

# Podvodna eksplozija u mirnoj vodi kao plošno opterećenje na armiranobetonsku konstrukciju

---

Durdov, Toma

Doctoral thesis / Doktorski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:256710>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-02**



GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK  
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

*Repository / Repozitorij:*

[Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek](#)



Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku

Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

Poslijediplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

Doktorski rad

Podvodna eksplozija u mirnoj vodi kao  
plošno opterećenje na armiranobetonsku  
konstrukciju

mr. sc. Toma Durđov, dipl. ing. građ.

Osijek, 2. rujan 2024.

Rad posvećujem supruzi Marjanki, kćerki Jeleni, sinovima Marinu i Boži te minerima,  
braniteljima i mornarima.

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek  
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Postgraduate University Study Programme in Civil Engineering

Doctoral dissertation

Underwater explosion in still water as a surface load on a  
reinforced concrete structure

Mr. sc. Toma Durdov, civil engineer

Osijek, September 2, 2024

Prosudbena povjerenstva i bibliografski podaci

### **Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorskog rada**

Povjerenstvo za prihvaćanje teme doktorskog rada imenovano na 4. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 24. siječnja 2024. godine:

1. izv. prof. dr. sc. Hrvoje Draganić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednik Povjerenstva
2. izv. prof. dr. sc. Jurko Zovkić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, drugi član
3. prof. dr. sc. Boris Trogrlić, redoviti profesor u trajnom zvanju, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, treći član

Tema i mentor doktorskog rada prihvaćeni su odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 5. redovitoj sjednici održanoj 22. veljače 2024. godine.

### **Povjerenstvo za ocjenu doktorskog rada**

Povjerenstvo za ocjenu doktorskog rada imenovano na 7. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 23. travnja 2024. godine:

1. izv. prof. dr. sc. Hrvoje Draganić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednik Povjerenstva
2. izv. prof. dr. sc. Jurko Zovkić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, drugi član
3. prof. dr. sc. Boris Trogrlić, redoviti profesor u trajnom zvanju, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, treći član

Doktorski rad je prihvaćen odlukom Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku na 10. redovitoj sjednici održanoj 17. srpnja 2024. godine.

## **Povjerenstvo za obranu doktorskog rada**

Povjerenstvo za obranu doktorskog rada imenovano na 10. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, održanoj 17. srpnja 2024. godine:

1. izv. prof. dr. sc. Hrvoje Draganić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, predsjednik Povjerenstva
2. izv. prof. dr. sc. Jurko Zovkić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, drugi član
3. prof. dr. sc. Boris Trogrlić, redoviti profesor u trajnom zvanju, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, treći član
4. izv. prof. dr. sc. Ivan Radić, izvanredni profesor, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, zamjenski član
5. doc. dr. sc. Mario Jeleč, docent, mag. ing. aedif., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, zamjenski član

Doktorski rad javno je obranjen 2. rujna 2024. godine na Građevinskom i arhitektonskom fakultetu Osijek Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Doktorski rad sadržava 371 stranicu, 170 ilustracija, 25 tablica, 0 dodataka i 72 citirane publikacije.

Mentor doktorskog rada je prof. dr. sc. Damir Varevac, redoviti profesor, dipl. ing. građ., Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek.

Istraživanje u okviru doktorskog rada pripada znanstvenom području tehničkih znanosti, znanstvenom polju građevinarstvo.

## Izjava o akademskoj čestitosti

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je doktorski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno prepisan iz necitiranog rada te kako nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem kako nisam prijavio doktorski rad s istovjetnom temom na drugom studiju Sveučilišta ili na drugom sveučilištu.

Izjavljujem i svojim potpisom dajem suglasnost za pohranu dokorskog rada u institucijski, sveučilišni i nacionalni digitalni repozitorij.

Osijek, 2. rujan 2024.

mr. sc. Toma Durdov, dipl. ing. građ.



(ime i prezime i potpis autora)





## **Predgovor**

Podvodna eksplozija je nedovoljno istražena zbog svoje složenosti i kompleksnosti. Istraživanje je potrebno zbog unaprjeđenja raspoloživih postupaka projektiranja obalnih i hidrotehničkih građevina, sigurnih i pouzdanih na djelovanje podvodne eksplozije kao posljedice ratnih i terorističkih djelovanja. Razvoj računala i računalne znanosti omogućava razvoj sve složenijih računalnih programa i numeričkih modela za istraživanje podvodne eksplozije korištenjem numeričkih simulacija.

Istraživanje podvodne eksplozije provedeno je na numeričkim modelima primjenom računalnog programa Ansys LS Dyna, dobiveni rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima i utvrđeno je prihvatljivo odstupanje rezultata. Rezultati istraživanja mogu se koristiti za daljnja istraživanja i u inženjerskim proračunima građevina izloženih djelovanju podvodne eksplozije i unaprjeđenju nacionalne zakonske regulative o prostornom planiranju, projektiranju i građenju obalnih i hidrotehničkih građevina.

## Zahvala

Profesoru Varevcu, koji je bio studijski savjetnik i mentor prilikom izrade doktorskog rada, dugujem neizmjernu zahvalnost na podršci, razumijevanju i strpljenju, te usmjeravanju i pomoći, tijekom studija, istraživanja i izrade doktorskog rada.

Profesoru Trogrliću, s Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, iskreno se zahvaljujem na potpori, podršci i iskazanom velikom interesu za temu doktorskog rada.

Profesoru Draganiću, iskreno se zahvaljujem na potpori pri pripremi i instalaciji računalnog programa ANSYS za potrebe istraživanja te velikoj pomoći pri oblikovanju i usklađivanju rada.

