



ЗРГИМ
Здружение на
рударски и
геолошки инженери
на Р. Македонија

XIV^{TO} СТРУЧНО СОВЕТУВАЊЕ НА ТЕМА:
Технологија на подземна и површинска експлоатација на
минерални сировини

ПОДЕКС – ПОВЕКС '23

Охрид
06 – 08. 10. 2023 год.

ПРОЦЕСИРАЊЕ НА СЕИЗМИЧКИ СИГНАЛИ ОД МИНИРАЊА НА ПОВРШИНСКИ КОПОВИ

Зоран Панов¹, Лазо Пекевски², Ристо Поповски¹

¹Факултет за природни и технички науки, Универзитет “Гоце Делчев”,
Штип, Северна Македонија

²Сеизмолошка опсерваторија, ПМФ, УКИМ, Скопје, Северна Македонија

Апстракт: Во овој труд е дадено осврт кон можноста за анализирање на сеизмички сигнали од минирање на површинските копови со користење на постпроцесирање. Добиените резултати би можеле да помогнат во зголемување на квантумот на квалитетни информации поврзани со минирањата со посебен акцент за максимизирање на бараната фрагментација на карпите и минимизирање на негативните влијанија врз околината. Во трудот е даден пример на користење на STFT филтерот за процесирање на сеизмички сигнал од минирања со одредување на зависноста на распределбата на фреквенциите во однос на времето.

Клучни зборови: површински копови, сеизмика, минирање, сигнал, процесирање

SIGNAL PROCESSI OF BLAST INDUCED SEISMIC EVENTS FROM OPEN PIT MINES

Zoran Panov¹, Lazo Pekevski², Risto Popovski¹

¹Faculty of Natural and Technical Sciences, University “Goce Delcev”,
Stip, North Macedonia

²Seismological Opseratory, PMF, UKIM, Skopje, Republic of North Macedonia

Abstract: In this paper, a review is given to the possibility of analyzing seismic signals from blasting surface mines using post-processing. The obtained results could help to increase the quantity of quality information related to blasting with special emphasis on maximizing the required rock fragmentation and minimizing the negative impacts on the environment. The paper gives an example of using the STFT filter for processing a seismic signal from blasting by determining the dependence of the frequency distribution in relation to time.

Key Words: open pit mines, seismic, blasting, signal, processing

1. ВОВЕД

Минирањата на површинските копови создаваат т.н. индуцирани сеизмички бранови кои можат да имаат значително влијание како на објектите на површинскиот коп, но и на околината. Од рударски аспект можеби е и најзначајно

влијанието врз стабилноста на косините на површинските копови. Секако, треба да се води сметка и за останатите објекти кои би можеле да бидат загрозени од евентуални „неконтролирани“ минирања.

Кај површински копови, каде карпестиот амтерија не може директно да бидат откопан, минирањето речиси е скојдневна и вообичаена практика за фрагментација на карпите. Сепак, активностите на минирање генерираат сеизмички сигнали кои се шират низ земјата и воздухот, потенцијално влијаејќи на околината, блиските структури и безбедносните размислувања. Разбирањето на карактеристиките на овие сеизмички сигнали е од клучно значење за проценка на нивните ефекти и спроведување на соодветни стратегии за ублажување [3].

Сеизмичките сигнали генерирани со минирање се во суштина вибрации на земјата произведени од ненадејно ослободување на енергија за време на детонацијата на експлозивното полнење. Овие вибрации се шират како од местото на експлозијата во форма на бранови на компресија (P) и смолкнување (S). Дополнително, експлозијата може да произведе и бранови под притисок на воздухот, кои патуваат низ воздухот како звучни односно ударни воздушни бранови.

