mediums.

Key words: local effects, non-linear phenomenon, hysteresis loop, Iwan model.

PREDHOVOR

Zemetrasenia sú najenergetickejšie prírodné katastrofy spôsobujúce škody. Vznikajú zväčša na kontaktoch litosférických platní, ktoré sa voči sebe neustále pohybujú. Trenie na ich vzájomnom kontakte bráni ich pohybu čo spôsobuje kumuláciu napätia. Prekročeniu medzného napätia zabráni vznik trhliny. Vzniknutá trhlina sa šíri po zlome. Súčasne sa od zlomu šíri energia vo forme seizmických vln. Na zlome a v jeho blízkosti dochádza k nevratnému posunutiu. Ak seizmické vlny dosiahnu voľný povrch, spôsobia jeho kmitavý pohyb, ktorý pozorujeme ako zemetrasenie. Keď zemetrasenie zasiahne obývanú oblasť môže ohroziť ľudské životy a spôsobiť škody na majetku. Účinky zemetrasenia závisia od charakteristík seizmického zdroja, vzdialenosti od hypocentra, ale nezanedbateľný vplyv má aj lokálna geologická štruktúra. Tá sa prejavuje tzv. lokálnymi efektmi, čiže anomálne zmenenými charakteristikami seizmického pohybu. Pri silnejších zemetraseniach v určitých oblastiach sa prejavujú nelineárne lokálne efekty, spôsobené nelineárnymi reologickými vlastnosťami hornín. Štúdium nelineárnych efektov je preto dôležitou súčasťou predikcie seizmického pohybu na záujmových lokalitách.

Nelineárnu reológiu môžeme charakterizovať hysteréznou krivkou popisujúcou závislosť deformácie a napätia. Najjednoduchším reologickým modelom s hysteréznym správaním je Iwanov reologický model,

V tejto práci sa venujeme fyzikálnemu popisu Iwanovho modelu a jeho zahrnutiu do výpočtového programu na simuláciu šírenia seizmických vln v 1D prostrediach.

Obsah

1. Úvod	11
2. Lokálne efekty	12
3. Pohybová rovnica	15
4. Reologické modely	16
4.1. Hookeove teleso	16
4.2. Saint – Venantove teleso	18
4.3. Sériové zapojenie Hookeovho a Saint – Venantovho telesa	19
4.4. Paralelné zapojenie Hookeovho a Saint – Venantovho telesa	20
4.5. Iwanov model	21
4.5.1. Závislosť deformácie od napätia	23
4.6. Iné modely hysterézneho správania	26
5. Ciele	29
6. Závislosť napätia od deformácie pre Iwanov model	33
7. Hysterézna krivka Iwanovho modelu	33
8. Výpočet parametrov pre Iwanov model	35
9. Implementácia Iwanovho modelu do programu na výpočet šírenia seizmických vln v 1D prostrediach	36
10. Vrstva na polpriestore	37
11. Výsledky simulácií	38
12. Záver	48

Zoznam použitej literatúry

49

Prílohy

1. ÚVOD

Na Zemi dochádza k neustálym otrasom, od najmenších otrasov na hranici merateľnosti až po veľké zemetrasenia spôsobujúce nesmierne škody. Zemetrasenia zodpovedné za najväčšie škody sú tektonického pôvodu. Okrem tektoniky Zeme môžu byť príčinou vzniku zemetrasenia aj rôzne druhy výbuchov ako aj banská činnosť. Tektonické zemetrasenie je spôsobené pohybom litosferických dosiek. Môžeme ich rozdeliť podľa hĺbok, v ktorých vznikajú na hlboké: 300 – 700 km, stredne hlboké 70 – 300 km a plytké do 70 km. Hlboké a stredne hlboké zemetrasenia vznikajú v subdukčných zónach. Plytké zemetrasenia súvisia s pohybmi vo vrchnej litosfére. Rozoznávame tieto litosferické platne : Euroázijská, Filipínska, Austrálska, Antrarktická, Tichooceánska Severoamerická, Cocos, Juan de Fuca, Nazca, Juhoamerická, Arabská, Africká, Scotia a Indická. Väčšina tektonických zemetrasení vzniká na oslabených zónach oddeľujúcich dva horninové bloky nazývaných aj zlomy. Vzhľadom na rozmery litosferických platin (≈10000 km) a plochu ich kontaktu (niekoľko km) môžeme ako zlom charakterizovať iba tenkú myslenú plochu. Pre zjednodušenie môžeme uvažovať len zlomovú plochu, na ktorej sa vplyvom pohybu litosferických dosiek a trenia na ich kontakte kumuluje napätie a deformácia, čo môže trvať stovky až tisícky rokov. Ak má nahromadená deformácia a napätie prekročiť medzu pevnosti zabráni tomu vznik trhliny. Trhlina sa potom šíri po zlomovej ploche. Ide o nevratné posunutie, pri ktorom sa vyžiari energia vo forme seizmických vln a dochádza k čiastočnému alebo úplnému uvoľneniu nahromadenej energie na zlome. Vo forme seizmických vln sa uvoľní asi 30% celkovej energie uvoľnenej pri zemetrasení. Seizmické vlny sú elastické vlny šíriace sa celým telesom Zeme a ak dosiahnu povrch spôsobujú jeho kmitavý pohyb, ktorý pozorujeme ako zemetrasenie. Analyzovanie seizmických vln má význam pre pochopenie procesov vzniku a šírenia trhliny na zlome, efektov zemetrasení ako aj na poznanie štruktúry Zeme. Kmitavý pohyb na povrchu je určený zdrojom, vlastnosťami prostredia medzi zlomom a pozorovaným miestom na povrchu Zeme a, často dominantne, vlastnosťami štruktúry v blízkom okolí pozorovanej oblasti tzv. lokálnou geologickou štruktúrou. Značný vplyv lokálnej štruktúry podložia môže spôsobiť anomálne škody v záujmovej oblasti, čo potvrdzujú niektoré ničivé zemetrasenia napr. Taliansko 1976 (Friuli),

Mexiko 1985, Arménsko 1988, USA 1989 (Loma Prieta), Irán 1990, Filipíny 1990, USA 1994 (Northridge), Japonsko 1995 (Hyogo – Nanbu), Japonsko 2003, 2005 (Miyagi – Oki), Taliansko 2009 (L'Aquila).

2. LOKÁLNE EFEKTY

Lokálne efekty môžeme chápať ako anomáliu v šírení alebo účinkoch seizmických vln na zemské teleso. Charakteristiky používané pre seizmický pohyb a jeho lepšiu analýzu môžeme rozdeliť na charakteristiky vo frekvenčnej oblasti, v časovej oblasti a spektrá odozvy. Vo frekvenčnej (spektrálnej) oblasti sú používané charakteristiky fázového a amplitúdového Fourierovho spektra posunutia, rýchlosti a zrýchlenia. V časovej oblasti sú používané maximálne (špičkové) posunutie, rýchlosť a zrýchlenie, stredné kvadratické zrýchlenie, maximálne diferenciálne zrýchlenie, kumulatívna absolútna rýchlosť, Ariasova intenzita a trvanie silných pohybov. Javom indikujúcim prítomnosť nelineárnych lokálnych efektov je posun hodnoty rezonančnej frekvencie do nižších frekvencií a zoslabenie pohybu podložia.

Japonské zemetrasenie v Hyogo- Nanbu malo magnitúdo 6,9, čiže išlo o stredne veľké zemetrasenie. Škody boli veľké a neadekvátne, prihliadnuc na dovtedy dostupné informácie. Najviac bol postihnutý tzv. pás škôd na sedimentárnom bazéne v husto obývanej oblasti Kobe. Najprv sa uvažovalo o hypotéze neznámeho skrytého zlomu, ktorá sa neskôr nepotvrdila. Na základe numerického modelovania šírenia seizmických vln Shinozaki a Yoshida (1995) a Kawase (1996) ukázali, že možným vysvetlením vzniku pásu škôd je fokusácia seizmickej energie v okolí hrany bazéna, (tzv. basin edge effect). Ďalšie numerické modelovania Inoue a Miyatake (1997), Kawase et al. (1997) a Pitarka et al. (1998) potvrdili, že efekt hrany bazénu v kombinácii s polohou zdroja a smeru šírenia seizmických vln spôsobil zosilnenie seizmického pohybu v úzkej zóne vzdialenej približne 1 km od hrany bazénu.

Yang et al. (2000) študovali nelineárne lokálne efekty počas zemetrasenia v Kobe (1995). Osobitnú pozornosť venovali skvapalňovaniu vrstiev počas zemetrasenia. Použitím spektrálnej analýzy pozorovali nelineárne javy počas zemetrasenia v plytkej skvapalnenej vrstve.

Dimitriu et al. (2000) sa venovali záznamom 23 zemetrasení (M_L 4,9 – 7,0) zo staníc v Taiwane a ich H/V spektrálnym hodnotám. Výsledky implikovali, že HVRS technika je citlivá na pohyby podložia a môže byť použitá na určenie a štúdium nelineárnych lokálnych efektov.

Luca et al. (2005) skúmali záznamy zo stredne veľkých zemetrasení (M_L 4,0 – 5,9). Pozorovali lokálne efekty v meste L'Aquila (stredné Taliansko). Analýza ukázala, že pozorované lokálne efekty súvisia so sedimentárnym bazénom vyplneným jazernými sedimentmi s maximálnou hĺbkou okolo 250 km.

Tsuda et al. (2006) študovali nelineárne lokálne efekty na zemetraseniach Miyagi – Oki (2003 – Mw 7,0 a 2005 Mw – 7,2). Pozorovali lokálne efekty dvoch veľkých zemetrasení, ktoré mali všeobecne slabú odozvu na pohyb a rezonančná frekvencia bola posunutá do nižších frekvenčných hodnôt. Porovnali výsledky pozorovaní oboch zemetrasení, ktoré indikovali nárast hodnoty nižších frekvencií a pokles hodnoty na vysokých frekvenciách. 1D simulácie šírenia seizmických vln pre nelineárne správanie podložia dosiahli lepšiu zhodu s pozorovanými záznamami ako simulácia lineárnej odozvy.

Tsuda a Steidl (2006) sa venovali popisu nelineárnych lokálnych efektov pri zemetraseniach Miyagi – Oki (2003 a 2005). Hodnota odozvy a posunutie rezonančnej frekvencie do nižších frekvencií sú konzistentné s nelineárnou lokálnou odozvou, keď PGA je väčšie ako 0,2 g. Tento efekt s veľkosťou prichádzajúceho kmitavého pohybu narastá.

Iwata et al. (2008) analyzovali silný pohyb podložia zaznamenaný v Anamizu po zemetrasení Noto – Hanto (2007) s magnitúdom 6,9. Porovnávali H/V spektrálne hodnoty záznamov hlavného otrasu, záznamy pred zemetrasením a dotrasy. Pozorovali nelineárnu lokálnu odozvu podložia počas hlavného otrasu.

Zemetrasenie v L'Aquila v Taliansku malo podobne ako japonské zemetrasenie veľkosť zodpovedajúcu stredne veľkému zemetraseniu (magnitúdo = 6,3), ale škody boli neočakávane veľké. Nunziata, Vaccari a Panza (2010) študovali zmeny spektrálnej odozvy s dynamickými vlastnosťami pôdy v závislosti napätia, ako dôkazy nelineárnych efektov pôsobiacich na pohyb podložia pri zemetrasení v L'Aquilla.

Park a Hashash (2004) sa venovali štúdiu nelineárnych lokálnych efektov v Mississippi Embayment v centrálnom území Spojených Štátov Amerických, kde sa nachádzajú usadeniny do hĺbky 1 km. Použili dva šmykové rýchlostné profily (vrchovina a nížina) a dva súbory dynamických vlastností (ME a EPRI) na vypočítanie vlastností podložia. Povrch UHRS bol použitý na určení lokálnych koeficientov, ktoré ukázali veľkú závislosť Mississippi Embayment na mocnosti usadenín Paleozoického podložia a impedancie hranice. Výsledky koeficientov pre mocnosti 30 m sú dobre porovnateľné s NEHRP lokálnymi koeficientmi. Pre hlboké pôdne profily s ME boli navrhnuté menšie lokálne koeficienty na krátkych periódach a väčšie na dlhých periódach ako NEHRP koeficienty(1997).

Bonilla et al. (2006) sa venovali lineárnemu a nelineárnemu šíreniu vln v oblasti Grenoble do 10 Hz. Numerické simulácie ukázali veľký kontrast impedancie medzi sedimentmi a okolitým podložíom spôsobujúci značné zosilnenie pohybov pozorovaných v bazéne. Ukázalo sa, že nelineárne efekty sú dôležité pre vstupujúce zrýchlenie a spôsobujú veľké zoslabenie pohybu podložia. Zatiaľ čo pri frekvenciách 1 – 5 Hz bolo zoslabenie evidentné, pri vyšších frekvenciách už rozdiel nebol smerodajný. Dospeli k záveru, že pre vyššie frekvencie nedávajú štúdie 1D presvedčivé výsledky.

Wen et al. (2006) sa venovali určovanie lokálnych efektov zo spektrálnej hodnoty H/V. Ukázali, že nelineárne lokálne efekty môžu byť vyhodnotené použitím H/V spektrálnych čísel povrchových záznamov na stanicích.

Ehret et al. (2007) sa vo svojej práci venovali popísaniu lokálnych nelineárnych javov v okolí Bukurešti, Rumunsko, ktoré patrí medzi najrizikovejšie oblasti v Európe z pohľadu seizmického ohrozenia. Vytvorili geologický a hydrogeologický 3D model podložia mesta a použitím umelo vytvoreného signálu dostali odozvu podložia a následne vytvorili mapu mikrozonácií pre Bukurešť.

3. POHYBOVÁ ROVNICA

Uvažujeme izotropné a dokonale elastické prostredie. λ a μ sú Lamého koeficienty, ktoré sú spojitými a nezávislými funkciami priestorových súradníc (x,y,z) . Potom pohybovú rovnicu môžeme napísať v tvare

$$\rho u_{i,tt} = \tau_{ij,j} + f_i, \quad (1)$$

kde ρ je hustota prostredia, u_i je i - tá zložka vektoru posunutia, f je sila na jednotku objemu a τ_{ij} je tenzor napätia. $u_{i,tt}$ označuje druhú parciálnu deriváciu zložky vektoru posunutia podľa času a $\tau_{ij,j}$ parciálnu deriváciu zložky tenzoru napätia podľa priestorových súradníc. Vzťah medzi tenzorom napätia a deformáciou môžeme vyjadriť konštitučným zákonom pre izotropné kontinuum (Hookeov zákon) ako

$$\tau_{ij} = \lambda \delta_{ij} e_{kk} + 2\mu e_{ij}. \quad (2)$$

Na rozhraniach dvoch prostredí uvažujeme okrajové podmienky: spojitosť vektoru napätia a spojitosť vektoru posunutia. Kvôli jednoduchosti sa obmedzíme len na 1D prostredie, teda na prostredie, v ktorom sa materiálové parametre menia len v smere jednej súradnice, napr. v smere x . Potom môžeme pohybovú rovnicu napísať v tvare

$$\rho u_{,tt} = \tau_{,j} + f \quad (3)$$

a konštitučný vzťah v tvare

$$\tau = [\lambda(x) + 2\mu(x)]d_{,x}. \quad (4)$$

Ak uvažujeme nelineárne správanie sa materiálu, musíme uvažovať nelineárny vzťah medzi napätím a deformáciou.