Gospodinu Delikostidisu i gospodinu Josipoviću, iz tvrtke ANSYS, iskreno se zahvaljujem na pomoći pri korištenju računalnog programa LS Dyna.

Profesoru Božiću, iskreno se zahvaljujem na iskazanom velikom interesu za temu, i svekolikoj podršci, pri upisu studija.

Veliko hvala mojoj obitelji koja mi je osigurala preduvjete za višegodišnji mukotrpan, zahtijevan i vrlo kompleksan intelektualni rad na proučavanju i istraživanju ove vrlo složene i zahtjevne tehničke zadaće i poticala me na uspješan završetak.

Također se zahvaljujem kolegama koji su me poticali i davali mi podršku kao i minerima, koji su mi na gradilištu pomogli pri upoznavanju s praktičnim minerskim radovima i proračunima miniranja te kolegama inženjercima i minerima iz sustava OS RH (Oružanih snaga Republike Hrvatske).

Svakako se želim zahvaliti i svim prijateljima i kolegama, na razumijevanju, podršci i pomoći.

Hvala Zakladi hrvatskih branitelja iz Domovinskog rata i članova njihovih obitelji na pruženoj potpori i podršci tijekom studija.

Zahvaljujem se članovima povjerenstva na iskazanom interesu kroz postavljena pitanja, te komentarima i prijedlozima za poboljšanje i usklađivanje rada.

## Sažetak

Djelovanja terorističkih skupina predstavljaju prijetnju nacionalnoj sigurnosti sve većeg broja zemalja u svijetu, a posebno su izložene članice NATO-a (engl. North Atlantic Treaty Organization). Hrvatska je članica NATO i Europske unije, čije su oružane snage i druge institucije uključene u razne mirovne misije i druge aktivnosti, što u određenoj mjeri povećava mogućnost eventualnih terorističkih napada. Opasnost je još izraženija nedavnim događanjima od početka vojne agresije Rusije na Ukrajinu.

Teroristička djelovanja utječu na sigurnost, koja je preduvjet sigurnosti građana, imovine, prometa, gospodarstva i drugih društvenih aktivnosti. Podvodna eksplozija može biti rezultat terorističkih aktivnosti, ratnih djelovanja ili gospodarskih i drugih aktivnosti. Teroristi pri napadima koriste eksploziv i razne improvizirane eksplozivne naprave, koje se mogu jednostavno izraditi uz male troškove. Terorističko djelovanje, kao primjer asimetričnog ratovanja, je sve češće, pa proučavanje djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine je znanstveno područje od posebnog interesa za nacionalnu sigurnost.

Proučavanje učinka eksplozije na podvodne građevine uključuje sagledavanje potrebnih mjera za zaštitu od oštećenja i rušenja te istodobno razmatranje načina postizanja jednostavnih metoda popravka. Ove analize su vrlo značajne i potrebne pri prostornom planiranju, projektiranju i građenju, ovisno o ciljevima potencijalnih vojnih djelovanja u području operacija kao i potencijalnih terorističkih djelovanja.

Jedna od mogućih meta spomenutih napada su obalne i hidrotehničke građevine te infrastruktura, koje su vitalne građevine i čije uništenje može imati za posljedicu presijecanje linija komunikacija, u području operacija, prestanak opskrbe električnom energijom i plinom te velike materijalne štete i velikog broj ljudskih žrtava (vojnika i civila).

Težište doktorskog rada je na pripremi numeričkih modela i provedbi numeričkih simulacija podvodne eksplozije u računalnom programu LS Dyna za potrebe realizacije istraživanja. Numeričke simulacije su provedene za više skupina modela, kod kojih su eksploziv i voda diskretizirani konačnim elementima različite prikladne veličine.

Ekperimentalna istraživanja učinka podvodne eksplozije prilično su složena, opasna i skupa, zbog čega se provode računalne numeričke simulacije. Intenzivan razvoj računalne tehnologije, softverskih programa i numeričkih modela omogućio je dobivanje preciznijih rezultata, što može značajno smanjiti potrebu za eksperimentalnim istraživanjima.

Nadalje, opisan je postupak modeliranja i prezentirani su numerički modeli podvodne eksplozije u računalnom programu LS Dyna. Zatim su provedena istraživanja podvodne eksplozije na numeričkim modelima te su modeli validirani. Prezentirani su i analizirani dobiveni rezultati istraživanja, a zatim su dane preporuke za praktično korištenje računalnog programa za inženjerski proračun djelovanja podvodne eksplozije kao i smjernice za daljnje istraživanje.

Ubrzan razvoj računalne tehnike i računalnih programa omogućuje napredak u proučavanju i rješavanju ove vrlo složene i kompleksne zadaće na vrlo složenim numeričkim modelima uz primjenu sve složenijih i moćnijih računalnih programa.

Daljnja istraživanja treba usmjeriti prema ciljanim eksperimentalnim istraživanjima u cilju provjere dobivenih rezultata i potvrđivanju numeričkih modela kao i daljnji razvoj numeričkih modela i računalnih programa za provedbu cjelovite numeričke simulacije podvodne eksplozije.

**Ključne riječi:** podvodna eksplozija, udarni val, plinski mjehur, pulsiranje plinskog mjehura, eksperimentalni rezultati, empirijski izrazi, program LS Dyna, numerički model, numeričke simulacije i numerički rezultati.

## **Abstract**

The actions of terrorist groups present a threat to the national security of an increasing number of countries around the world, and the members of NATO (English: North Atlantic Treaty Organization) are especially exposed. Croatia is a member of NATO and the European Union, whose armed forces and other institutions are involved in various peacekeeping missions and other activities, which, to a certain extent, increases the possibility of possible terrorist attacks. Recent events increasingly confirm this since the beginning of Russia's military aggression against Ukraine.