Снимањето на сеизмичките сигнали дава можност за анализирање на истите со цел да се добијат нови информации кои би помогнале во оптимизирањето на процесот на дупчење и минирање, од една страна како и минимизање на негативните ефекти врз околината од друга страна. Во трудот е направена анализа на сеизмички сигнали од минирања на површински копови. За процесирањето на сеизмичките сигнали се предлага користење на FFT [4], STFT [6] и други видови на филтри.

2. КАРАКТЕРИСТИКИ НА СЕИЗМИЧКИ СИГНАЛИ

Секој сеизмички сигнал си има свои карактеристики како што се фреквенција, амплитуда и енергија, облик, начин на ширење, време на пристигнување и време на траење на истиот. Во продолжение е дадено кратко објаснување за нив:

Фреквенција: Сеизмичките сигнали предизвикани од минирање вообичаено е да имаат широк фреквентен опсег, кој се протега од нискофреквентни компоненти (неколку Hz) до компоненти со повисока фреквенција (неколку стотици Hz). Специфичната содржина на фреквенција зависи од фактори како што се дупчечко – минерските параметри, пред се начинот на иницирање, количината и видот на експлозивот и геолошките карактеристики на средината во која се врши минирањето и преност на сеизмичките бранови.

Амплитуда и енергија: Амплитудата на сеизмичкиот сигнал ја рефлектира количината на енергија ослободена од експлозијата. Експлозиите со поголема енергија имаат тенденција да произведуваат сеизмички сигнали со поголема амплитуда. Дистрибуцијата на енергија низ различни фреквенциски интервали дава увид во ефектите на експлозијата на земјата.

Облик на бран: Обликот на бранот на сеизмичкиот сигнал предизвикан од минирање зависи од различни фактори, вклучувајќи го типот на експлозив, длабочината на експлозијата и пред се геолошките услови. Најнапред пристигнуваат брановите на компресија и истите се проследени со бранови на смолкнување, а понекогаш и површински бранови, при што секој придонесува за „заедничкиот“ брановиден облик.

Карактеристики на ширење: сеизмичките сигнали покажуваат слабеење додека се оддалечуваат од изворот на експлозијата. Геолошкиот состав, пред се структурно – тектонските карактеристики, топографијата и растојанието од местото на минирање влијаат на процесот на намалување на амплитудата на сигналот.

Време на пристигнување: Сеизмичките сигнали пристигнуваат на местото на снимање во различни времиња, што одговараат на различните типови бранови (односно P, S и површински бранови). Затоа е добро да се врши снимање на повеќе места (локации) во исто време, за да би можела да се пресметува локацијата на експлозијата и класификација на самиот процес на индуцирана сеизмика.

Времетраење на сигналот: Времетраењето на сеизмичкиот сигнал предизвикан од минирање е поврзано со временското траење на самата експлозија. Краткотрајните експлозии од мали минерски серии, кои се иницирани без милискудни забавувачи, може да резултираат со релативно кратки временски сигнали, додека подолготрајните експлозии од големи серии односно примени на масовни минирања, генерираат временски продолжени сеизмички сигнали. Токму ова процесирањето на ваквите сеизмички сигнали создава можност за поцелосна слика за извршеното минирање и неговите ефекти врз околината.

Разбирањето на карактеристиките на сеизмичките сигнали генерирани со минирање е од клучно значење поради неколку причини:

Дефинирање и оптимизирање на дупчечко – минерските параметри: Познавањето на карактеристиките на сеизмичкиот сигнал може да помогне во оптимален избор на повеќе дупчечко – минерски параметри со цел да се минимизираат вибрациите додека се максимизира „бараната“ фрагментацијата на карпите. На овој начин ќе може да се оптимизираат на пример дијаметарот на минска дупчотина, нејзин агол, шемата на минирањето, односно растојанието помеѓу дупчотини и редови, шема на иницирање и избор на оптимални милисекундни закаснувачи и сл.