4. REOLOGICKÉ MODELY

Reologické modely popisujú vlastnosti materiálov pomocou závislosti medzi napätím a deformáciou. Reologický model môže byť zostavený z jednoduchších elementárnych reologických modelov akými sú napr. Hookeove a Stokesove teleso, v paralelných, sériových alebo zložitejších schémach zapojenia.

Elastický materiál je taký materiál, ktorý po odstránení vonkajšieho silového pôsobenia nadobudne svoj pôvodný tvar. Ako príklad modelu popisujúceho elastické vlastnosti je Hookeove teleso.

Plastická látka je látka, pri ktorej dochádza k tečeniu, tzn. k pohybu, pri ktorom je rýchlosť deformácie nenulová až po prekročení medze pevnosti. Saint-Venantove teleso môžeme uviesť ako príklad modelu popisujúceho plastické vlastnosti.

Elastoplastická látka je látkou s kombináciou elastických a plastických vlastností. Príkladom modelu popisujúceho elastoplastické teleso je paralelné alebo sériové zapojenie telesa s elastickými vlastnosťami a telesa s plastickými vlastnosťami.

4.1. HOOKEOVE TELESO

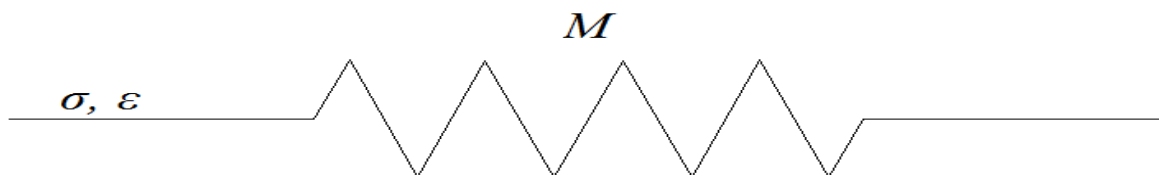
Hookeovým telesom (HB) popisujeme elastické vlastnosti. Môžeme si ho predstaviť ako pružinku, na ktorú aplikujeme napätie (Obr. 1). Pružinka sa okamžite deformuje. Odstránením napätia z pružinky sa odstráni aj nakumulovaná deformácia, pričom závislosť deformácie a napätia môžeme vyjadriť vzťahom

$$\sigma(t) = M\varepsilon(t), \quad (5)$$

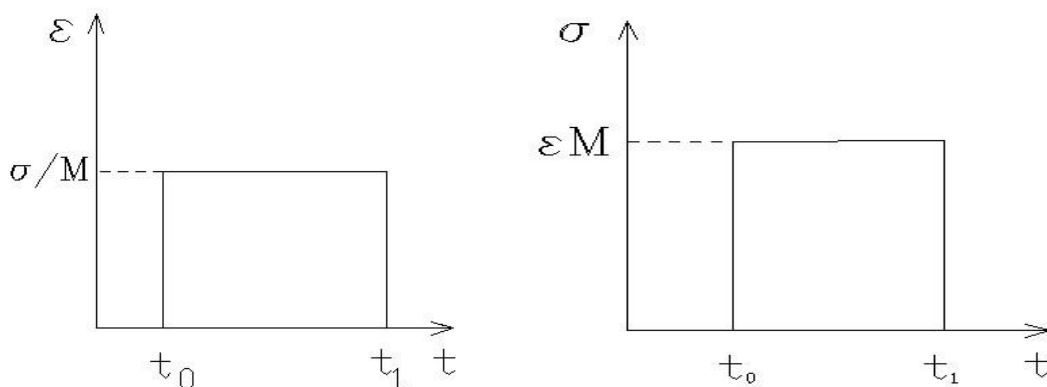
kde napätie σ a deformácia ε sú funkciami času a M je modul pružnosti nezávislý na čase. Správanie HB pre konštantné napätie aplikované v čase t_0 a odstránené v čase t_1 je ilustrované na Obr. 2. Na Obr. 3. je zobrazená závislosť deformácie Hookeovho

telesa od napätia. Aplikovaním Fourierovej transformácie na (5) dostávame závislosť deformácie a napätia vo frekvenčnej oblasti

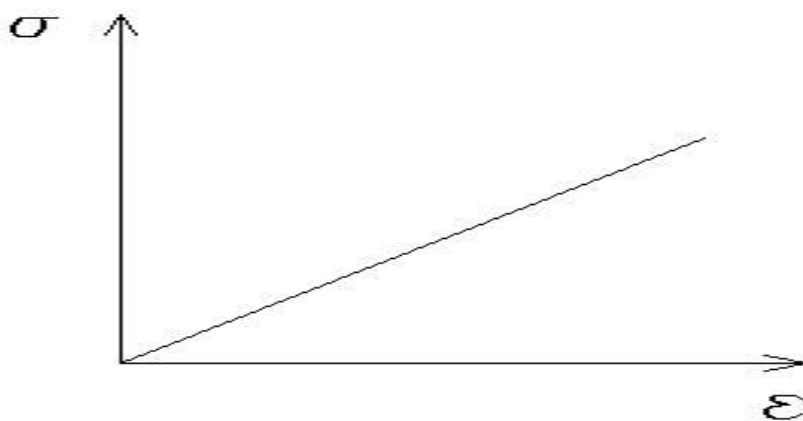
$$\sigma(\omega) = M \varepsilon(\omega). \quad (6)$$



Obr. 1. Hookeove teleso



Obr. 2. Vľavo: Graf závislosti deformácie od času. Vpravo: Graf závislosti napätia od času .



Obr. 3.: Graf závislosti napätia od deformácie.

4.2. SAINT –VENANTOVE TELESO

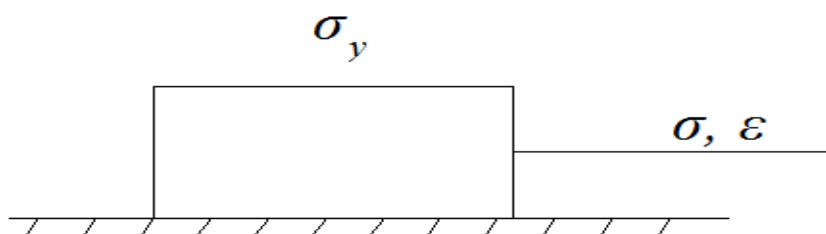
Saint – Venantovým telesom (StV) popisujeme vlastnosti ideálne plastického telesa. Môžeme ho ilustrovať ako kváder na podložke (Obr. 4.). Pri aplikácii napätia sa deformácia neprejaví, pokiaľ napätie nepresiahne hodnotu medzného napätia σ_y (obr. 5.). Po dosiahnutí medzného napätia v čase t_0 sa začne zvyšovať deformácia daná posunom kvádra po podložke oproti pôvodnej pozícii, pričom pri konštantnom napätí závisí veľkosť deformácie len od doby pôsobenia napätia. Po odstránení napätia v čase t_1 si teleso ponechá deformáciu, ktorá bola nakumulovaná dokiaľ sa neodstránilo napätie. Veľkosť napätia je určená vzťahom

$$\sigma(t) = \sigma_y H(t - t_0), \quad (7)$$

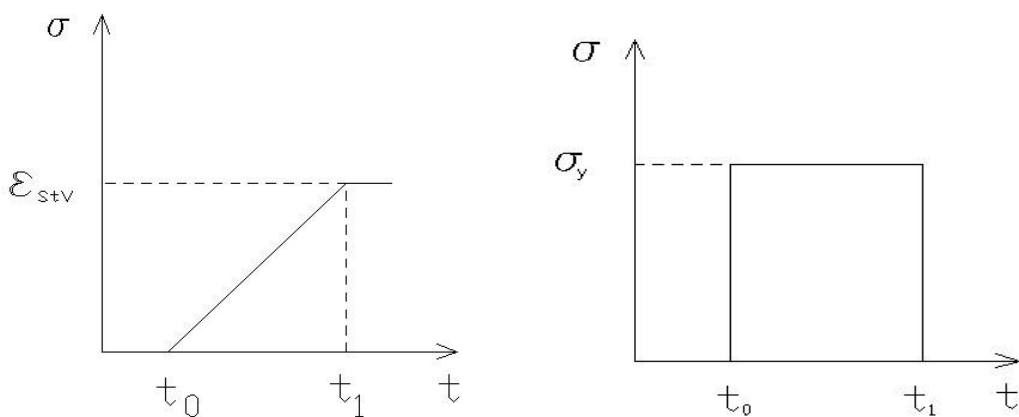
kde t_0 je čas, kedy dosiahne napätie hodnotu medzného napätia a $H(t)$ je Heavisideova jednotková funkcia. Na Obr. 6. je znázornená závislosť deformácie od napätia. Po aplikácii Fourierovej transformácie na (7) dostávame

$$\sigma(\omega) = \sigma_y \delta(\omega) \exp(-i\omega t_0) \quad (8)$$

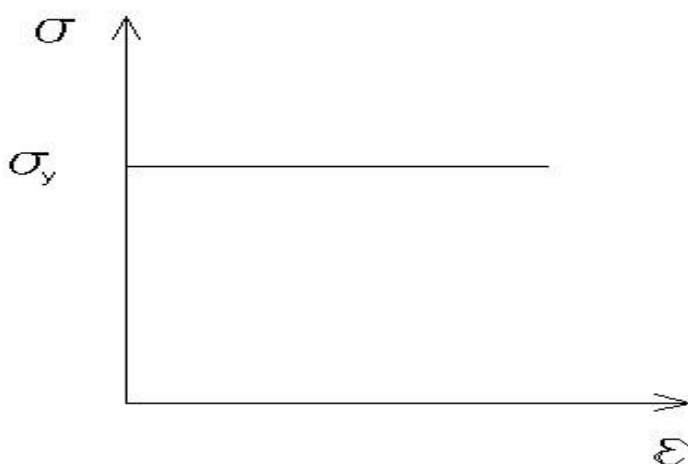
kde $\delta(\omega)$ je Kronekerov symbol.



Obr. 4. : Saint – Venantove teleso



Obr. 5.: Vľavo : Graf závislosti napätia od času. Vpravo: Graf deformácie od času.



Obr. 6. : Graf závislosti napätia od deformácie.

4.3. SÉRIOVÉ ZAPOJENIE HOOKEOVHO A SAINT – VENANTOVHO TELESA

Sériovým zapojením Hookeovho a Saint–Venantovho telesa (HB-s-StV) popisujeme elastoplastické vlastnosti (obr. 7.). Ak aplikujeme na model napätie okamžite sa začne deformovať HB. Keď napätie dosiahne medzné napätie σ_y začína sa deformovať aj StV. Ak prestaneme s nárastom napätia deformácia zapojenia sa bude zväčšovať, keďže deformácia na StV po prekročení medzného napätia závisí od doby pôsobenia napätia.

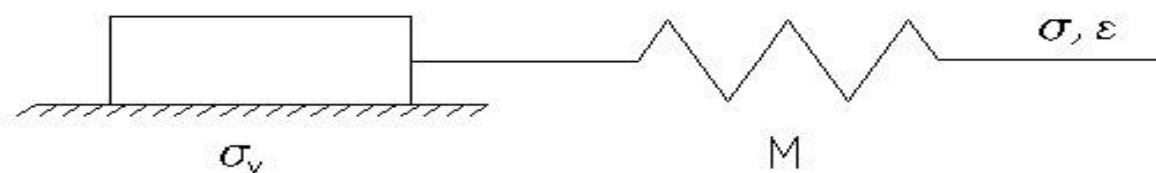
So znižovaním napätia sa bude znižovať aj deformácia. Kým neklesne napätie o hodnotu $2\sigma_y$, za zmenu deformácie zodpovedá len HB. Keď napätie poklesne o hodnotu $2\sigma_y$ začína sa meniť aj deformácia na StV. Vzťah medzi napätím a deformáciou môžeme vyjadriť v tvare

$$\sigma(t) = \begin{cases} M\varepsilon(t) & ; & t \leq t_0 \\ \sigma_y & ; & t > t_0 \end{cases}, \quad (9)$$

alebo

$$\sigma(t) = M\varepsilon(t)H(t_0 - t) + \sigma_y H(t - t_0), \quad (10)$$

kde prvá časť rovnice odpovedá popisu HB a druhá StV.



Obr. 7. : Sériové zapojenie Hookeovho a Saint- Venantovho telesa

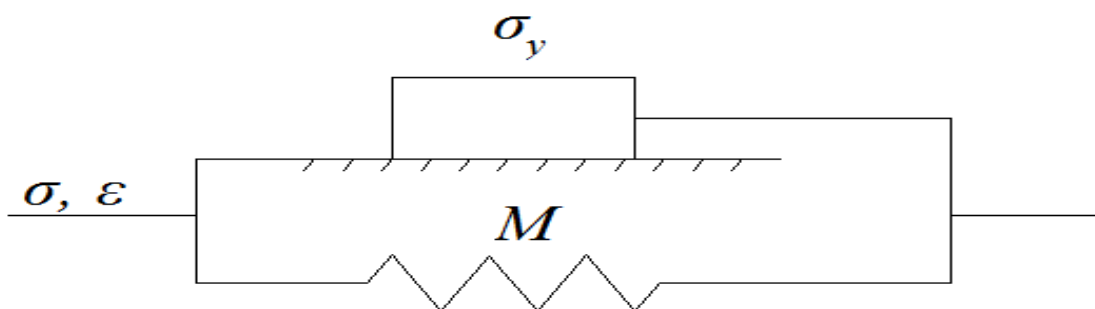
4.4. PARALELNÉ ZAPOJENIE HOOKEOVHO A SAINT –VENANTOVHO TELESA

Iným elastoplastickým modelom je paralelné zapojenie Hookeovho a Saint – Venantovho telesa (HB-p-StV) (Obr. 8.). Na model pôsobíme napätím. Pokiaľ jeho hodnota nepresiahne medzné napätie σ_y , model zostáva bez zmeny. Po prekročení medzného napätia sa model začne deformovať, pričom deformácia je určená len HB a môžeme ju zapísať v tvare

$$\varepsilon(t) = \frac{H(\sigma(t) - \sigma_y)}{M}. \quad (11)$$

Keď začneme znižovať napätie deformácia si ponechá hodnotu, ktorú dosiahla pri najvyššom aplikovanom napätí, pokiaľ neklesne o hodnotu $2\sigma_y$. Po poklese napätia o $2\sigma_y$ sa bude znižovať deformácia pokiaľ budeme znižovať napätie a môžeme ho vyjadriť vzťahom

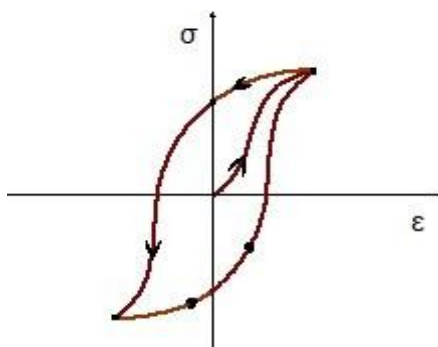
$$\sigma(t) = M\varepsilon(t) + \sigma_y. \quad (12)$$



Obr. 8. : Paralelné zapojenie Hookeovho a Saint- Venantovho telesa

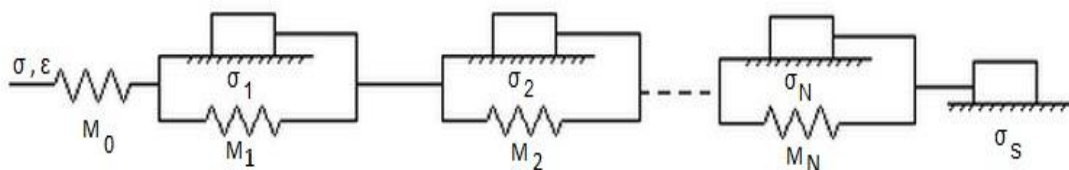
4.5. IWANOV MODEL

Hysterézne správanie (Obr. 9.) je dobrou aproximáciou nelineárneho správania materiálu pri cyklickom zaťažovaní. Určuje závislosť stavu fyzikálnej sústavy od predchádzajúcich stavov. Pre tento prípad uvažujeme zmeny deformácie alebo napätia.