Terrorist activities affect security, a prerequisite for the protection of citizens, property, traffic, the economy, and other social activities. An underwater explosion can be the result of terrorist activities, war activities or economic and other activities. Terrorists use explosives and various improvised explosive devices in their attacks due to low cost and ease to make.. Terrorist activity, as an example of asymmetric warfare, is more and more frequent. Hence, the study of the effects of underwater explosions on underwater structures is a scientific area of particular interest for national security.

Studying the effect of the explosion on underwater buildings, considering the necessary measures that will enable protection against damage and demolition, on the one hand, and the other hand, considering the possibility of achieving as superficial damage and repair as possible. These analyses are very significant and necessary in spatial planning, design, and construction, depending on the objectives of potential military actions in the field of operations as well as possible terrorist actions. One of the possible targets of the mentioned attacks is coastal and hydro-technical buildings and infrastructure, which are vital buildings and the destruction of which can result in the cutting of communication lines in the area of operations, the cessation of electricity and gas supply, and significant material damage and a large number of human casualties (soldiers and civilian).

The focus of the doctoral dissertation is on the preparation of numerical models and the implementation of numerical simulations of an underwater explosion in the LS Dyna computer program for research implementation. Numerical simulations were performed for several groups of models, where explosives and water were discretised with finite elements of different appropriate sizes.

Experimental investigations of underwater explosion effects are pretty complex, dangerous, and expensive, so computer numerical simulations are carried out, which enables the intensive development of computers and computer programs and numerical models, which result in more acceptable results and can significantly reduce the number of necessary experimental investigations.

Furthermore, the modelling procedure is described, and numerical models of the underwater explosion in the LS Dyna computer program are presented. Then, underwater explosion research was conducted using numerical models, and the models were validated. The obtained research results were presented and analysed. Then, recommendations were given for the practical use of a computer program for the engineering calculation of underwater explosion effects and guidelines for further research.

The rapid development of computer technology and computer programs enables progress in the study and solution of this very complex and complex task on very complex numerical models with the application of increasingly complex and powerful computer programs.

Further research should be directed towards targeted experimental studies to verify the obtained results confirm the numerical models and further develop numerical models and computer programs to implement a complete numerical simulation of an underwater explosion.

**Keywords:** underwater explosion, shock wave, gas bubble, gas bubble pulsation, experimental results, empirical formulas, LS Dyna program, numerical model, numerical simulations, and numerical results.



## Sadržaj

1	UVOD.....	35
1.1	Predmet i ciljevi istraživanja .....	38
1.1.1	Hipoteze istraživanja.....	40
1.2	Istraživanje podvodne eksplozije.....	40
1.3	Očekivani znanstveni doprinosi.....	43
1.4	Razvoj i metodološke pretpostavke istraživanja .....	44
1.5	Struktura rada .....	45
2	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA.....	47
2.1	Početna istraživanja .....	47
2.2	Djelovanje podvodne eksplozije .....	47
3	PODVODNA EKSPLOZIJA .....	65
3.1	Općenito o eksplozijama.....	65
3.2	Eksplozivi .....	67
3.2.1	Osnovna svojstva eksploziva .....	67
3.2.2	Mehanizam eksplozije .....	71
3.2.3	Faze podvodne eksplozije .....	77
3.3	Osnove teorije akustičnog vala.....	77
3.3.1	Osnovna svojstva elastične sredine .....	79
3.3.2	Refleksija zvučnog vala pri okomitom upadu .....	80
3.3.3	Refleksija vala pri kosom upadu.....	81
3.4	Brzina zvuka u morskoj vodi .....	82
3.5	Hidrostatički tlak.....	83
3.6	Parametri eksplozivnog polja u vodi .....	84
3.6.1	Analički izrazi za izračun djelovanja podvodne eksplozije .....	87
3.6.2	Empirijski izrazi za određivanje parametara podvodne eksplozije .....	88
3.7	Razlike između eksplozije u zraku i vodi .....	101
3.8	Podjela podvodnih eksplozija prema dubini.....	103
3.9	Vrste podvodne eksplozije s obzirom na ograničenja .....	105
3.9.1	Podvodne eksplozije u neograničenoj sredini .....	105
3.9.2	Podvodna eksplozija ograničena slobodnom površinom vode .....	106
3.9.3	Podvodna eksplozija ograničena dnom.....	111
3.9.4	Empirijske jednačbe za proračun podvodne eksplozije ograničene dnom .....	114



3.9.5 Podvodna eksplozija ograničena slobodnom površinom vode i dnom ....	116
3.10 Plinski mjehur .....	120
3.11 Mjerni sustavi za mjerenje parametara eksploziva i podvodne eksplozije .....	131
3.11.1 Mjerni sustav podvodne eksplozije UWB 10 .....	131
3.11.2 Fotonski Doppler brzinomjer (VELOREX PDV) .....	132
3.11.3 Optički analizator procesa eksplozije (OPTIMEX 8) .....	133
3.11.4 Detonacijski kalorimetar (DCA 25) .....	134
3.11.5 Koenen test (KT300) .....	135
3.11.6 Najmanja laboratorijska detonacijska komora (LDC25) .....	136
4 DJELOVANJE PODVODNE EKSPLOZIJE.....	137
4.1 Općenito o djelovanju podvodne eksplozije.....	137
4.2 Načini djelovanja podvodne eksplozije .....	138
4.3 Parametri djelovanja podvodne eksplozije.....	138
4.4 Djelovanje podvodne eksplozije u ograničenoj sredini .....	140
4.5 Oblik udarnog vala .....	142
4.6 Djelovanje udarnog vala i plinskog mjehura .....	143
4.7 Djelovanje plinskog mjehura .....	145
4.8 Matematičke formulacije i numerički model djelovanja eksplozije na hidrotehničke građevine (brane) .....	149
4.8.1 Matematičke formulacije i numerički model djelovanja eksplozije .....	149
4.8.2 Numerički model djelovanja eksplozije na nasute brane .....	155
4.8.3 Numerički model djelovanja eksplozije na betonsku branu .....	156
4.9 Procjena rizika djelovanja eksplozije na podvodne građevine.....	161
4.10 Zaštita podvodne građevine od djelovanja eksplozije .....	162
5 OSNOVE MODELIRANJA PODVODNE EKSPLOZIJE .....	167
5.1 Općenito .....	167
5.2 Matematička formulacija podvodne eksplozije .....	168
5.3 Računalni programi za numeričke simulacije podvodne eksplozije .....	169
5.4 Softver LS Dyna i USA .....	169
5.5 Software LS Dyna .....	170
5.6 Metoda spektralnih elemenata .....	170
5.7 Lagrange Eulerova metoda (ALE) .....	171
5.7.1 Hidrokod .....	172
5.7.2 Eulerovi hidrokodovi .....	173
5.7.3 Lagrangeov hidrokod .....	173