Можност за усогласување со законската легислатива: Процесирањето на сеизмичките сигнали треба да биде во согласност со современите европски и светски стандарди, нормативи и директиви кои ја третираат оваа област. Пред се хомогенизацијата и прифаќањето на EUROCOD 8 – Дизајн на објекти отпорни на земјотреси. Многу легислативи ги специфицираат ограничувањата на вибрациите на земјата и прекумерниот притисок на воздухот што произлегуваат од минирањата. Точната карактеризација помага да се обезбеди поефикасна усогласеност со овие прописи.

Влијание врз животната средина: Правилно карактеризирање на вибрациите предизвикани од минирањата на површинските копови помага во проценката на потенцијалните влијанија врз животната средина врз објектите структурите, екосистемите и блиските заедници.

Зоглемување на безбедноста и здравјето на вработените и луѓето во непосредната околина: Следењето и анализата на сеизмичките сигнали придонесуваат за обезбедување на безбедноста на персоналот во рудникот и на жителите во непосредната близина на рудникот.

3. ТЕХНИКИ НА ПРОЦЕСИРАЊЕ НА СЕИЗМИЧКИ СИГНАЛИ

Сеизмичките сигнали кои се индуцирани од минирањата во површинските копови, воглавно содржат микс на значајни сигнални компоненти и многу разни видови на шумови. За да ги селектираме за нас битните информации од овие сигнали, од суштинско значење е да се применат техники за обработка на сигнали кои ефикасно го филтрираат несаканиот шумови и го подобруваат квалитетот на сеизмичките податоци. Шумови се јавуваат од најразлични причини, на пример шум од околу 50 Hz се јавува од високонапонските кабли во површинските копови, од трансформаторите, машините на електричен погон и сл. Потоа несакани вибрации односно шумови има од механичките вибрации на машините и опремата на површинските копови, на пример дампера, багери, булдозер, дробилки и сл. Исто така, како извори на шум можат да бидат и ветерот, дождот, потоа амбиенталните (пасивни) вибрации. Од овие причини добро би било да се најнапред издвојат неколку факти кои се директно поврзани со понатамошното процесирање и анализирање на сеизмичките сигнали и тоа:

Селекција на извори на шум: Потребна е селекција на сите можни извори на шум, нивно дефинирање преку спектрална анализа на фреквенции со цел преку примена на филтри да се изврши нивно одстранување на основните сигнал.

Дефинирање на сооднос сигнал-шум (SNR): Во многу случаи, сигналот што сакаме да го анализираме може да биде и помал и „скриен“ во однос на шумот. За ова се потребни многу понапредни техники за постпроцесирање на сигналите.

Нестационарност: Сеизмичките сигнали често покажуваат нестационарно однесување поради промените во карактеристиките на изворот, медиумот за ширење и инструментот примач.

Во Табела 1 се прикажани основните филтри и техники за процесирање на сеизмички сигнали со посебен осврт на филтри за одстранување или намалување на шумот.

Освен овие техники и филтри кои се наведени во оваа табела, постојат и други, но според наша проценка истите би можеле да се применат со помала ефикасност во анализата на сеизмичките сигнали од индуцирани потреси од минирања. Такви се на пример техниката SSP (Sparse Signal Processing). Од претходно споренатите, во продолжение на трудот е даден осврт на примена на STFT филтерот [6] и сегментирањето на сеизмичките сигнали.

Табела 1. Филтри и техники за одстранување или намалување на шум

Техника/филтер	Опис	Предности	Недостатоци
Линеарни филтри	LP Филтер (Low Pass Filter): Со овој филтер се овозможува филтрирање (пропуштање) на сигнали со фреквенции помали од дефинираната фреквенција. Главна примена му е во одстранување на високо фреквентни шумови. На пример фреквенцијата на ограничување на LP филтерот кај индуцираните сигнали од минирања е околу 25 Hz. Ова ќе значи дека ќе бидат пропуштени (филтрирани) само сигналите со фреквенции помали од 25 Hz.	Многу ефективен филтер.	Главен недостаток му е неправилниот избор на т.н. ограничувачка фреквенција, а со тоа и „губење“ на сигнали над гранична оваа фреквенција.