Obr. 9. : Hysterézna krivka

Iwanov model popisuje hysterézne správanie deformácie vzhľadom na aplikované napätie. Model je sériovým zapojením samostatného Hookeovho telesa, n paralelných zapojení Hookeovho a Saint–Venantovho telesa a samostatného Saint–Venantovho telesa (HB-s-(n_s -HB-p-StV)-s-StV) (Obr. 10.). Hookeove telesá sú charakterizované modulmi pružnosti M_0 pre samostatne zapojené a M_i , $i=1,2,3,\dots, n$ pre Hookeove telesá v paralelnom zapojení. Saint-Venantove telesá charakterizujeme medznými napätiami σ_s pre samostatne zapojené a σ_i pre telesá v paralelnom zapojení. Medzné napätia spĺňajú podmienky $\sigma_i < \sigma_{i+1}$, $i=1,2,3,\dots, n-1$ a $\sigma_n < \sigma_s$. Pre samostatne zapojené Saint- Venantove teleso po prekročení medzného napätia uvažujeme konštantnú rýchlosť deformácie c .



Obr. 10.: Iwanov model

Iwanov model dáva možnosť popisovať jav lineárne v prípade malých deformácií alebo napätí. V našom prípade k celkovej deformácii prispieva len Hookeovo teleso. Linearita javu je ohraničená najmenšou hodnotou medzného napätia. Po prekročení danej hodnoty už nemôžeme hovoriť o lineárnom správaní, lebo sa k deformácii na Hookeovom telese pripočítava aj hodnota deformácie na paralelnom zapojení. Paralelné zapojenia sa s nárastom napätia, prekročením medzného napätia, zapájajú a zvyšujú tak nárast hodnoty deformácie. Po prekročení nami určeného najvyššieho medzného napätia na samostatnom sériovo zapojenom Saint – Venantovom telese už nemusíme zvyšovať napätie, keďže ďalej závisí hodnota deformácie na Saint – Venantovi len od času pôsobenia napätia.

Keď začneme klesať s napätím zapojenia obsahujúce Saint – Venantovo teleso si ponechávajú nakumulovanú deformáciu. Klesá len deformácia na Hookeovom telese, a to opäť lineárne s poklesom napätia. Tento pokles trvá dokiaľ neklesne hodnota napätia o dvojnásobnú hodnotu najmenšieho medzného napätia v zapojení. Potom začína pokles deformácie aj na danom paralelnom zapojení. S nárastom poklesu napätia sa podobne zapájajú aj zvyšné paralelné zapojenia. Pri poklese napätia o dvojnásobnú

hodnotu medzného napätia na samostatne zapojenom Saint – Venantovom telese, začína klesať deformácia aj na poslednom telese v zapojení. Pokles deformácie si ďalej už nevyžaduje pokles napätia, pretože zmena deformácie na Saint – Venantovom telese závisí len od doby pôsobenia napätia. Začneme opäť zvyšovať napätie. Hookeovo teleso okamžite reaguje zmenou deformácie. Pokiaľ zmena napätia nepresiahne dvojnásobok najmenšej hodnoty medzného napätia zmena závisí len na Hookeovom telese a je lineárna. Po prekročení tejto hodnoty sa začne zapájať prvé paralelné zapojenie a cyklus sa opakuje. Možnosť cyklického namáhania modelu ako aj ľubovoľná hodnota orientácie napätia sú dobré predpoklady pre model nelineárneho správania sa podložia pri šírení seizmických vln.

4.5.1. ZÁVISLOSŤ DEFORMÁCIE OD NAPÄTIA

Pri popise závislosti deformácie od napätia budeme uvažovať rôzne časové intervaly $T_1 - T_6$ pri náraste a poklese aplikovaného napätia na model.

Na začiatku sú napätie aj deformácia dané počiatočnými podmienkami $\varepsilon = 0$, $\sigma = 0$.

T_1 : Ak $\sigma(t) < \sigma_S$ začína sa postupne s nárastom napätia deformovať najprv samostatne zapojené Hookeove teleso, a potom aj sériovo zapojené paralelné zapojenia Hookeovho a Saint-Venantovho telesa. V tomto okamihu napätie zodpovedá súčtu deformácií Hookeovho telesa a paralelných zapojení (HB - p - StV)

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{M_o} + \sum_{i=1}^j \frac{\sigma(t) - \sigma_i}{M_i}, \quad (13)$$

kde j je určené podmienkou $\sigma(t) > \sigma_j$ a súčasne $\sigma(t) \leq \sigma_{j+1}$.

T_2 : Ak $\sigma(t) \geq \sigma_S$ začína sa deformovať aj samostatne zapojený StV. Deformácia samostatného StV s časom lineárne rastie

$$\varepsilon_+(t) = c.t. \quad (14)$$

Potom deformáciu Iwanovho modelu môžeme vyjadriť v tvare

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{M_o} + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma(t) - \sigma_i}{M_i} + \varepsilon_+(t). \quad (15)$$

T_3 : Začneme znižovať napätie od σ_{\max} , ktoré predstavuje maximálnu hodnotu napätia, ktorá bola aplikovaná na model. ε_{\max} predstavuje celkovú hodnotu deformácie na celom telese v okamihu keď napätie dosiahne hodnotu σ_{\max} .

$$\text{Nech } \varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{M_o} + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{\max} - \sigma_i}{M_i} + \varepsilon_+^{\max}.$$

$$\text{Nech } \Delta\sigma^-(t) = \sigma_{\max} - \sigma(t).$$

Ak $\Delta\sigma^-(t) < 2\sigma_s$: Keď napätie klesne pod $2\sigma_n$ začne klesať deformácia aj na paralelných zapojeniach Hookeovho a Saint-Venantovho telesa, dovtedy klesá len na samostatne zapojenom Hookeovom telese. Deformácia je daná vzťahom

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{M_o} + \sum_{i=1}^{n-j} \frac{\sigma_{\max} - \sigma_i}{M_i} + \sum_{i=1}^j \frac{\sigma(t) + \sigma_i}{M_i} + \varepsilon_+^{\max}, \quad (16)$$

alebo

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\max} - \frac{\Delta\sigma^-(t)}{M_o} - \sum_{i=1}^j \frac{\Delta\sigma^-(t) - 2\sigma_i}{M_i}, \quad (17)$$

kde j je určené podmienkou $\sigma_{\max} - \sigma(t) > 2\sigma_j$ a súčasne $\sigma_{\max} - \sigma(t) \leq 2\sigma_{j+1}$.

T_4 : $\Delta\sigma^-(t) \geq 2\sigma_s$. Začína sa znižovať aj deformácia na sériovo zapojenom Saint-Venantovom telese. Pokles deformácie opäť závisí pri konštantnom napätí len od doby pôsobenia napätia a klesá s lineárnou závislosťou

$$\varepsilon_-(t) = c.t. \quad (18)$$

Potom celkovú deformáciu vyjadríme vzťahom

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{M_o} + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma(t) + \sigma_i}{M_i} + \varepsilon_+^{\max} - \varepsilon_-(t), \quad (19)$$

alebo

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\max} - \frac{\Delta\sigma^-(t)}{M_o} - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma^-(t) - 2\sigma_i}{M_i} - \varepsilon_-(t). \quad (20)$$

T_5 : Začneme zväčšovať napätie od σ_{\min} . Nech ε_+^{\min} predstavuje hodnotu deformácie na samostatne zapojenom Saint-Venantovom telese v okamihu keď napätie dosiahne hodnotu σ_{\min}

$$\varepsilon_+^{\min} = \varepsilon_+^{\max} - \varepsilon_-(T_5). \quad (21)$$

$$\text{Nech } \varepsilon_{\min} = \frac{\sigma_{\min}}{M_o} + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{\min} + \sigma_i}{M_i} + \varepsilon_+^{\min}.$$

$$\text{Nech } \Delta\sigma^+(t) = \sigma(t) - \sigma_{\min}.$$

Ak $\Delta\sigma^+(t) < 2\sigma_S$ začínajú sa postupne s nárastom napätia deformovať sériovo zapojené paralelné zapojenia Hookeovho a Saint-Venantovho telesa. V tomto okamihu napätie zodpovedá súčtu deformácií Hookeovho telesa a paralelných zapojení:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{M_o} + \sum_{i=1}^{n-j} \frac{\sigma_{\min} + \sigma_i}{M_i} + \sum_{i=1}^j \frac{\sigma(t) - \sigma_i}{M_i} + \varepsilon_+^{\min}, \quad (22)$$

alebo

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\min} + \frac{\Delta\sigma^+(t)}{M_o} + \sum_j \frac{\Delta\sigma^+(t) - 2\sigma_i}{M_i}, \quad (23)$$

kde j je dané podmienkou $\Delta\sigma^+(t) > 2\sigma_j$ a súčasne $\Delta\sigma^+(t) \leq 2\sigma_{j+1}$.

T_6 : Ak $\sigma(t) \geq 2\sigma_S$ začína sa deformovať aj samostatne zapojený StV. Potom deformáciu môžeme vyjadriť v tvare

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\min} + \frac{\Delta\sigma^+(t)}{M_o} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma^+(t) - 2\sigma_i}{M_i} + \varepsilon_+(t). \quad (24)$$

4.6. INÉ MODELY NELINEÁRNEHO SPRÁVANIA

V tejto práci sa venujeme vyššie spomínanému Iwanovmu modelu, avšak okrem neho existujú aj iné modely nelineárneho správania, ktoré stručne popíšeme v tejto kapitole.

1. Pykeov model

Pyke (1979) navrhol model pre krivku nárastu a poklesu pre konečné hodnoty deformácie a napätia, ktorú môžeme popísať vzťahmi

$$\tau = f(\varepsilon) = \frac{G_{\max} \varepsilon}{1 + |\varepsilon|/\varepsilon_r}, \quad (25)$$

pre počiatočný nábeh krivky a

$$\tau = \tau_C + \frac{G_{\max} (\varepsilon - \varepsilon_C)}{1 + |\varepsilon - \varepsilon_C|/(C\varepsilon_r)} \quad (26)$$

pre ostatné prípady. G_{\max} je najväčší modul pružnosti a ε_r je referenčná strižná deformácia. ε_C a τ_C sú deformácia a napätie zodpovedajúce inflexnému bodu v predchádzajúcej nárastovej (alebo klesajúcej) fázy.

2. Model klesajúceho koeficientu útlmu

Wang Zhi-liang a Han Qing-yu (1981) doplnili do popisu „unloading curve“ koeficient poklesu útlmu $K(\varepsilon)$, ktorý spôsobuje, že plocha hysteréznej krivky zodpovedá experimentálnej hodnote útlmu a je určená funkciou

$$\tau(\varepsilon) = \left\{ \tau_C + K(\varepsilon_0) \left[\frac{G_{\max} (\varepsilon - \varepsilon_C)}{1 + |\varepsilon - \varepsilon_C|/2\varepsilon_r'} - \frac{\pm\tau_M - \tau_C}{\pm\gamma_M - \gamma_C} (\varepsilon - \varepsilon_C) \right] \right\} + \frac{\pm\tau_M - \tau_C}{\pm\gamma_M - \gamma_C} (\varepsilon - \varepsilon_C) \quad (27)$$

pre $|\varepsilon| < \varepsilon_M$ a

$$\tau(\varepsilon) = \frac{G_{\max} \varepsilon}{1 + |\varepsilon|/\varepsilon_r} \quad (28)$$

pre $|\varepsilon| \geq \varepsilon_M$, kde

$$(\varepsilon'_r)^{-1} = \frac{2G_{\max}(\pm\varepsilon_M - \varepsilon_C)}{|\pm\varepsilon_M - \varepsilon_C|(\pm\tau_M - \tau_C)} - \frac{2}{|\pm\gamma_M - \varepsilon_C|}, \tau_0 = \left| \frac{\pm\tau_M - \tau_C}{2} \right|,$$

$$\varepsilon_0 = \left| \frac{\pm\varepsilon_M - \varepsilon_C}{2} \right| \text{ a } K(\varepsilon_0) = \frac{\pi\varepsilon_0^2 \lambda_T(\varepsilon_0)}{2\varepsilon_0(2\varepsilon'_r + \varepsilon_0) - 4\varepsilon'_r(\varepsilon'_r + \varepsilon_0) \ln(1 + \varepsilon_0/\varepsilon'_r)}.$$

(τ_M, ε_M) je bod najväčšieho napätia aj deformácie a $\lambda_T(\varepsilon_0)$ je experimentálne daná hodnota útlmu.

3. Model JEDEN a DVA nemasingových pravidiel

Zhang et al. (1997) navrhli modely JEDNA a DVA založený na nemasingových pravidlách, ktoré môžu byť použité na dynamickú analýzu priamo v mieste pozorovania. Použitím pravidiel navrhli krivku $\tau - \tau_C = n_1 G_{\max} \frac{\varepsilon - \varepsilon_C}{1 + |\varepsilon - \varepsilon_C|/(n_2 \varepsilon_r)}$ pre $n_1 > 0$ a $n_2 > 0$. Podmienky symetrie a opačného zaťažovania podložia nesmú presiahnuť konečné šmykové napätia, potom môžeme použiť parametre modelu JEDEN

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{1}{n_2} \left(1 - \frac{\tau_C}{\pm G_{\max} \varepsilon_r} \right) \\ n_2 &= \frac{\pm\varepsilon_M - \varepsilon_C}{\pm\tau_M - \tau_C} \left(G_{\max} - \frac{\tau_M}{\varepsilon_r} \right) \end{aligned} \quad (29)$$

Parametre modelu DVA môžeme použiť ak je splnený princíp symetrie a podmienky energie hysterézy spĺňajúce reálne tlmenie podložia

$$\begin{aligned} n_1 &= \frac{1}{G_{\max}} \frac{\pm\tau_M - \tau_C}{\pm\varepsilon_M - \varepsilon_C} \left(1 + \frac{|\pm\varepsilon_M - \varepsilon_C|}{n_2 \varepsilon_r} \right) \\ \lambda_T(\varepsilon_0) &= \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{n_1 G_{\max} n_2^2 \varepsilon_r^2}{\tau_0 \varepsilon_0} \left[\frac{2\varepsilon_0}{n_2 \varepsilon_r} - \ln \left(1 + \frac{2\varepsilon_0}{n_2 \varepsilon_r} \right) \right] - 2 \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

Používa sa iteračná metóda pre n_1 a n_2 a počiatočné hodnoty.