5.8 Dvostruka asimptotska aproksimacija (DAA) .....	175
5.8.1 Metoda konačnih elemenata.....	176
5.8.2 Mreža.....	177
5.8.3 Konačni elementi .....	178
5.8.4 Integracija vremena .....	181
5.8.5 Granično i početno stanje .....	183
5.9 Djelovanje podvodne eksplozije na konstrukciju.....	185
5.9.1 Opis materijala.....	189
5.9.2 Jednadžbe stanja .....	192
5.9.3 Linearni polinom .....	192
5.9.4 Gruneisen .....	193
5.9.5 Jednadžba stanja eksploziva JWL .....	194
5.9.6 Kontrola „hourglassa“ .....	195
6 NUMERIČKO MODELIRANJE PODVODNE EKSPLOZIJE.....	197
6.1 Eksperimentalni rezultati tlaka podvodne eksplozije .....	197
6.2 Utjecaj dubine eksplozivnog punjenja na ukupni tlak.....	200
6.3 Numeričko modeliranje podvodne eksplozije u neograničenoj sredini .....	204
6.3.1 Opis numeričkog postupka i pretpostavke .....	204
6.3.2 Pretpostavke numeričkog postupka.....	205
6.3.3 Osnovni elementi numeričkog modela podvodne eksplozije.....	207
6.3.4 Rubni uvjeti na graničnim plohama numeričkog modela.....	209
6.3.5 Diskretizacija eksplozivnog punjenja oblika kugle i vode oblika kocke .....	210
6.3.6 Odabir vremena trajanja numeričke simulacije .....	211
6.3.7 Analiza rezultata dobivenih numeričkim postupkom .....	212
6.3.8 Rezultati numeričkog postupka dobiveni za različite rubne uvjete .....	213
6.3.9 Analiza rezultata tlaka dobivenih numeričkim postupkom .....	217
6.3.10 Ovisnost numeričkih rezultata o obliku i veličini prostora vode .....	219
6.3.11 Ovisnost numeričkih rezultata tlaka o veličini konačnih elemenata eksploziva .....	227
6.3.12 Ovisnost numeričkih rezultata tlaka o veličini konačnih elemenata vode .....	230
6.3.13 Ovisnost numeričkih rezultata o veličini konačnih elemenata i prostora vode .....	236
6.3.14 Dijagrami tlak - vrijeme na određenim udaljenostima .....	242
6.3.15 Ovisnost brzine širenja udarnog vala o veličini konačnih elemenata.....	246
6.4 Utjecaj oblika eksplozivnog punjenja na dijagram tlaka .....	248
6.5 Numeričko modeliranje podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode .....	260

---

6.5.1	Opis numeričkog postupka i pretpostavke .....	260
6.5.2	Empirijski izrazi za izračun tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i eksplozije ograničene slobodnom površinom vode .....	261
6.5.3	Osnovni elementi numeričkih modela podvodne eksplozije .....	263
6.5.4	Utjecaj slobodne površine vode na vrijednost tlaka .....	269
6.6	Numeričko modeliranje podvodne eksplozije ograničene dnom .....	279
6.6.1	Opis numeričkog postupka i pretpostavke .....	279
6.6.2	Empirijski izrazi za izračun tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i eksplozije ograničene dnom.....	280
6.6.3	Osnovni elementi numeričkih modela podvodne eksplozije .....	282
6.7	Numeričko modeliranje podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i dnom .....	291
6.8	Numeričko modeliranje podvodne eksplozije u mirnoj vodi kao plošno opterećenje na podvodne građevine.....	311
6.8.1	Osnovne pretpostavke .....	311
6.8.2	Modeliranje interakcije fluida i konstrukcije.....	312
6.8.3	Numerički rezultati .....	313
6.8.4	Utjecaj mehaničkih karakteristika konstrukcije na numeričke rezultate .....	324
6.9	Numeričko modeliranje podvodne eksplozije u mirnoj vodi kao plošno opterećenje na armiranobetonsku gravitacijsku branu .....	335
6.9.1	Osnovne pretpostavke i modeliranje podvodne eksplozije u mirnoj vodi kao plošno opterećenje na gravitacijsku branu .....	335
6.9.2	Numerički rezultati .....	339
7	ZAKLJUČAK .....	349
7.1	Općenito .....	349
7.2	Zaključci.....	354
7.3	Izvorni znanstveni doprinosi.....	358
7.4	Smjernice za daljnje istraživanje .....	359
8	BIBLIOGRAFIJA .....	361