	<p>HP Филтер (High-Pass Filter): Спротивен на LP филтерот. Со него можат да се одстранат ниско фреквентни шумови. Истиот може да се користи во рударството, кога е потребно одстранување на шумови предизвикани од амбиентални сигнали (пасивна сеизмика).</p>	Едноставен филтер со голема ефикасност	Често пати „многу“ ретко користен при филтрирање на сеизмички индуцирани сигнали поради фактот дека нивните фреквенции се релативно ниски (на пример од 0 – 25 Hz).
	<p>BP Филтер (Band-Pass Filter): Филтрирање на фреквенции во одреден интервал. Еден од најприменуваните филтри.</p>	Многу ефикасен и применлив филтер особено при филтрирање на сеизмички сигнали.	Бара големо претходно познавање на природата на сеизмичките сигнали околу „поверојатен“ избор на интервал за филтрирање.
Анализа време – фреквенција	<p>FFT (Fast Fourier Transformation): FFT е најприменуваната алатка за анализирање и филтрирање на податоци. Со неа може да се направи фреквентна и спектрална анализа, како и редуцирање на шумови кај сеизмички сигнали, потоа да се коригираат амплитудите на сигналите и др.</p>	Многу применлива математичка алатка во процесирањето на сигнали.	Користење на претпоставки дека сеизмичките сигнали се стационарни и линеарни, што не е секогаш применливо. Можност да искористите фреквентни компоненти во сеизмичките податоци најчесто неточно се интерпретираат.
	<p>STFT кратко временска фуриева трансформација (Short-Time Fourier Transform STFT): Овозможува анализа време – фреквенција за кратки временски интервали. Можност за голема примена кај индуцирани сеизмички сигнали од минирања, пред сè од аспект на нивното кратко траење (до 3 - 5 секунди). Ако снимката е предолга се врши нејзино сегментирање со т.н. преклопување на сигналите од претходен во нареден прозор (сегмент).</p>	Многу лесно детектирање на промените на фреквенцијата во однос на анализираното време.	Бара големо внимание и знаење при одредување на временските сегменти, особено ако сниманиот сигналот е временски предолг.

	<p>Wavelet трансформација: Многу ефективна алатка за анализа на сигнали со нестационарни (динамички) шумови. Ова е можеби една од најинтересните анализи за која се потребни многу знаења и истражувања. Постојат научни обиди за дефинирање на т.н. wavelet „мал“ бран (сигнал) кој е карактеристичен за одредена средина, земјотрес, подрачје, можеби тип на експлозив, вид на минирање. Секако ова е во зоната на научна фикција која се надеваме дека во иднина ќе стане и вообичаена пракса</p>	<p>Многу ефективна трансформација а особено кај сигнали со нестационарни (динамички) шумови.</p>	<p>Бара многу знаења, со вклучување на интуитивни влезни параметри.</p>
<p>Адаптивно филтрирање</p>	<p>Wiener филтер: Проценување на т.н. чист сигнал со минимизирање на средните квадратни грешки. Многу ефективен филтер, но бара познати податоци за статистики на шумови кои се одстрануваат.</p>	<p>Користи статистики на шумови за зголемување на точноста на филтрираниот сигнал.</p>	<p>Потребни претходни бази на сигнали со шумови.</p>
	<p>ANC филтер (Adaptive Noise Canceling): Користи адаптивен филтер за проценка и одстранување на шумот од третирањето на сигналот. Бара познавање на сеизмичките карактеристики на бранот (сигналот) кој се анализира.</p>	<p>Може да биде ефикасен за веќе „осознаени“ сигнали од стационарни извори, на пример вибрации од машини и сл.</p>	<p>Релативно послаба применливост кај филтрирање на сеизмички сигнали од минирања.</p>
<p>Статистички методи</p>	<p>PCA анализа (Principal Component Analysis): Статистичка метода за трансформирање на сниманите податоци од сигналот со максимизирање на варијансата а со тоа одвојување на главниот сигнал од шумот.</p>	<p>Дава можности за квалитетна статистичка анализа.</p>	<p>Често пати можни се отстапувања особено кај нестационарни сигнали што е најчест случај кај сеизмичките сигнали од минирањата.</p>
	<p>ICA анализа (Independent Component Analysis): Анализа за издвојување на мултиваријабилен сигнал во статистички независни сигнали.</p>	<p>Ефективна анализа кај сложени сеизмички сигнали.</p>	<p>Процесот на издвојување може да повлече и дел од главниот сигнал.</p>