4. Model implicitne daného napätia a útlmovej ekvivalencie

Li (1993) navrhol model, ktorý berie napätie ako nezávislú premennú. Zavádza lineárnu a kvadratickú časť napätia. Funkcia napätia je implicitné vyjadrenie pre šmykovú deformáciu. Prostredníctvom definície kostry krivky a útlmovej ekvivalencie môžeme pre vzťah šmykové napätie – deformácia v nepravidelnom zaťažovaní napísať

$$\varepsilon(\tau) = \begin{cases} \frac{\tau}{G_{\max}} \left(\frac{1}{1 - |\tau|/\tau_{ult}} \right) & |\varepsilon| \geq \varepsilon_M \\ \varepsilon_C + \frac{\tau - \tau_C}{G_{\max}} \left(\frac{1}{1 - \left| \frac{\tau - \tau_C}{2} \right|/\tau_{ult}} + c \left| \frac{\tau - \tau_C}{2} \right| + d \left| \frac{\tau - \tau_C}{2} \right|^2 \right) & |\varepsilon| < \varepsilon_M \end{cases} \quad (31)$$

Kde $c=B-3A$, $d=(4A-B)/\tau_0$,

$$B = \frac{3G_{\max}\varepsilon_0}{\tau_0^2} (2 - \pi\lambda_T(\varepsilon_0)) + \frac{12\tau_{ult}^2}{\tau_0^3} \left[\frac{\tau_0}{\tau_{ult}} + \ln \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{ult}} \right) \right] \text{ a}$$

$$A = \frac{G_{\max}\varepsilon_0}{\tau_0^2} - \frac{1}{(1 - \tau_0/\tau_{ult})\tau_0}.$$

Popísané modely môžeme zhodnotiť nasledovne:

Modely 1. a 3. (JEDNA) sú jednoduché, ale neuvažujú útlm hysteréznej krivky. Modely 2., 3. (DVA) a 4. spĺňajú, že napätie nemôže byť väčšie ako maximálne napätie materiálu, tlmenie je zahrnuté v modeloch, pretože vzťah pre krivku poklesu je odlišný a nárast pri integrácii krok po kroku v časovej oblasti je komplexný, čo nám dáva rôzne tvary hysteréznych kriviek.

5. CIELE

- 1. Odvodiť závislosť napätia od deformácie pre Iwanov model.**
- 2. Vytvoriť výpočtový algoritmus a program simulujúci hysterézný vzťah medzi napätím a deformáciou v 1D prostredí.**
- 3. Doplniť do existujúceho programu na simuláciu šírenia seizmických vln v 1D prostredí hysteréznú závislosť medzi napätím a deformáciou v 1D prostredí.**
- 4. Na príkladoch ilustrovať nelineárne javy v 1D.**

6. ZÁVISLOSŤ NAPÄTIA OD DEFORMÁCIE PRE IWANOV MODEL

Vo väčšine literatúry sa uvádza pre Iwanov model závislosť deformácie od napätia. Keďže našim cieľom je implementácia Iwanovho modelu do numerického programu pre seizmický pohyb v 1D prostredí, ktorý je založený na výpočte pohybovej rovnice, v ktorej vystupuje priestorová derivácia napätia, je nutné popísať Iwanov model vzhľadom na závislosť napätia od deformácie. Túto závislosť sme odvodili z popisu závislosti deformácie od napätia popísanej v kapitole 4.5.1 a jej priebeh teraz podrobne popíšeme.

Pri popise závislosti deformácie od napätia budeme uvažovať rôzne časové intervaly $T_1 - T_6$ pri náraste a poklese deformácie modelu.

Na začiatku sú napätie aj deformácia dané počiatočnými podmienkami $\varepsilon = 0$, $\sigma = 0$.

T_1 : Ak $\varepsilon(t) < \sigma_S \sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$ začína postupne s nárastom deformácie aj nárast napätia najskôr na samostatne zapojenom Hookeovom telese, a potom aj na sériovo zapojených paralelných zapojeniach Hookeovho a Saint-Venantovho telesa. V tomto okamihu napätie je dané súčtom deformácií Hookeovho telesa a paralelných zapojení:

$$\sigma(t) = \left(\sum_{i=0}^j \frac{1}{M_i} \right)^{-1} \left(\varepsilon(t) + \sum_{i=1}^j \varepsilon_i \right), \quad (32)$$

kde $\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{M_i}$ a j je určené podmienkou $\varepsilon(t) > \sigma_j \sum_{i=0}^j \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^j \varepsilon_i$ a súčasne

$$\varepsilon(t) \leq \sigma_{j+1} \sum_{i=0}^j \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^j \varepsilon_i.$$

T_2 : Ak deformácia $\varepsilon(t) \geq \sigma_S \sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$ začína sa deformovať aj samostatne

zapojený StV. Deformácia samostatného StV s časom lineárne rastie

$$\varepsilon_+(t) = c.t. \quad (33)$$

Potom je napätie určené vzťahom

$$\sigma(t) = \left(\sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i} \right)^{-1} \left(\varepsilon(t) + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \varepsilon_+(t) \right). \quad (34)$$

T_3 : Začneme zmešovať deformáciu od ε_{\max} , ktoré predstavuje maximálnu hodnotu deformácie, ktorá bola dosiahnutá pred fázou poklesu. σ_{\max} predstavuje celkovú hodnotu napätia na telese v okamihu keď deformácia dosiahne hodnotu ε_{\max} .

$$\text{Nech } \sigma_{\max} = \left(\sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i} \right)^{-1} \left(\varepsilon_{\max} + \sum_{i=0}^n \varepsilon_i - \varepsilon_+^{\max} \right).$$

$$\text{Nech } \Delta\varepsilon^-(t) = \varepsilon_{\max} - \varepsilon(t).$$

Ak $\Delta\varepsilon^-(t) < 2 \left(\sigma_s \sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right)$, potom keď dosiahne pokles deformácie hodnotu

$$2 \left(\sigma_s \sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right), \text{ začína klesať napätie aj na paralelných zapojeniach Hookeovho}$$

a Saint- Venantovho telesa. Dovtedy sa so zmenou deformácie prejavuje zmena napätia len na samostatne zapojenom Hookeovom telese.

$$\sigma_{\max} - \sigma(t) = \left(\sum_{i=0}^j \frac{1}{M_i} \right)^{-1} \left(\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t) + 2 \sum_{i=0}^j \varepsilon_i \right). \quad (35)$$

Potom

$$\sigma(t) = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_{\max} - 2 \sum_{i=1}^j \varepsilon_i}{\sum_{i=0}^j \frac{1}{M_i}} + \sigma_{\max}, \quad (36)$$

Kde j je dané podmienkou $\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t) > 2 \left(\sigma_j \sum_{i=0}^j \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^j \varepsilon_i \right)$ a súčasne

$$\varepsilon_{\max} - \varepsilon(t) \leq 2 \left(\sigma_{j+1} \sum_{i=0}^j \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^j \varepsilon_i \right).$$

T_4 : $\Delta\varepsilon^-(t) \geq 2\left(\sigma_S \sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i\right)$. Začína sa znižovať aj deformácia na sériovo

zapojenom Saint- Venantovom telese. Pokles deformácie opäť závisí pri konštantnom napätí len od doby pôsobenia napätia a klesá s lineárnou závislosťou

$$\varepsilon_-(t) = ct. \quad (37)$$

Potom pre celkové napätie môžeme napísať vzťah

$$\sigma(t) = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_{\max} - 2\sum_{i=1}^n \varepsilon_i + \varepsilon_-(t)}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i}} + \sigma_{\max}. \quad (38)$$

T_5 : Začneme zväčšovať deformáciu od ε_{\min} . Nech ε_+^{\min} predstavuje hodnotu deformácie na samostatne zapojenom Saint-Venantovom telese v okamihu keď deformácia dosiahne hodnotu ε_{\min}

$$\varepsilon_+^{\min} = \varepsilon_+^{\max} - \varepsilon_-(T_5). \quad (39)$$

$$\text{Nech } \sigma_{\min} = \left(\sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i}\right)^{-1} \left(\varepsilon_{\min} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \varepsilon_+^{\min}\right).$$

$$\text{Nech } \Delta\varepsilon^+(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_{\min}.$$

Ak $\Delta\varepsilon^+(t) < 2\left(\sigma_S \sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i\right)$ začína sa postupne s nárastom deformácie meniť

aj napätie na sériovo zapojených paralelných zapojeniach Hookeovho a Saint-Venantovho telesa, pokiaľ bola zmena deformácie menšia zmena napätia bola daná len samostatne zapojeným Hookeovým telesom. V tomto okamihu napätie zodpovedá súčtu deformácií Hookeovho telesa a paralelných zapojení:

$$\sigma(t) = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_{\min} + 2\sum_{i=1}^j \varepsilon_i}{\sum_{i=0}^j \frac{1}{M_i}} + \sigma_{\min}, \quad (40)$$

kde j je určené podmienkou $\Delta\varepsilon^+(t) > 2\left(\sigma_j \sum_{i=0}^j \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^j \varepsilon_i\right)$ a súčasne

$$\Delta\varepsilon^+(t) \leq 2\left(\sigma_{j+1} \sum_{i=0}^{j+1} \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^{j+1} \varepsilon_i\right).$$

T_6 : Ak $\Delta\varepsilon^+(t) \geq 2\left(\sigma_S \sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i} - \sum_{i=1}^n \varepsilon_i\right)$ začína sa deformovať aj samostatne zapojený

STV. Potom napätie môžeme vyjadriť v tvare

$$\sigma(t) = \frac{\varepsilon(t) - \varepsilon_{\min} + 2 \sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \varepsilon_+(t)}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{M_i}} + \sigma_{\min}. \quad (41)$$

7. HYSTERÉZNA KRIVKA IWANOVHO MODELU

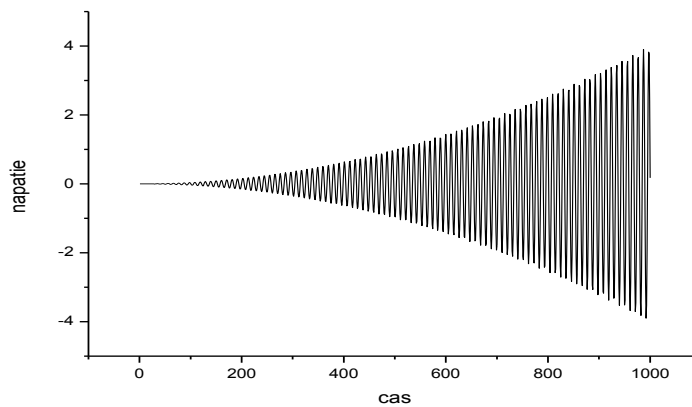
Na základe odvodeného algoritmu závislosti napätia od deformácie pre Iwanov model sme zostavili program **Iwan_strain2stress.f90** popisujúci hysterézne správanie modelu. Jeho popis je v prílohe a samotný program je v prílohe na CD-ROM. Aby sme overili odvodený algoritmus zostavili sme aj program **Iwan_stress2strain.f90** realizujúci hysteréznú závislosť deformácie od aplikovaného napätia.

Na overenie programu sme zvolili priebeh napätia ako funkciu popísanú vzťahom $(t/10)^2 \sin(30t)$ pričom $t \in \langle 0, 20 \rangle$. Priebeh napätia s časom je na Obr. 11. Toto napätie sme aplikovali na Iwanov model s parametrami modulu pružnosti a medzného napätia uvedenými v Tabuľke 1 a konštantnou rýchlosťou deformácie $c = 0.5$, modulom pružnosti pre samostatne zapojené Hookeovo teleso $M_0 = 1.0$, počtom sériových zapojení Hookeovho a Saint-Venantovho telesa $n = 10$, medzné napätie pre samostatne zapojené StV $\sigma_S = 2.3$, časovým krokom 0.02 a počtom časových krokov $T_{\max} = 1000$.

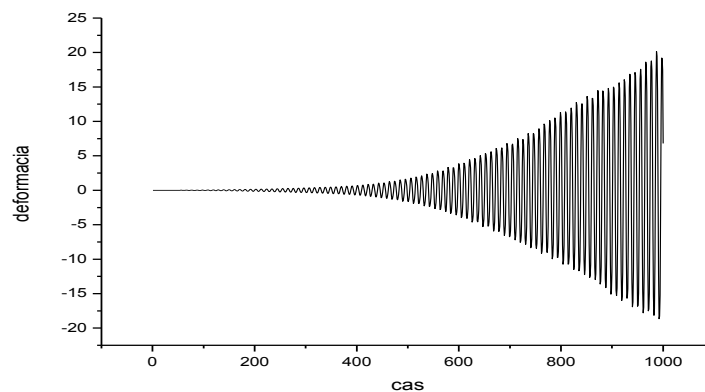
Tabuľka 1. Parametre Iwanovho modelu

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>M</i>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<i>S_i</i>	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4

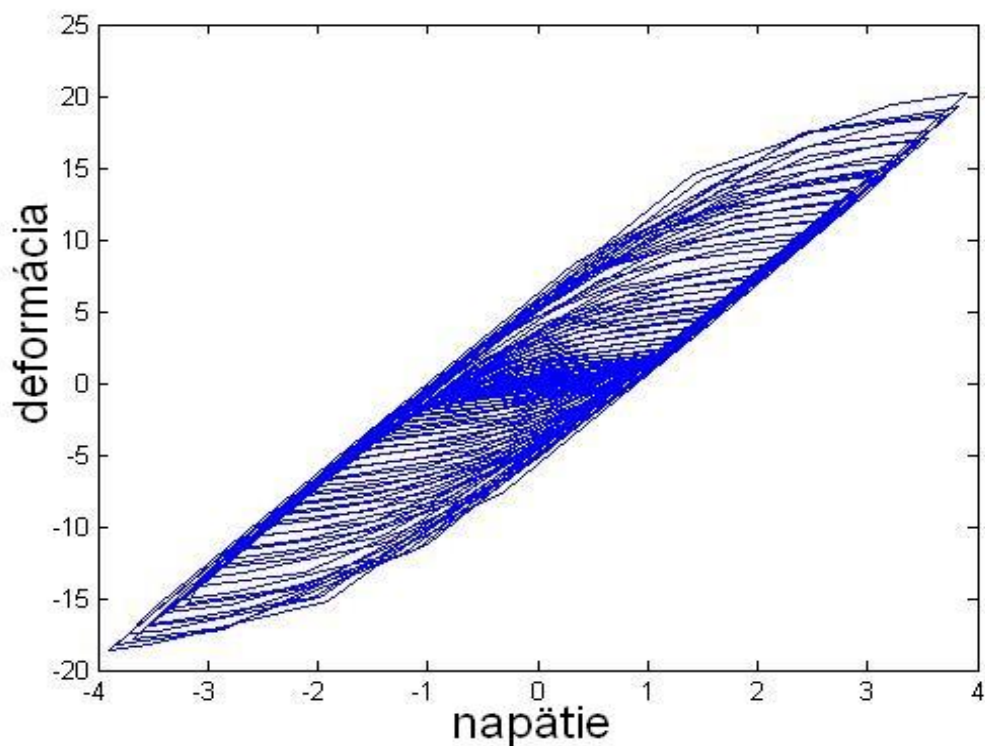
Výslednú deformáciu (Obr. 12) sme potom zadali ako vstup do programu **lwan_strain2stress.f90**. Výsledná hysterézná krivka (Obr. 13) bola rovnaká z oboch programov. Tým sme overili správnosť odvodeného algoritmu závislosti napätia od deformácie pre Iwanov model.