## Popis ilustracija

Slika 2.1 Vremenska promjena tlaka [11] .....	51
Slika 2.2 Prikaz položaja i veličine plinskog mjehura u vremenu, koji odgovaraju krivulji tlak – vrijeme [11].....	52
Slika 2.3 Dijagram izmjerenog tlaka od podvodne eksplozije u blizini područja kavitacije [12] .....	54
Slika 2.4 Raspodjela glavnih naprezanja na lučnoj brani [23].....	59
Slika 2.5 Presjek nasute brane s prikazom položaja središta eksplozije [24].....	60
Slika 2.6 Numerički rezultati razvoja vlačnih naprezanja i sloma: (a) 0.05 ms; (b) 0.10 ms; (c) 0,20 ms; (d) 0,35 ms; (e) 0,60 ms i (f) 2,0 ms [25] .....	62
Slika 3.1 Shema širenja stvarne detonacije; 0 – Eksplozivna smjesa prije detonacije; 1 - Fronta detonacije (predstavlja udarni val); 2 – Završena kemijska reakcija (C-J ravnina); 3 - Plinski produkti detonacije; a - Širina zone kemijske reakcije; $\lambda_s$ – Širina fronta detonacije (udarnog vala) i b - Širina zone detonacije [33]	72
Slika 3.2 Shema odvijanja procesa detonacije cilindričnog eksplozivnog .....	73
Slika 3.3 Promjena tlaka udarnog vala u funkciji $W^{1/3}/R$ [32] .....	74
Slika 3.4 Promjena tlaka (a) udarnog vala od centra eksploziva do kontakta s okolinom i (b) udarnog vala u okolinu [27].....	75
Slika 3.5 Shematski prikaz odvajanja udarnog vala od plinovitih produkata eksplozije [26].....	76
Slika 3.6 Shematski prikaz podvodne eksplozije (produkti eksplozije i udarni val) [34] .	78
Slika 3.7 Shema refleksije i prolaza udarnog vala na graničnoj plohi [34] .....	80
Slika 3.8 Refleksija i lom akustičke zrake pri kosom upadu [34] .....	82
Slika 3.9 Udarni val i plinski mjehur pri podvodnoj eksploziji [32] .....	86
Slika 3.10 Dijagram promjene tlaka udarnog vala u funkciji vremena [32] .....	87
Slika 3.11 Graf jedinične funkcije [27] .....	93
Slika 3.12 Ovisnosti maksimalnog tlaka na fronti udarnog vala o udaljenosti.....	99
Slika 3.13 Dijagram vremenske promjene tlaka eksplozije u zraku i u vodi [11] i [47] .	101
Slika 3.14 Usporedbe dijagrama tlaka i impulsa eksplozije u zraku i pod vodom [50]	103
Slika 3.15 Plitka podvodna eksplozija na dubini od 61 m [50] .....	104
Slika 3.16 Duboka podvodna eksplozija, u trenutku nastanka raspršene kupole [50]	105

Slika 3.17 Snellov zakon refleksije udarnog tlačnog vala od slobodne površinu vode (Shin 2004.) [20].....	106
Slika 3.18 Prikaz tipičnog područja kavitacije ispod slobodne površine vode [17] ....	107
Slika 3.19 Područje kavitacije podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode [20] .....	109
Slika 3.20 Grafički prikaz refleksije udarnog vala podvodne eksplozije od slobodne površine vode [8 ] i [27].....	109
Slika 3.21 Promjena tlaka podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode [27] .....	111
Slika 3.22 Snellov zakon refleksije udarnog tlačnog vala od dna [20].....	113
Slika 3.23 Refleksija udarnog vala podvodne eksplozije od slobodne površine vode i dna [15], [20] i [41] .....	113
Slika 3.24 Refleksije udarnog vala od dna [20], [41] i [15].....	114
Slika 3.25 Refleksije udarnog vala od slobodne površine vode i dna [17] i [53] .....	117
Slika 3.26 Promjena tlaka podvodne eksplozije u ograničenoj sredini [17].....	119
Slika 3.27 Grafički prikaz širenje plinskog mjehura .....	121
Slika 3.28 Pulsiranje plinskog mjehura, promjene radijusa i tlaka u vremenu [32].....	123
Slika 3.29 Promjene radijusa plinskog mjehura u vremenu, za 250 g eksploziva, na dubini od 90 m [9].....	124
Slika 3.30 Plinski mjehur u trenutku maksimalnog radijusa [32] .....	125
Slika 3.31 Pulsiranje plinskog mjehura u vremenu [3] .....	126
Slika 3.32 Dijagram promjene tlaka na udaljenosti 4,5 m od središta eksplozije, masa eksplozivnog punjenja 0,5 kg [17] .....	126
Slika 3.33 Plinski mjehur od TNT mase 136,08 kg, na dubini 15,24 m [32].....	128
Slika 3.34 Tlak eksplozije eksploziva TNT mase 136,08 kg, na dubini 15,24 m [3].....	130
Slika 3.35 Položaj mjernog sustava (UWB 10) i dijagram tlaka [57].....	131
Slika 3.36 Mjerni sustava (VELOREX PDV) i dijagram brzine [57] .....	132
Slika 3.37 Optički analizator procesa eksplozije (OPTIMEX 8) i dijagrami [57] .....	134
Slika 3.38 Detonacijski kalorimetar (CCA 25) [58] .....	135
Slika 3.39 Koenenov uređaj [57].....	136
Slika 3.40 Detonacijska komora [59].....	136
Slika 4.1 Dijagram ovisnosti maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala o udaljenosti od središta eksplozije .....	139