5. ПРИМЕНА НА STFT ФИЛТЕРОТ

STFT филтерот овозможува време – фреквентно анализирање на сигналот со примена на фуриевата трансформација на мали сегменти од сигналот. Овој филтер овозможува анализа како фреквентната „содржина“ на сигналот се менува со текот на времето. Примената на STFT филтерот се изведува во следните чекори:

Сегментација: Сигналот е поделен на кратки сегменти кои се преклопуваат, често користејќи функција за прозори (сегменти) за да се намали спектралната интерференција од големиот број на податоци.

Анализа на фреквентен домен: FFT се применува на секој сегмент, создавајќи спектрограм кој ја прикажува содржината на фреквенцијата на сигналот со текот на времето.

Идентифицирање на „изненадувачки“ настан. Со помош на овој филтер можна е идентификување на „изненадувачки“ динамички настани во сеизмичките сигнали, како што се ненадејни регистрирани потреси. Ова се репрезентира преку промени во содржината на фреквенцијата што може да укаже на конкретни настани.

Локализација на време-фреквенција: Обезбедува увид во временските интервали каде што одредени компоненти на фреквенцијата се најистакнати, помагајќи во идентификацијата на изворот. Со ова може да се потврдат сеизмичките активности предизвикани од одреден вид на извор (на пример: извор на минирање со фреквенции од 5 – 100 Hz, или извор од земјотреси со фреквенции од 0 – 4 Hz).

Ако t е времето на сниманиот сигнал а ω е фреквенцијата, STFT филтерот математички може да се претстави како:

$$X(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot \omega(\tau - t) \cdot e^{-j\omega\tau} dt$$

Каде:

$x(\tau)$ – е оригиналниот сигнал,

$\omega(\tau-t)$ – е т.н. функција на прозорот што го претставува сегментот од сигналот, центриран околу времето t и

$e^{-j\omega\tau}$ е експоненцијална функција на фреквенцијата ω и времето t .