Obr. 11. Predpísaná závislosť napätia od času



Obr. 12. Vypočítaná závislosť deformácie od času pre priebeh napätia podľa Obr. 11.



Obr. 13.: Hysterézna krivka pri opakovanom namáhaní modelu získaná programom **Iwan_strain2stress.f90**.

8. PARAMETRE IWANOVHO MODELU

Pre realistické simulácie seizmického pohybu sa nelineárne prostredie obecné popisuje závislosťou parametra G / G_{max} od strižnej deformácie. Z tejto závislosti je preto potrebné nájsť parametre Iwanovho modelu. Veličina G je modul pružnosti (vyššie uvádzaný ako M) a G_{max} je maximálny modul pružnosti, ktorý je určený vzťahom

$$G_{max} = \rho V_s^2, \quad (42)$$

kde ρ je hustota a V_s je rýchlosť šírenia S vln. Keď poznáme hodnotu G_{max} môžeme z krivky závislosti získať moduly pružnosti pre Hookeove telesá v Iwanovom modeli.

Potom použijeme iteratívny vzťah, ktorý dáva do súvisu moduly pružnosti a medzné napätia (Joyner a Chen, 1975)

$$\left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{M_i} \right)^{-1} = \frac{\sigma_{m+1} - \sigma_m}{\varepsilon_{m+1} - \varepsilon_m}, \quad (43)$$

kde M_i sú moduly pružnosti, σ_i medzné napätia a ε_i sú hodnoty strižnej deformácie dané zadanou krivkou. V prvom kroku položíme $\sigma_1 = 0$, čo zodpovedá samostatne zapojenému Hookeovmu telesu v Iwanovom modeli. V našom prípade uvažujeme Iwanov model so samostatne zapojeným Saint – Venantovým telesom, čiže načítame $m+1$ zadaných hodnôt G / G_{\max} , pričom posledná hodnota bude zodpovedať samostatne zapojenému Saint – Venantovmu telesu. Zostavený program **vypocet_par.f90** realizujúci popísaný výpočet je v prílohe na CD – ROM.

9. IMPLEMENTÁCIA IWANOVHO MODELU DO PROGRAMU NA VÝPOČET ŠÍRENIA SEIZMICKÝCH VĹN V 1D PROSTREDIACH

Iwanov model hysterézneho správania sme implementovali do programu na výpočet šírenia seizmických vĺn v 1D elastických prostrediach založeného na metóde konečných diferencií vypracovaného v rámci projektu SPICE (Moczo et al., 2004). V programe sme nahradili podprogram, ktorý vypočítaval napätie z deformáciu pomocou Hookeovho zákona podprogramom, ktorý sme odvodili z programu **Iwan_strain2stress.f90**. Tiež bolo potrebné upraviť načítanie parametrov prostredia, keďže Iwanov model je popísaný $2n$ parametrami, namiesto jedného parametra pre Hookeov zákon.

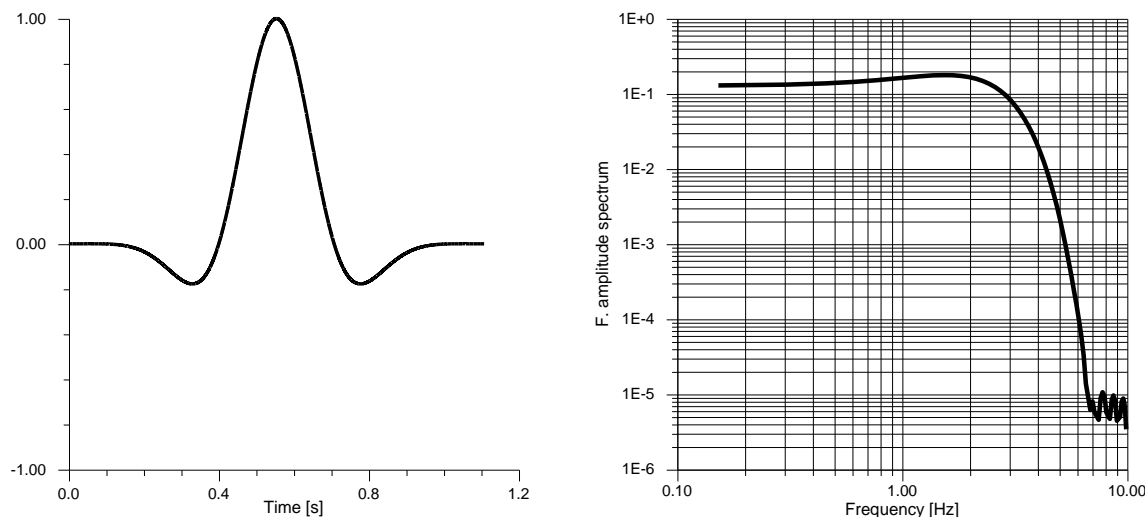
Manuál k programu sa nachádza v prílohe a samotný program je v prílohe na CD – ROM.

10. NUMERICKÉ SIMULÁCIE

Na ilustráciu simulácie šírenia seizmických vln v nelineárnych prostrediach sme zvolili jednoduchý model sedimentárnej vrstvy na elastickom polpriestore. Pre voľbu parametrov prostredia sme použili známe parametre sedimentov Mygdónskeho bazénu pri meste Thessaloniki v Grécku. Pre vrstvu sme zvolili parametre najvrchnejšej vrstvy sedimentov Mygdónskeho bazénu: hustota $\rho_1 = 2050 \text{ kg.m}^{-3}$, rýchlosť šírenia S – vln $\beta = 130 \text{ m.s}^{-1}$ a nelineárne parametre G / G_{\max} v závislosti od strižnej deformácie podľa Tabuľky 1. Mocnosť vrstvy sme zvolili 21 km. Pre túto mocnosť vrstvy je 1D rezonančná frekvencia 1.54 Hz. V podloží uvažujeme $\rho = 2600 \text{ kg.m}^{-3}$ a $\beta = 2600 \text{ m.s}^{-1}$. Výpočtový model siahal do hĺbky 30 km a na jeho hraniciach sme použili neodrážajúce hranice podľa Emerman & Stephen (1983). Časovú funkciu zdroja sme zvolili Gaborov signál

$$A \exp \left\{ -\frac{\omega^2 (t - t_s)^2}{\gamma^2} \right\} \cos[\omega(t - t_s) + \mathcal{G}], \quad (44)$$

kde $\omega = 2\pi f_p$ a $f_p = 1.625$, $\gamma = 2$, $\mathcal{G} = 0$, $t_s = 0.45\gamma / f_p$ s rôznymi maximálnymi amplitúdami A . Voľba parametrov Gaborovho signálu nám zaručuje dostatočnú energiu dopadajúcej vlny na 1D rezonančnej frekvencii (Obr. 14). Pre náš modelový príklad sme počítali s priestorovým krokom 3 m a časovým krokom $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$. Takto zvolený priestorový krok nám zaručuje dostatočne presné výsledky numerických simulácií približne do 7 Hz. Zdroj sme umiestnili do vzdialenosti 36 m od voľného povrchu a prijímač je umiestnený na voľnom povrchu. Výpočty sme realizovali pre 4 hodnoty maximálnej amplitúdy A , $A \in \{ 1, 10\,000, 100\,000, 1\,000\,000 \}$.

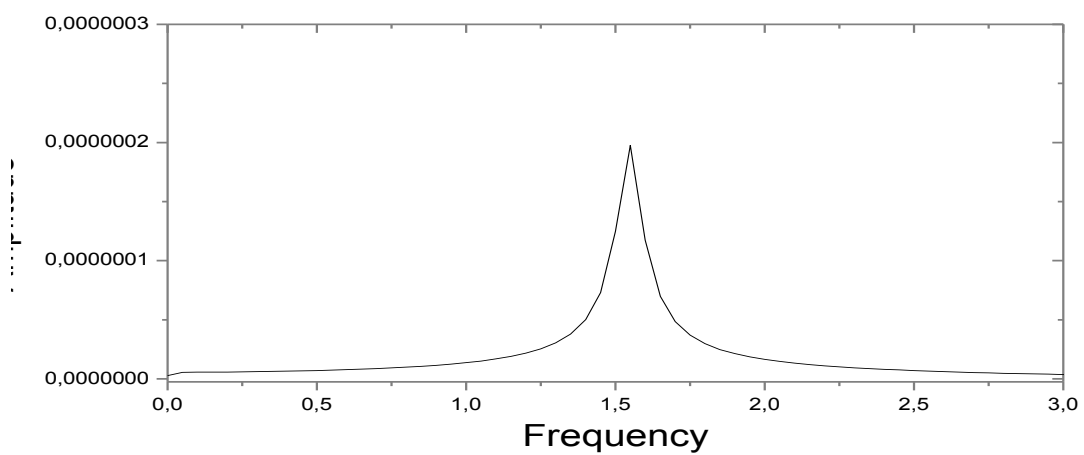
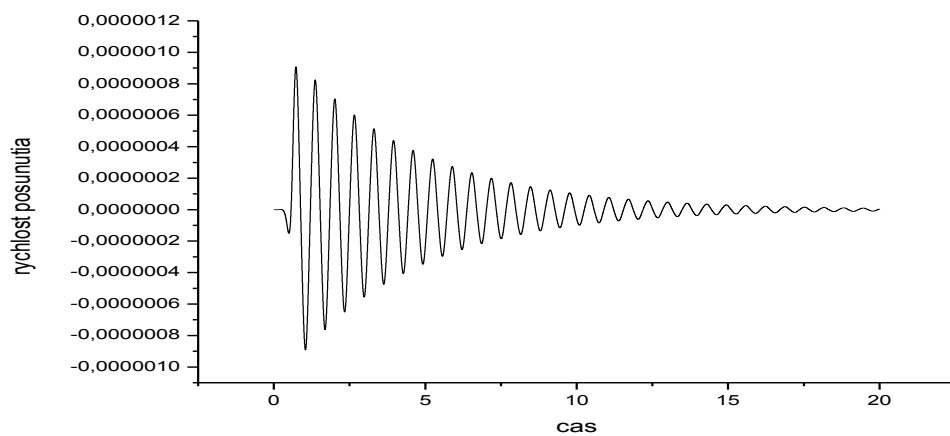
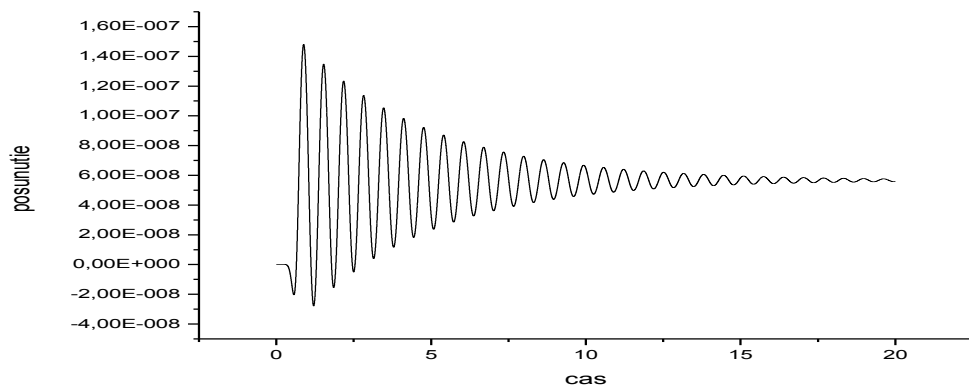


Obr. 14. Gaborov signál pre zvolené parametre a maximálnu amplitúdu $A = 1$. Vľavo: Časový priebeh. Vpravo: Amplitúdové spektrum.

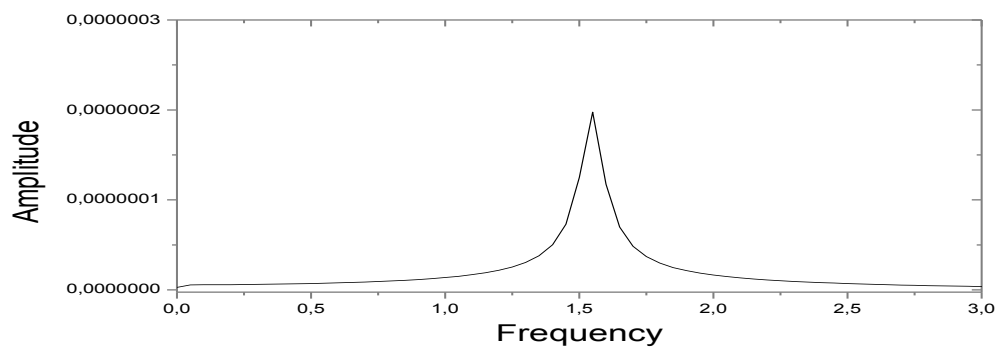
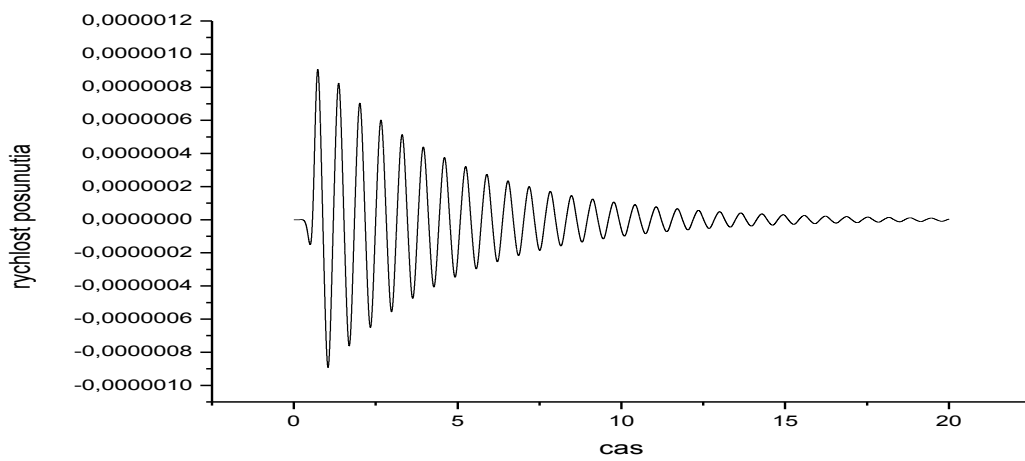
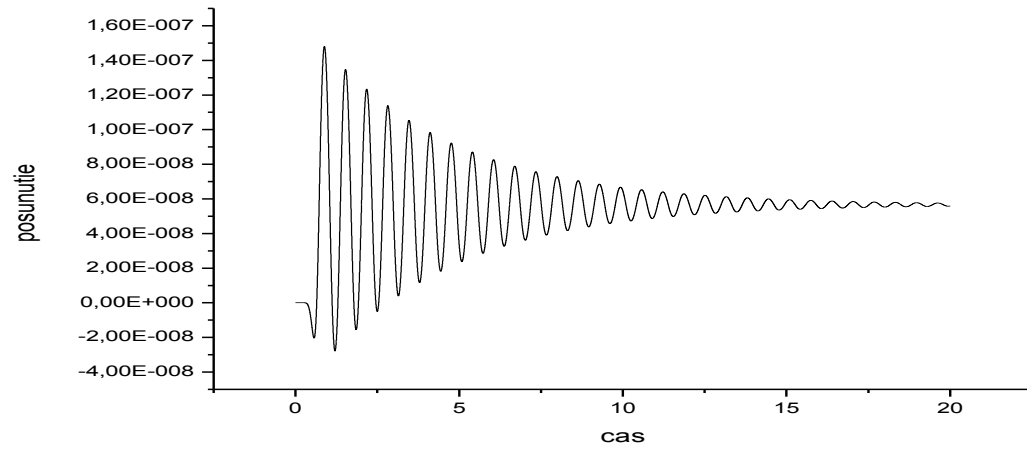
10.1. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