Slika 4.2 Vremenski prikaz promjene tlaka od udarnog i reflektiranih valova [6] .....	141
Slika 4.3 a) – (c) horizontalni presjeci udarnog vala kroz horizontalnu os eksploziva, (d) 3D prikaz udarnog vala i (e) – (f) vertikalni presjeci udarnog vala [39] .....	142
Slika 4.4 Interakcija reflektiranog udarnog vala i plinskog mjehura (horizontalni presjeci) (a)– (c) komponenta brzine x i (d) – (f) apsolutne brzine [39] .....	143
Slika 4.5 Polje tlaka podvodne eksplozije (a) – (c) horizontalni presjeci kroz horizontalnu os eksploziva i (d) – (f) vertikalni presjeci [39] .....	145
Slika 4.6 Podvodna eksplozija ispod trupa broda, djelovanje plinskog mjehura na kobilicu broda [17] .....	146
Slika 4.7 Podvodna eksplozija ispred podvodne građevine, djelovanje udarnog vala i plinskog mjehura na građevinu .....	148
Slika 4.8 Uzvodno vertikalno lice gravitacijske brane izloženo snažnom djelovanju udarnog vala [62] .....	151
Slika 4.9 Grafički prikaz prolaza i refleksije udarnog vala na uzvodnom vertikalnom licu gravitacijske brane [62] .....	152
Slika 4.10 Presjek gravitacijske nasute brane s nagnutim ekranom (uzvodno lice) od betonskih ploča izloženo djelovanju snažnog udarnog vala [59] .....	155
Slika 4.11 Presjek betonske brane s prikazom dimenzija i mreže konačnih elemenata [59] .....	156
Slika 4.12 Grafički prikaz promjene tlaka udarnog vala u vremenu [59] .....	157
Slika 4.13 Mreža konačnih elemenata brane i vode te položaj centara eksplozije [59] .....	158
Slika 4.14 Vremenska promjena horizontalnog pomak čvora 1 i čvora 2 [59] .....	159
Slika 4.15 Zaštita podvodne građevine od djelovanja podvodnog miniranja sa zavjesom od mjehurića zraka [28] .....	166
Slika 5.1 Prikaz mreže Lagrangeove i Eulerove metode [64] .....	174
Slika 5.2 Prikaz 1-D Lagrangeove i 1-D Eulerove formulacije [44] .....	175
Slika 5.3 Prikaz modela UNDEX-a eksploziv, fluid i konstrukcija .....	178
Slika 5.4 Prikaz osmočvornog elementa fluida i konstrukcije [65] .....	179
Slika 5.5 Prikaz prostora eksploziva (kugla) (pid 11) i elementa (H 46503) .....	180
Slika 5.6 Belytschko - Tsay četverokutni element [63] .....	181
Slika 5.7 Krug vremenske integracije [63] .....	182
Slika 5.8 Shema podataka za unos u program LS Dyna, INITIAL _DETONARION [63] .	184

Slika 5.9 Prikaz 2D Lagrangeove mreže i 2D Eulerove mreže i 2D mreže Lagrange - Euler [16] .....	186
Slika 5.10 Interakcija fluida i konstrukcije na kontaktnoj plohi [16] .....	187
Slika 5.11 Prikaz formulacije temeljene na prijenosu sile u točkama segmenata [16]	188
Slika 5.12 Prikaz 1-D Lagrangeove i 1-D Eulerove formulacije prijenosa sile .....	189
Slika 5.13 „Hourglass“ modovi osmočvornog konačnog elementa s jednom integracijskom točkom [65] .....	196
Slika 6.1 Eksperimentalne vrijednosti maksimalnog tlaka na određenim udaljenostima [40] .....	198
Slika 6.2 Utjecaj djelovanja hidrostatičkog tlaka na podvodnu eksploziju [37] .....	201
Slika 6.3 Globalni prostorni model podvodne eksplozije .....	206
Slika 6.4 Reducirani model podvodne eksplozije, prostor vode kocka, brida 2000 cm .....	207
Slika 6.5 Diskretizacija eksploziva, presjek (lijevo) kroz središte i površina (desno), dimenzije plohe konačnog elementa na površini kugle i podaci o kugli .....	210
Slika 6.6 Numerički model podvodne eksplozije i diskretizirani model (desno) .....	211
Slika 6.7 Širenje udarnog vala u vodi u modelu s propusnom granicom .....	214
Slika 6.8 Širenje udarnog vala u vodi u modelu s nepropusnom granicom .....	216
Slika 6.9 Usporedni prikaz promjene tlaka u smjeru propusne i nepropusne granične plohe .....	218
Slika 6.10 Usporedni prikaz promjene tlaka u smjeru propusne i nepropusne granične plohe .....	219
Slika 6.11 Diskretizirani modeli podvodne eksplozije raznih oblika i dimenzija .....	222
Slika 6.12 Ovisnost tlaka o obliku i veličini volumena vode, konačni elementi vode 25x25x25 cm .....	223
Slika 6.13 Ovisnost tlaka o obliku i veličini volumena vode, konačni elementi vode 20x20x20 cm .....	226
Slika 6.14 Ovisnost maksimalnog tlaka o veličini konačnih elemenata eksploziva .....	229
Slika 6.15 Ovisnost maksimalnog tlaka o veličini konačnih elemenata vode .....	231
Slika 6.16 Ovisnost maksimalnog tlaka o veličini konačnih elemenata vode .....	234
Slika 6.17 Diskretizirani modeli podvodne eksplozije raznih dimenzija .....	238
Slika 6.18 Ovisnost tlaka o veličini volumena i konačnih elemenata vode .....	239
Slika 6.19 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 1,5 m .....	243