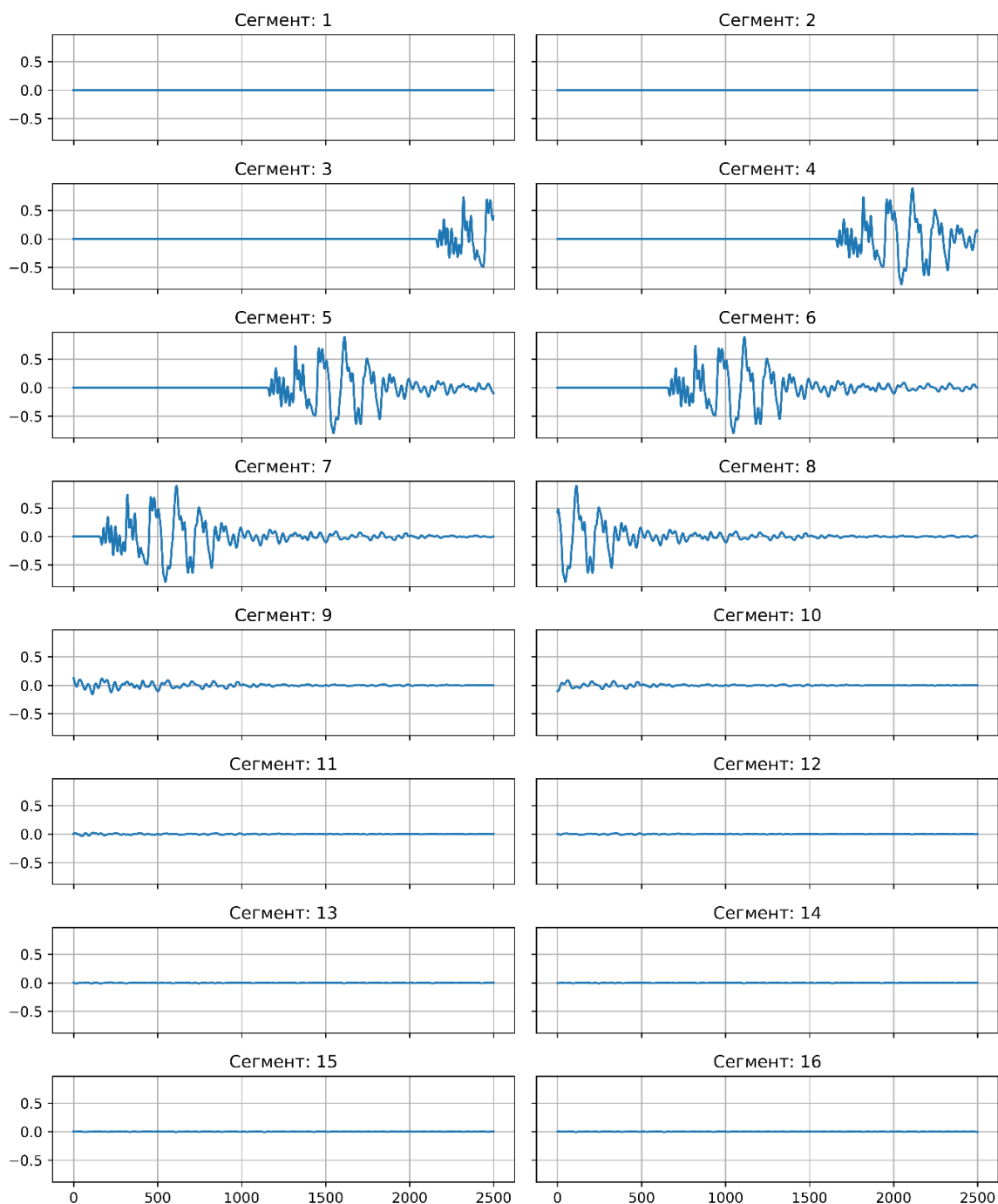
За потребите на овој труд е искористен сниман сигнал со 8 вертикални геофони (поставени на растојание од 5 метри еден од друг, радијално во однос на точката на минирање. Регистрираните сигнали на сеизмичките потреси се издвоени во должина од 10 секунди со фреквенција на семплирање од 1000 Hz и AD (аналогно – дигитална) 24 bit – на конверзија. Од оваа снимка заради подобра прегледност е прикажан само првиот сигнал од 8 – те верикални геофони (сл. 1).



Слика 1. Сеизмички сигнал од геофон 1

Локацијата на првиот геофон е на растојание од околу 550 метри од минерскиот блок (прво иницирана минска дупчотина). Првиот сигнал од минерскиот блок е сегментиран во 16 прозори секој по 2500 семпли (време од 2.5 sec), со преклопување од 500 семпли (време од 1/2 sec). Сегментирањето на сигналот е направено со развиен софтвер во python со користење на библиотеките matplotlib [2] и numpy [1] (сл. 2).