Na Obr. 14. sú ilustrované charakteristiky elastickej odozvy pri hodnote maximálnej amplitúdy zdrojovej funkcie 1. Charakteristiky nelineárnej odozvy pre hodnotu maximálnej amplitúdy zdrojovej funkcie 1 sú zobrazené na Obr. 15. Porovnaním Obr. 14 a 15. pozorujeme identický charakter odozvy pre elastický aj nelineárny model, zdrojový signál nebol dostatočne intenzívny, aby vybudil nelineárne správanie materiálu. Simulované záznamy rýchlosti posunutia sme filtrovali dolnopriepustným filtrom do 8 Hz, aby sme odstránili prípadné efekty numerickej sieťovej disperzie. Na Obr. 14. sú zobrazené charakteristiky elastickej odozvy pri hodnote maximálnej amplitúdy zdrojovej funkcie 10 000. Z grafu amplitúdového spektra pozorujeme jasné maximum na 1D rezonančnej frekvencii. Na Obr. 15. sú ilustrované charakteristiky nelineárnej odozvy pri hodnote maximálnej amplitúdy zdrojovej funkcie 10 000. Pozorujeme zmeny v charaktere posunutia aj rýchlosti posunutia, zmena rezonančnej frekvencie nie je jednoznačne pozorovateľná, zmenil sa však priebeh amplitúdového spektra. Na Obr. 16. sú zobrazené charakteristiky elastickej odozvy pri hodnote maximálnej amplitúdy zdrojovej funkcie 100 000. Charakteristiky nelineárnej odozvy

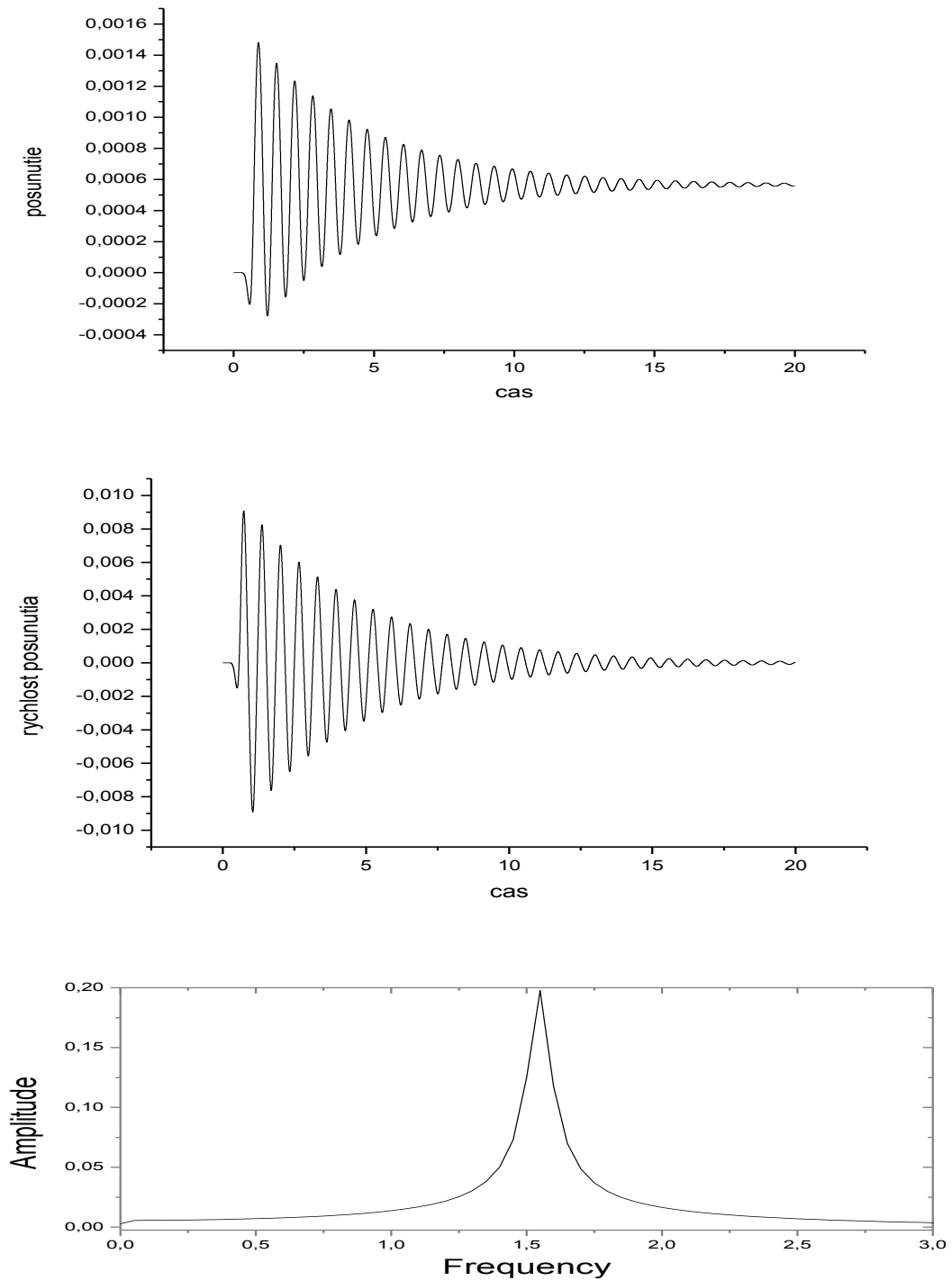
pre hodnotu maximálnej amplitúdy zdrojovej funkcie 100 000 sú zobrazené na Obr. 17. V porovnaní s elasticou odozvou pozorujeme náhlu zmenu v posunutí, pokles amplitúdy rýchlosti posunutia a posun rezonančnej frekvencie do nižších hodnôt. Na Obr. 18. sú zobrazené charakteristiky elastickej odozvy pri hodnote maximálnej amplitúdy zdrojovej funkcie 1 000 000. Na Obr. 19. sú ilustrované charakteristiky nelineárnej odozvy pre hodnotu maximálnej amplitúdy zdrojovej funkcie 1 000 000. V porovnaní s elasticou odozvou pozorujeme rýchly útlm 1D rezonancie, pokles amplitúdy rýchlosti posunutia a jej náhly útlm a posun rezonančnej frekvencie do nižších hodnôt. So zvyšujúcou sa hodnotou maximálnej amplitúdy môžeme jasne vidieť nábeh nelineárneho správania sa posunutí a rýchlosti posunutia ako aj posun rezonančnej frekvencie do nižších hodnôt. Pri maximálnej amplitúde 10 000 môžeme tiež vidieť vznik nelineárneho správania ale charakter záznamu 1D rezonancie sa zachováva, posun rezonančnej frekvencie nie je jednoznačne pozorovateľný a pri odozve rýchlosti posunutia môžeme pozorovať, že zmena oproti elastickej odozve je veľmi malá, pozorujeme mierny pokles amplitúdy a v neskoršom čase je pozorovateľný útlm rezonancie.



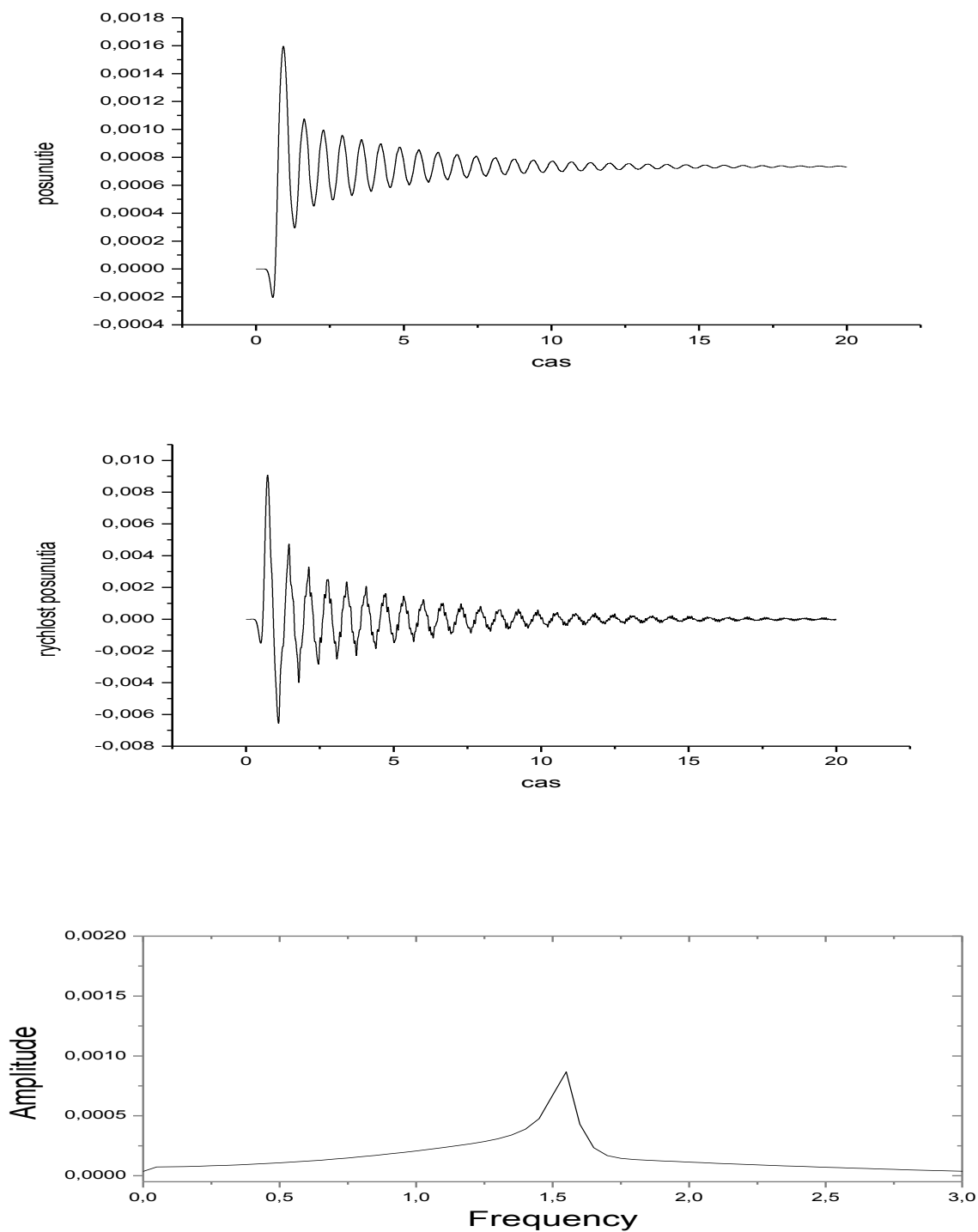
Obr. 14. Elastická odozva modelu na voľnom povrchu. Maximálna amplitúda vstupného signálu 1. Hore: Časový priebeh posunutia. Stred: Časový priebeh rýchlosti posunutia. Dole: Amplitúdové spektrum rýchlosti posunutia.



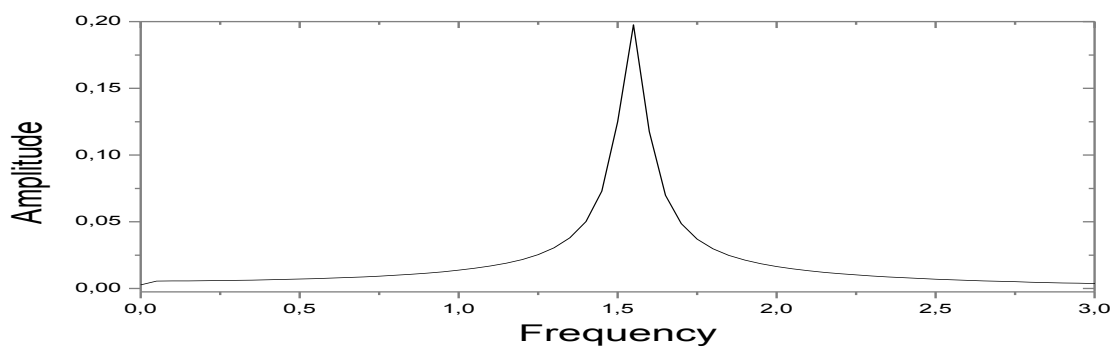
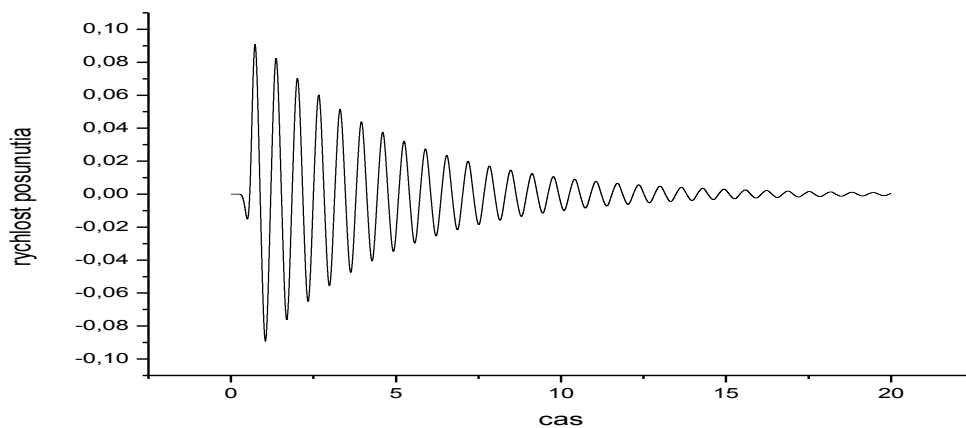
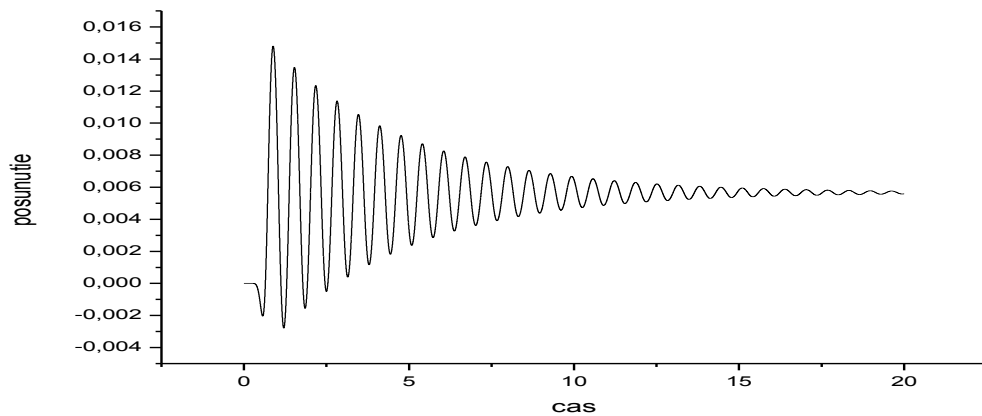
Obr. 15. Nelineárna odozva modelu na voľnom povrchu. Maximálna amplitúda vstupného signálu 1. Hore: Časový priebeh posunutia. Stred: Časový priebeh rýchlosti posunutia. Dole: Amplitúdové spektrum rýchlosti posunutia.