Slika 6.20 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 5 m .....	244
Slika 6.21 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 10 m .....	244
Slika 6.22 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 15 m .....	245
Slika 6.23 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 20 m .....	245
Slika 6.24 Dijagram širenja udarnog vala u vodi za različite veličine konačnih elemenata .....	247
Slika 6.25 Numerički modeli podvodne eksplozije s različitim oblikom eksplozivnog naboja, kugla (lijevo) i kocka (desno) .....	249
Slika 6.26 Širenje udarnog vala u modelu s eksplozivnim punjenjem oblika kugle .....	250
Slika 6.27 Širenje udarnog vala u vodi s eksplozivnim nabojem oblika kocke .....	251
Slika 6.28 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 1,5 m .....	252
Slika 6.29 Prikaz dijela volumena vode i eksplozivnih punjenja (lijevo) i njihove anvelope (desno) .....	253
Slika 6.30 Prikaz konačnih elemenata na kojima je odabrana vrijednost tlaka .....	254
Slika 6.31 Tlak za eksplozivni naboj oblika kugle i kocke na udaljenosti 37 cm.....	255
Slika 6.32 Promjena tlaka lak za eksplozivne naboje oblika kugle i kocke .....	255
Slika 6.33 Prikaz konačnih elemenata na kojima je odabrana vrijednost tlaka .....	257
Slika 6.34 Promjena tlaka za eksplozivne naboje oblika kugle i kocke .....	257
Slika 6.35 Promjena tlaka za eksplozivne naboje oblika kugle i kocke .....	258
Slika 6.36 Numerički modeli podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom .....	266
Slika 6.37 Širenje udarnog vala podvodne eksplozije u vodi.....	267
Slika 6.38 Refleksija udarnog vala od slobodne površine vode .....	268
Slika 6.39 Formiranje područja kavitacije i širenje udarnog reflektiranog vala u vodi nakon refleksije .....	269
Slika 6.40 Promjene tlaka u vremenu u smjeru propusne plohe i ograničenja slobodnom površinom vode i zraka iznad vode.....	270
Slika 6.41 Dijagrami ovisnosti maksimalnog tlaka o udaljenosti od središta eksplozije .....	271
Slika 6.42 Dijagrami ovisnosti negativnog tlaka o udaljenosti od središta eksplozije ..	272
Slika 6.43 Usporedni prikaz promjene tlaka na dubini 4 m za različite dubine eksplozije .....	273
Slika 6.44 Dijagrami promjene tlaka u elementima na različitim dubinama.....	274
Slika 6.45 Dijagrami promjene minimalnog tlaka na različitim dubinama .....	275



Slika 6.46 Dijagram promjene tlaka u elementu 48050, dubina eksploziva 19,80 m ..	276
Slika 6.47 Dijagram promjene tlaka u elementu 54050, dubina eksploziva 12,2 m ....	277
Slika 6.48 Dijagram promjene tlaka u vremenu u elementu 6050, dubina eksploziva 6,1 m.....	278
Slika 6.49 Numerički modeli podvodne eksplozije u slobodnoj i ograničenoj sredini dnom.....	284
Slika 6.50 Dijagram promjene tlaka u elementu 90050 za različite modele .....	285
Slika 6.51 Dijagram promjene tlaka u točki A ( $x=5,0$ m; $y=0,0$ m; $z=-2,5$ m).....	286
Slika 6.52 Numerički modeli podvodne eksplozije u ograničenoj sredini sa spriječenim pomakom dna .....	287
Slika 6.53 Dijagram promjene tlaka u elementu 54050 za različite modele .....	288
Slika 6.54 Dijagrami promjene tlaka u elementima 296550, 181550 i 90050.....	289
Slika 6.55 Modeli podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode .....	292
Slika 6.56 Dijagrami tlaka podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode .....	293
Slika 6.57 Modeli podvodne eksplozije u slobodnoj i u ograničenoj sredini.....	295
Slika 6.58 Dijagrami promjene tlaka u elementu 90050 za ograničenu i eksploziju u neograničenoj sredini .....	296
Slika 6.59 Dijagrami promjene tlaka u elementima 69050 i 112550 .....	297
Slika 6.60 Dijagrami promjene tlaka u elementima 21050 i 160550 .....	298
Slika 6.61 Dijagram promjene tlaka u točki C, dobiven empirijskim izrazima.....	299
Slika 6.62 Modeli podvodne eksplozije u slobodnoj i u ograničenoj sredini.....	300
Slika 6.63 Dijagrami promjene tlaka u elementu 183050 za ograničenu i neograničenu eksploziju .....	301
Slika 6.64 Dijagrami vremenske promjene tlaka u elementu 115550.....	302
Slika 6.65 Dijagrami vremenske promjene tlaka u elementu 249050.....	303
Slika 6.66 Dijagrami promjene tlaka u elementima 316550 i 48050 .....	304
Slika 6.67 Modeli podvodne eksplozije u slobodnoj i u ograničenoj sredini.....	305
Slika 6.68 Dijagrami promjene tlaka u elementu 99671 za ograničenu i neograničenu eksploziju .....	306
Slika 6.69 Modeli podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i interakciji s konstrukcijom .....	313
Slika 6.70 Dijagrami promjene tlaka za neograničenu sredinu i interakciju s konstrukcijom .....	314