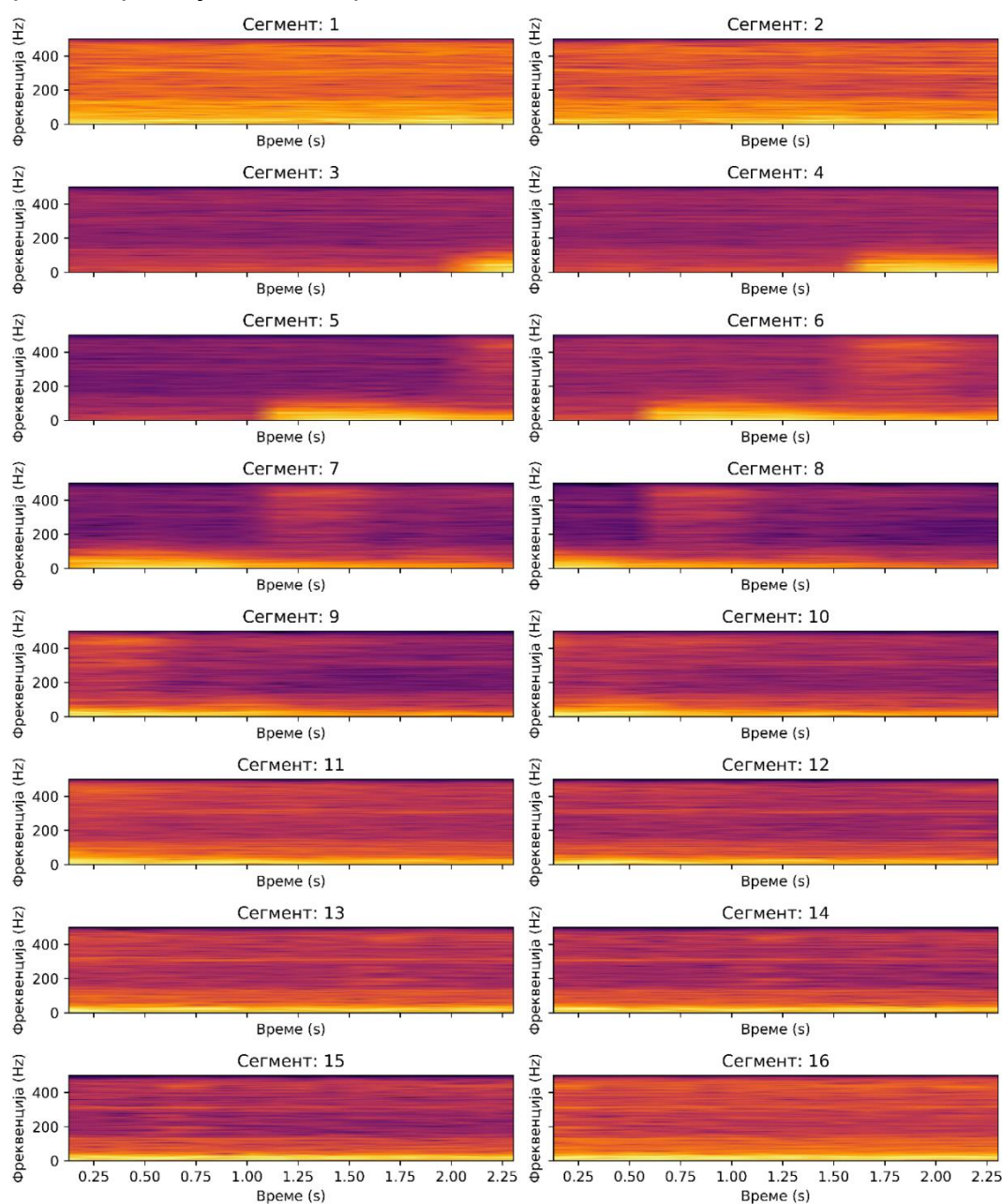
Следен чекор е да се направи STFT филтрирање на сите 16 сегменти. Ова е направено со развиен модул во python со користење на претходно наведените библиотеки и scipy [5] библиотеката. На сл. 3 е даден приказ од направеното филтрирање, по сегменти.