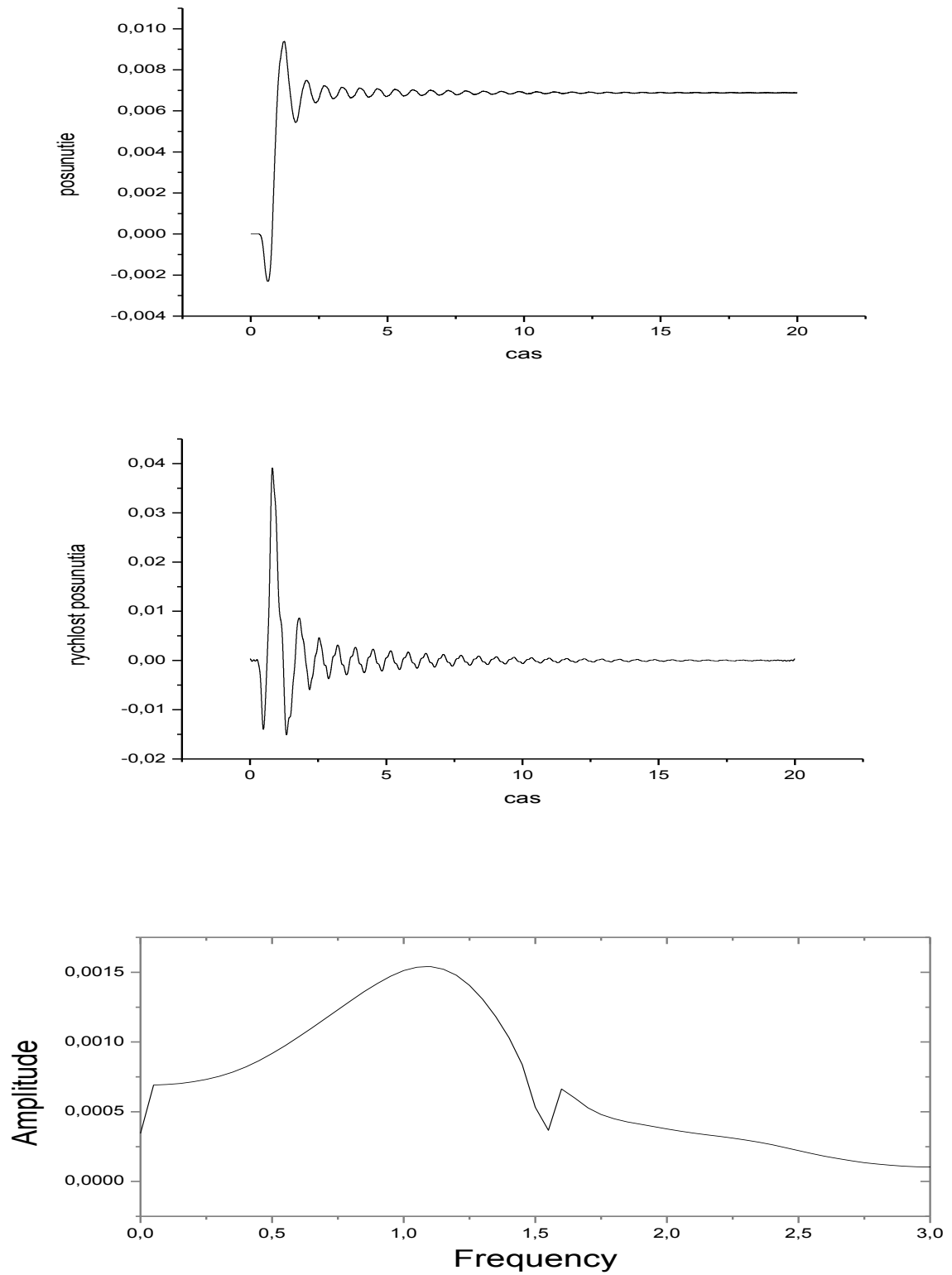
Obr. 16. Elastická odozva modelu na voľnom povrchu. Maximálna amplitúda vstupného signálu 10 000. Hore: Časový priebeh posunutia. Stred: Časový priebeh rýchlosti posunutia. Dole: Amplitúdové spektrum rýchlosti posunutia.



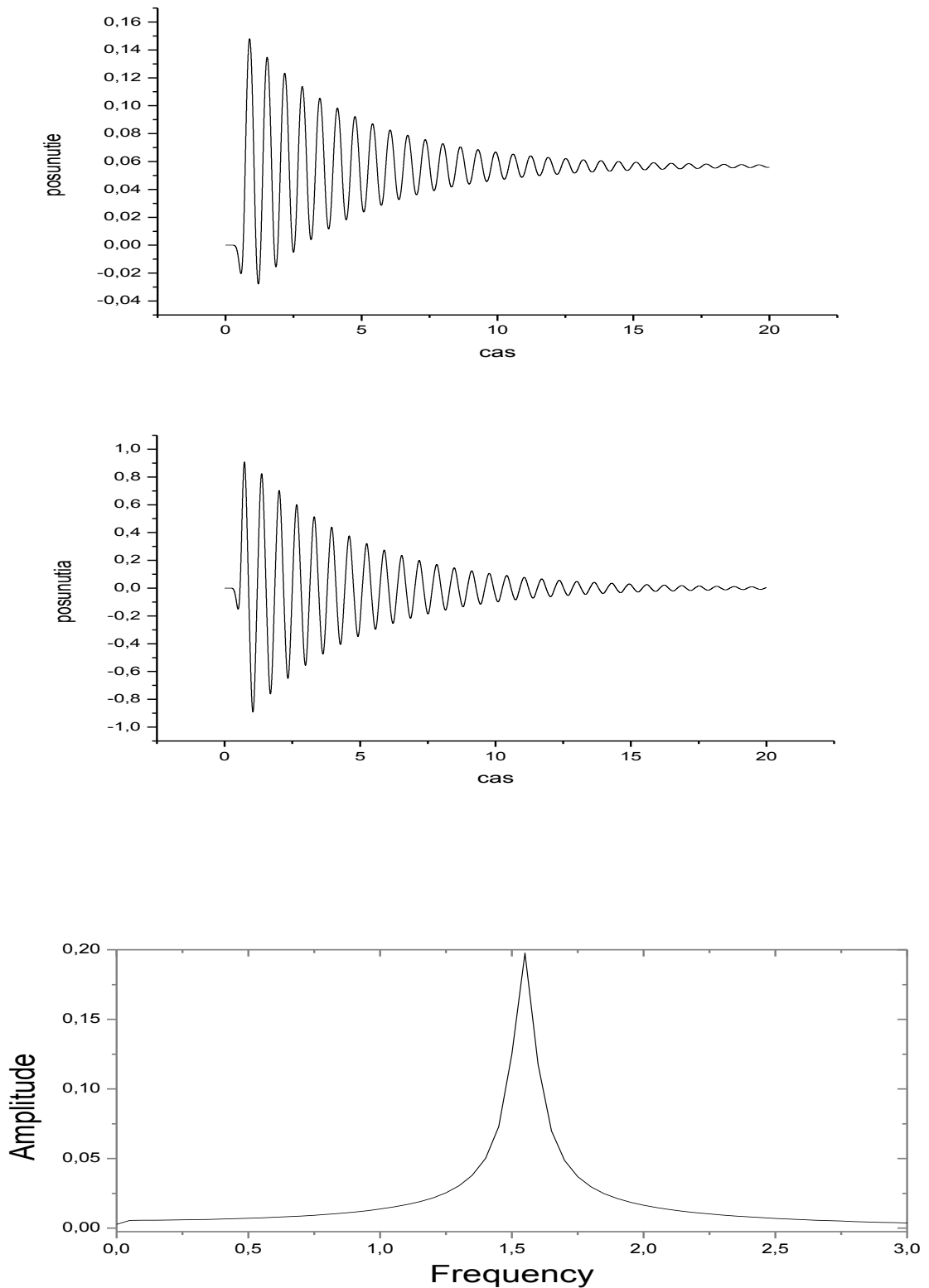
Obr. 17. Nelineárna odozva modelu na voľnom povrchu. Maximálna amplitúda vstupného signálu 10 000. Hore: : Časový priebeh posunutia. Stred: Časový priebeh rýchlosti posunutia. Dole: Amplitúdové spektrum rýchlosti posunutia.



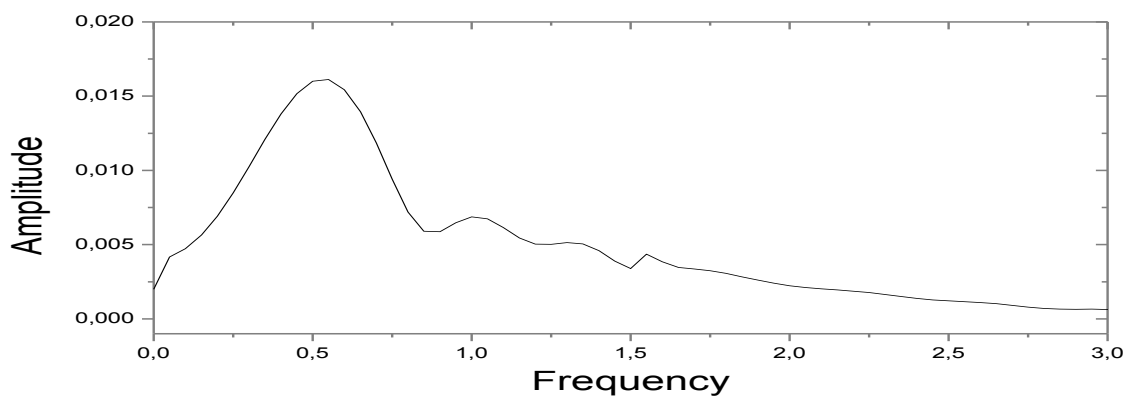
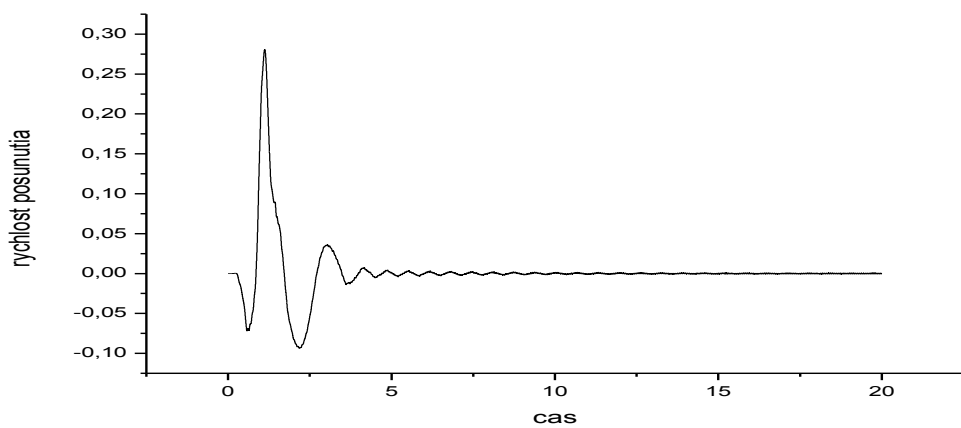
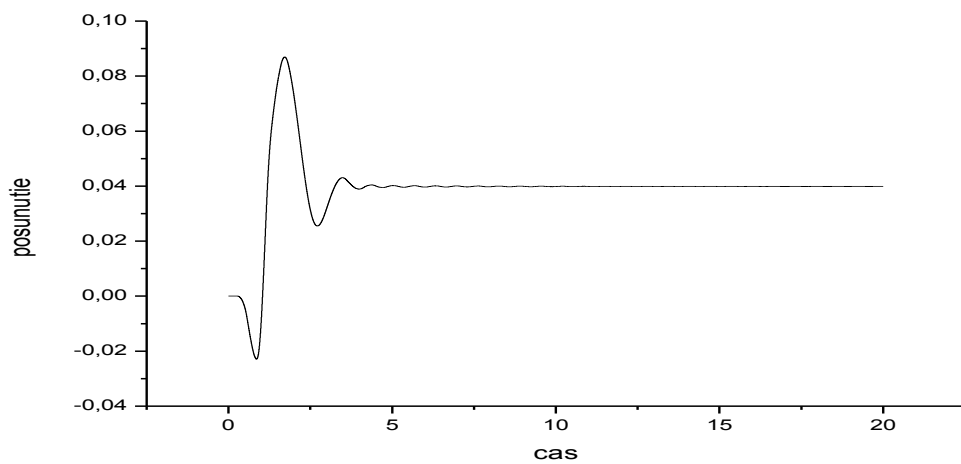
Obr. 18. Elastická odozva modelu na voľnom povrchu. Maximálna amplitúda vstupného signálu 100 000. Hore: : Časový priebeh posunutia. Stred: Časový priebeh rýchlosti posunutia. Dole: Amplitúdové spektrum rýchlosti posunutia.



Obr. 19. Nelineárna odozva modelu na voľnom povrchu. Maximálna amplitúda vstupného signálu 100 000. Hore: : Časový priebeh posunutia. Stred: Časový priebeh rýchlosti posunutia. Dole: Amplitúdové spektrum rýchlosti posunutia.



Obr. 20. Elastická odozva modelu na voľnom povrchu. Maximálna amplitúda vstupného signálu 1 000 000. Hore: : Časový priebeh posunutia. Stred: Časový priebeh rýchlosti posunutia. Dole: Amplitúdové spektrum rýchlosti posunutia.



Obr. 21. Nelineárna odozva modelu na voľnom povrchu. Maximálna amplitúda vstupného signálu 1 000 000. Hore: : Časový priebeh posunutia. Stred: Časový priebeh rýchlosti posunutia. Dole: Amplitúdové spektrum rýchlosti posunutia.

11. ZÁVER

Pre elasto–plastický popis hysterézneho správania sme zvolili Iwanov model, ktorý pozostáva zo sériového zapojenia samostatného Hookeovho telesa, n - paralelných zapojení Hookeovho a Saint – Venantovho telesa a samostatného Saint – Venantovho telesa. Pre tento model sme odvodili závislosť napätia od deformácie na základe, ktorej sme vytvorili výpočtový program modelujúci hysteréznú krivku. Vytvorili sme program závislosti deformácie od napätia pre Iwanov model, aby sme overili správnosť odvodenia závislosti napätia od deformácie potrebnej pre implementáciu hysterézneho správania do numerického programu pre seizmický pohyb v 1D prostredí. Pozmenili sme už existujúci program na simuláciu šírenia seizmických vln v 1D prostredí doplnením hysteréznej závislosti medzi napätím a deformáciou. Funkčnosť programu sme ilustrovali na modeli elasto-plastickej vrstvy na polpriestore. Zmenou škály zdrojovej funkcie sme ukázali charakter nelineárnych efektov, tzn. pre vyššie hodnoty škálovania bol jasný posun 1D rezonančnej frekvencie do nižších hodnôt, zatiaľ čo pre nízke hodnoty škálovania bola zmena charakteru posunutia a rýchlosti posunutia takmer nebadateľná, posun amplitúdového spektra je malý oproti prípadom s vyššou hodnotou škálovania.

Zoznam použitej literatúry

- Bonilla F., 2008, Analyse des Effets de Site, Estimation des Mouvements Forts et Calcul Probabiliste de L'Alea Sismique., l'Habilitation a Diriger des recherches, a l'Universit'e Joseph Fourier, Grenoble.
- De Luca G., Marcucci S., Milana G., Sanó T., 2005, Evidence of Low – Frequency Amplification in the City of L'Aquila., Central Italy, through a Multidisciplinary Approach Includig Strong – and Weak – Motion Data, Ambient Noise, and Numerical Modeling., *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, 1469 – 1481.
- Dimitriu P., Theodulidis N., Bard P.-Y., 2000, Evidence of nonlinear site response in HVSR from SMART1 (Taiwan) data., *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **20**, 155 – 165.
- Ehret D., Schmitt S., Hannich D., Osinov V., 2007, Non-linear Modelling for Estimating Site Effects in Bucharest., Romania., *Geophysical Research Abstracts*, **9**.
- Emerman, S.H., Stephen, R.A., 1983, Comment on "Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations" by R. Clayton and B. Engquist. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **73**, 661-666.
- Iwan W. D., 1967, On a Class of Models for the Yielding Behavior of Continuous and Composite Systems., *Journal of Applied Mechanics*, **34**, 612 – 617.
- Iwata T., Asano K., Kuriyama M., Iwaki A., 2008, Non - linear site response characteristics of K-NET ISK005 station and relation to the earthquake disaster durind the 2007 Noto – Hanto earthquake, central Japan. In: 13. World Conference on Earthquake Engineerin, October 12 – 17, 2008, Beijing, China. Submitted.
- Joyner W. B., 1975, A Method for Calculating Nonlinear Seismic Response in Two Dimensions., *Bulletin if the Seismological Society of America*, **65**, 1337 – 1357.

- Joyner W. B., Chen A. T. F., 1975, Calculation of Nonlinear Ground response in Earthquakes., *Bulletin of the Seismological Society of America*, **65**, 1315 – 1336.
- Kokusho T., 2004, Nonlinear site response and strain – dependent soil properties., *Current Science*, **87**, No. 10.
- Kubišová L., 2009, Nelineárne Lokálna Efekty Silných Zemetrasení, Bakalárska práca, *Univerzita Komenského*, 41 pp.
- Li X. – J., 1993. Study on the method for analyzing the earthquake response of nonlinear site., *Institute of engineering mechanics*, China Seismological Bureau.
- Moczo P., Kristek J., Franek P., 2008, Lecture Notes on Rheological Models, *DAPEM FMPI CU 2006*, Bratislava.
- Moczo P., 2006, Basics of Continuum Mechanics, *Comenius University*, Bratislava.
- Moczo P., Kristek J., Halada L., 2004, The Finite – Difference Method for Seismologists. An Introduction, *Comenius University*, Bratislava, 158 pp.
- Moczo P., Labák P., 2000, Zemetrasenia a Seizmické Ohrozenie., *Geofyzikálny ústav SAV*, Bratislava.
- Nunziata C., Vaccari F. Panza G.F., The Mw 6.3, 2009 L’Aquila earthquake: linear and nonlinear site effects. In: Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events, September 16 – 18, 2010 Naples. Submitted.
- Park D., Hashash Y.M.A., 2004, Probabilistic seismic hazard analysis with nonlinear site effects in the Mississippi Embayment. In 13. World Conference on Earthquake Engineerin, August 1 – 6, 2004, Vancouver, Canada. Submitted.
- Pyke R., 1979, Nonlinear Soil Models for Irregular Cyclic Loadings., *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, **105**, 715-725.
- Roten D., Fäh D., Bonilla L.F., Alvarez – Rubio S., Weber T.M., Laue J., 2009, Estimation of non – linear site response in a deep Alpine valley., *Geophys. J. Int.*, **178**, 1597 – 1613.

- Tsuda K., Steidl J., 2006, Nonlinear site response from the 2003 and 2005 Miyagi – Oki earthquakes., *Earth Planets Space*, **58**, 1593 – 1597.
- Tsuda K., Archulera R.J., Steidl J., 2006, Confirmation of Nonlinear Site Response: Case Study from 2003 and 2005 Miyagi – Oki Earthquakes., *Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo*, **81**, 303-307.
- Wang Z. - L., Han Q. – Y., 1981, Analysis of wave propagation for the seismic response, using the visco – elastoplastic model., *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **1** , 117-137.
- Wen K.-L., Chang T.-M., Lin Ch.-M., Chiang H.-J., 2006, Identification of Nonlinear Site Response Using the H/V Spectral Ratio Method., *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **17**, 533 – 546.
- Yang J., Sato T., Li X.-S., 2000, Nonlinear site effects on strong ground motion at a reclaimed Island., *Can. Geotech. J.*, **37**, 26 – 39.
- Zhang K. –X., Li M. – Z., Wang Z. – K., 1997, Dynamic elastic – plastic models of soils based on Non – Masing’s rules., *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **17**, 74-81.

PRÍLOHY

- **Program 1DFD_DVS**
- **Závislosť deformácie od napätia pre Iwanov model**
- **Závislosť napätia od deformácie pre Iwanov model**
- **Výpočet parametrov Iwanovho modelu**

Program 1DFD_DVS
The Fortran95 Computer Code
for Finite-Difference Numerical
Generation and Simulation of a 1D Seismic Wavefield
in a 1D Elastic – plastic Medium

The medium can be bounded from one side (in the program it is the upper horizontal plane $z = 0$) by either of the following boundaries:

- free surface (traction-free condition),
- plane of symmetry,
- rigid boundary,
- nonreflecting boundary (several types).

The medium can be bounded from the other side (the bottom horizontal plane $z = z_{MAX} > 0$) by a nonreflecting boundary (several types).

The medium is elasto - plastic with rheology given by the Iwan model.

Input files

Program 1DFD_DVS requires five input files:

- an auxiliary file containing just the name of the current computation,
- an input file with controlling parameters for the computation,
- a file containing the elastic and plastic material parameters of the model,
- a file containing the source-time function.

Auxiliary file 'HF_1DFD_DVS'

The file type is ASCII and contains the following variable:

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
JOBNAME	A17	The name of the current computation. This name is taken as a base for constructing the names of other input and output files.

Input data file 'JOBNAME.IN'

The file type is ASCII and contains several controlling variables associated in the nine namelists. The file also contains positions of receivers.

NAMELIST /NAMES/

MO_FILE_NAME

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
MO_FILE_NAME	A20	The name of the file containing elasto-plastic parameters and densities describing material cells.

NAMELIST /CONTROLDATA/

MT1 , MT2 , DT , IPAS1 , MZ , H

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
MT1, MT2	integer	The computation is performed from the time level MT1 until the time level MT2. MT1 has to be always equal to 1.
DT	real	The time step Δt in seconds. It has to satisfy the stability condition for the 4 th -order staggered grid DVS

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
		FD scheme, i.e. $\Delta t \leq \frac{6}{7} \frac{h}{v_{\max}}$, where v_{\max} is the maximum P-wave or S-wave velocity and h is a grid spacing.
IPAS1	integer	If IPAS1 = 1, then the displacement and/or particle-velocity values at each time level are stored. If IPAS1 = 2 (3,...), then the displacement and/or particle-velocity values at each second (third,...) time level are stored.
MZ	integer	The total number of the grid points in the grid minus 1. One grid point represents, in fact, one physical horizontal plane.
H	real	The grid spacing in meters. The total size of the grid in meters is (MZ+1)*H.

NAMELIST /NONREF/

OMG, WB, KTTO, KTBO

This namelist refers to the nonreflecting boundaries of the grid. Several types of the nonreflecting boundaries are included.

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
OMG	real	The dominant frequency in Hz at which artificial reflections should be suppressed more than at other frequencies.
WB	real	The weight coefficient b for the Liu-Archuleta type of nonreflecting boundary (a). It has to satisfy condition $0 \leq b \leq 0.4$.

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
KTTO	integer	<p>The key determining type of the top boundary of the grid:</p> <ul style="list-style-type: none"> < 0: free surface = 0: plane of symmetry = 1: rigid boundary = 2: Reynolds = 3: Peng & Toksöz = 4: Emmerman & Stephen = 5: Clayton & Engquist A1 = 6: Liu-Archuleta
KTBO	integer	<p>The key determining type of the bottom boundary of the grid:</p> <ul style="list-style-type: none"> = 1: rigid boundary = 2: Reynolds = 3: Peng & Toksöz = 4: Emmerman & Stephen = 5: Clayton & Engquist A1 = 6: Liu-Archuleta

NAMELIST /TXT/

TEXT

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
TEXT	A20	An arbitrary alphanumeric text (e.g. describing the computation)

NAMELIST /SOURCE/

LS

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
LS	integer	The index (position) of the grid point at which the body force will be applied.

NAMELIST /REC/

MR

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
MR	integer	The number of receivers.

At the end of the file MR integer numbers in the free form specify grid indices of the receivers. Index 0 means the top boundary of the computational model.

Input data file *MO_FILE_NAME*

The file type is binary and contains the arithmetic averages of density and harmonic averages of modulus in all grid cells. Data is read by

READ (14) (DEN(L), P(L), Si (L), C (L), Ss (L), L = 0, MZ)

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
DEN (L)	real	The arithmetic average of the density in $kg \cdot m^{-3}$. The average is taken over a distance of H centered at the grid point which is the position of the displacement in the grid cell L, see $\rho_I^A = \frac{1}{h} \int_{x_{I-1/2}}^{x_{I+1/2}} \rho(x) dx$.
P (L)	real	The average of spring constant (elastic parameters) given by G/G_{max} curve .
Si (L)	real	The average of yield stress (plastic parameters) given by equation (41)
C (L)	real	The average of constant strain rate
Ss (L)	real	The average of yield stress for self involved Saint – Venant body.

Input data file 'STF.DAT'

The file type is ASCII and contains the source-time function of the body force. Data is read by

```

J = 1

DO

  READ (10,*,IOSTAT = IOS) SOURTF (J)

  IF (IOS == -1) EXIT

  J = J + 1

END DO

```

<i>Name of Variable</i>	<i>Type</i>	<i>Description</i>
SOURTF (J)	real	The source-time function at time level J.

Output files

Program 1DFD_DVS generates several output files depending on the input parameters:

- a log file containing the input parameters (as read by the program) and error messages,
- a file containing displacement values at specified receivers in the SismoVi format,
- a file containing particle-velocity values at specified receivers in ASCII format,

Log file '*JOBNAME.LOG*'

The file type is ASCII and contains the input parameters read from file '*JOBNAME.IN*'. If there is some error the file also contains the error message.

Output data file '*JOBNAME_D.DAT*'

The file type is ASCII and contains values of the displacement at the specified receivers at each IPAS1 time level in the column form, e.g.

<i>Time</i>	<i>Displacement values at receiver 1</i>	<i>Displacement values at receiver 2</i>	<i>...</i>	<i>Displacement values at receiver MR</i>
-------------	--	--	------------	---

Output data file '*JOBNAME_V.DAT*'

The file type is ASCII and contains values of the particle velocity at the specified receivers at each IPAS1 time level in the column form, e.g.

<i>Time</i>	<i>Particle-velocity values at receiver 1</i>	<i>Particle-velocity values at receiver 2</i>	<i>...</i>	<i>Particle-velocity values at receiver MR</i>
-------------	---	---	------------	--

Závislosť deformácie od napätia pre Iwanov model

Program **Iwan_stress2strain.f90** počíta deformáciu zo zadaných hodnôt napätia.

Program číta súbor `fcia_napatia.in` kde sú zadané parametre pre Iwanov model :

C – konštantná rýchlosť deformácie

M0 – modul pružnosti pre samostatne zapojené Hookeove teleso

N – počet sériových zapojení Hookeovho a Saint-Venantovho telesa

Ss – medzné napätie samostatne zapojeného Hookeovho a Saint-Venantovho telesa

Tmax – počet časových iterácií

M – moduly pružnosti pre všetky Hookeove telesá v zapojení HB-s-StV

Si – medzné napätia pre všetky Saint-Venantove telesá v zapojení HB-s-StV

– hodnoty napätia

Výsledné hodnoty deformácie sa zapíšu do súboru `def.txt`.

Závislosť napätia od deformácie pre Iwanov model

Program **Iwan_strain2stress.f90** počíta napätie zo zadaných hodnôt deformácie.

Program číta súbor konst.in kde sú zadané parametre pre Iwanov model :

C – konštantná rýchlosť deformácie

M0 – modul pružnosti pre samostatne zapojené Hookeove teleso

N – počet sériových zapojení Hookeovho a Saint-Venantovho telesa

Ss – medzné napätie samostatne zapojeného Hookeovho a Saint-Venantovho telesa

Tmax – počet časových iterácií

M – moduly pružnosti pre všetky Hookeove telesá v zapojení HB-s-StV

Si – medzné napätia pre všetky Saint-Venantove telesá v zapojení HB-s-StV

– hodnoty deformácie

Výsledné hodnoty napätia sa zapíšu do súboru posunutie.txt.

Výpočet parametrov Iwanovho modelu

Program **vypocet_par.f90** vypočíta moduly pružnosti a medzné napätia potrebné pre zadefinovanie Iwanovho modelu z G/G_{\max} krivky. Program číta súbor NL_dat.txt, v ktorom sú zadané hodnoty G/G_{\max} a strižnej deformácie, z ktorej sa dajú použitím rovníc popísaných v kapitole 8 vypočítať moduly pružnosti $P(N)$ a medzné napätia $S_i(N)$. Program potrebuje vstupné údaje:

V_s – rýchlosť šírenia S-vln v danej vrstve (prostredí)

R_o – hustota vo vrstve (prostredí)

Col – poradové číslo parametrov vrstvy (prostredia) v súbore NL_dat.txt

N – počet nami zvolených modulov pružnosti a medzných napätí, nesmie byť väčší ako počet hodnôt zadaných pomocou krivky G/G_{\max}

Program vypočíta hodnoty modulov pružnosti a medzných napätí.