Слика 2. Сегментирање на сеизмички сигнал

6. ДИСКУСИЈА

STFT филтерот на изворниот код покажа дека за време на 3, 4, 5, 6, 7 и 8 - от сегмент (временски „прозор“ од главниот удар од сеизмичкиот бран од минирањето), постои сигнал со најголеми промени во фреквенцијата во однос на времето (сл. 3). Ова го потврдува фактот дека е настанато регистрирање на сеизмички потреси со фреквенции до 500 Hz изразени преку поголеми амплитуди. Филтрираниот сигнал во останатите сегменти (прозори) укажува од сеизмичка неактивност. Исклучок прави 9, 10, 11, 12 и 13 – от сегмент, каде се гледа појава на т.н. смирување на тлото од главната експлозија од минирањето. Со помош на повеќеканално снимање во повеќе точки би можеле да се добијат компаративни податоци за однесувањето на тлото во зависност од изведеното минирање и растојание на теренот.



Слика 3. STFT филтрирање по сегменти

Примена на компаративна анализа од процесирани сеизмички сигнали од повеќеминирање на ниво на површински коп би ни дале информации како за однесувањето на тлото, така и за самото минирање, односно избраните дупчечко – минерски параметри.

7. ЗАКЛУЧОК

Во овој труд е направен обид за приказ на процесирање на индуцирани сигнали од минирања во површински копови. Основната задача на минирањата освен да ја обезбедат потребната фрагментација и гранулација потребно е и да ги минимизираат негативните влијание врз околината како во однос на сеизмички бранови така и звучни и ударни воздушни бранови. Токму во трудот е даден осврт на можно процесирање на сеизмички сигнали од минирањата со цел да се дојде до поквалитетни информации за однесувањето на брановите кон околината. Како пример е користен STFT филтерот за анализа на зависноста на фреквенцијатра од времето на сеизмичките бранови. Ова е само идеја за понатамошни истражувања кои би требало да опфатат многу пообемни мерења, анализи и толкувања. Во овој контекст предлагаме, секојдневни снимања на сеизмичките потреси при секое минирање кое се изведува на површинскиот коп. Создавањето на база на податоци од сеизмички сигнали дава можност за многу подетални пост процесирања. Кон ова, добро би било да се вклучат и мерења и на хоризонталните компоненти на сеизмичките сигнали со користење на хоризонтални геофони или 3 компонентни акцелерометри.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J. et al. Array programming with NumPy. *Nature* 585, 357–362 (2020). DOI: [10.1038/s41586-020-2649-2](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2).
- [2] Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in science & engineering*, 9(3), pp.90–95.
- [3] Krzysztof Fuławka, Piotr Mertuszka, Witold Pytel, Marcin Szumny, Tristan Jones, Seismic evaluation of the destress blasting efficiency, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 14, Issue 5, 2022, Pages 1501-1513, ISSN 1674-7755, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.010>.
- [4] Jinhai Zang, High Accuracy Interpolation of The Seismic Track Based on FFT, 5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, Hyderabad-2004, India PP 204-207
- [5] Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E. Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, Stéfan J. van der Walt, Matthew Brett, Joshua Wilson, K. Jarrod Millman, Nikolay Mayorov, Andrew R. J. Nelson, Eric Jones, Robert Kern, Eric Larson, CJ Carey, İlhan Polat, Yu Feng, Eric W. Moore, Jake VanderPlas, Denis Laxalde, Josef Perktold, Robert Cimrman, Ian Henriksen, E.A. Quintero, Charles R Harris, Anne M. Archibald, Antônio H. Ribeiro, Fabian Pedregosa, Paul van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors. (2020) SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272.
- [6] Yu C, Wang S and Cheng L (2022) Application of high-resolution processing in seismic data based on an improved synchrosqueezing transform. *Front. Earth Sci.* 10:956817. doi: 10.3389/feart.2022.956817