Slika 6.71 Dijagram maksimalnog tlaka na plohi kontakta vode i betona .....	315
Slika 6.72 Dijagrami vremenske promjene tlaka u konačnim elementima vode 45 i 50 .....	316
Slika 6.73 Raspodjela tlaka i širenje udarnog vala u vodi, $t=3094,4 \mu s$ .....	317
Slika 6.74 Raspodjela naprezanja $\bar{\sigma}_{xx}$ na betonskom bloku, $t=2693,6 \times 10^{-3} \mu s$ .....	318
Slika 6.75 Dijagrami vremenske promjene komponenti normalnih naprezanja u elementu betona 46513 .....	319
Slika 6.76 Dijagrami vremenske promjene komponenti posmičnih naprezanja u elementu betona 46513 .....	320
Slika 6.77 Tenzor naprezanja u konačnom elementu betona 48513 .....	321
Slika 6.78 Dijagrami vremenske promjene $\bar{\sigma}_{xx}$ naprezanja u elementima betona .....	322
Slika 6.79 Dijagrami vremenske promjene pomaka čvorova .....	323
Slika 6.80 Modeli podvodne eksplozije u interakciji s konstrukcijom .....	326
Slika 6.81 Dijagrami promjene tlaka za interakciju fluida s konstrukcijama .....	327
Slika 6.82 Dijagrami vremenske promjene tlaka u elementima vode .....	328
Slika 6.83 Raspodjela naprezanja i širenje udarnog vala u različitim betonima .....	329
Slika 6.84 Vremenska promjena naprezanja u elementu 46513 .....	330
Slika 6.85 Vremenska promjena naprezanja u elementu betona 46513 .....	331
Slika 6.86 Dijagrami horizontalnog pomaka čvorova .....	332
Slika 6.87 Presjek betonske gravitacijske brane .....	337
Slika 6.88 Model udarnog djelovanja podvodne eksplozije na branu .....	339
Slika 6.89 Raspodjela tlaka i širenje udarnog vala u vodi .....	340
Slika 6.90 Raspodjela naprezanja $\bar{\sigma}_{xx}$ u betonskoj brani .....	342
Slika 6.91 Dijagrami vremenske promjene komponenti normalnih naprezanja .....	343
Slika 6.92 Dijagrami vremenske promjene komponenti posmičnih naprezanja .....	344
Slika 6.93 Dijagrami vremenske promjene naprezanja $\bar{\sigma}_{xx}$ u elementima betona .....	345
Slika 6.94 Pomaka čvorova elemenata betona .....	345
Slika 6.95 Dijagrami vremenske promjene pomaka čvorova .....	346
Slika 6.96 Dijagrami vremenske promjene pomaka čvorova .....	346

## Popis tablica

Tablica 3.1 Koeficijenti pretvorbe eksploziva [31] .....	68
Tablica 3.2 Brzina detonacije eksploziva [32] .....	69
Tablica 3.3 Volumen plinovitih produkata eksplozije [26] .....	70
Tablica 3.4 Koeficijenti empirijskih izraza za TNT raznih autora [42, 20, 23, 3, 18 i 44] ....	97
Tablica 3.5 Koeficijenti empirijskih izraza za različite vrste eksplozivne tvari [20] .....	98
Tablica 3.6 Odstupanje tlaka za različite koeficijente u empirijskom izrazu .....	100
Tablica 5.1 Karakteristike materijala (MAT_009-NULL) za vodu i zrak [62] .....	190
Tablica 5.2 Karakteristike materijala za eksploziv TNT [62] .....	191
Tablica 5.3 Karakteristike materijala za Beton C 30/37 .....	192
Tablica 5.4 Podaci za jednadžbe stanja - EOS - Linearni polinomi za zrak [66] .....	193
Tablica 5.5 Podaci za jednadžbu stanja - EOS Gruneisen za vodu [66] .....	194
Tablica 5.6 Podaci za jednadžbu stanja - EOS JWL za eksploziv TNT [66] .....	194
Tablici 6.1 Vrijednosti maksimalnog tlaka udarnog vala na određenim udaljenostima .....	199
Tablica 6.2 Vrijednosti tlaka na frontu udarnog vala i hidrostatički tlak .....	203
Tablica 6.3 Karakteristike materijala (MAT_009-NULL) za vodu [66] .....	207
Tablica 6.4 Podaci za jednadžbu stanja - EOS Gruneisen za vodu [66] .....	208
Tablica 6.5 Karakteristike materijala za eksploziv TNT [66] .....	208
Tablica 6.6 Podaci za jednadžbu stanja - EOS JWL za eksploziv TNT [66] .....	208
Tablica 6.7 Vrijednosti maksimalnog tlaka za volumen vode oblika kocke i kvadara .....	224
Tablica 6.8 Odstupanja maksimalnog tlaka za volumen vode oblika kocke i kvadra .....	226
Tablica 6.9 Odstupanja maksimalnog tlaka na modelima od empirijskih rezultata .....	232
Tablica 6.10 Odstupanja maksimalnog tlaka na modelima od empirijskih rezultata .....	235
Tablica 6.11 Vrijednosti maksimalnog tlaka za različite volumene i konačne elemente vode .....	240
Tablica 6.12 Tlak za eksplozivni naboj oblika kugle i kocke na udaljenosti od 37 cm .....	256
Tablica 6.13 Tlak za eksplozivne naboje oblika kugle i kocke na udaljenosti od 51 cm .....	259

## Popis kratica

ABAQUS	softverski paket za analizu konačnih elemenata i numeričke računalne simulacije inženjerskih zadataća
ALE	Arbitrary-Lagrange-Eulerova metoda
ANSYS	softverski paket za analizu konačnih elemenata i numeričke računalne simulacije inženjerskih zadataća
BEM	(engl. <i>Block Element Modifier</i> ) modeliranje blok elementima
C	klasa betona
CAFE	(engl. <i>Cellular Automaton Finite Element</i> ) program za modeliranje fluida
CASA	središte za napredne analize konstrukcija
CDF	(engl. <i>Computable Document Format</i> ) standardni računalni program
CFD	(engl. <i>Computational Fluid Dynamics</i> ) računalni program dinamike fluida
C-J	Chapman - Jouguetova ravnina
CSM	(engl. <i>Computational Solid Mechanics</i> ) računalni program mehanike čvrstog tijela
C-4	vrsta eksploziva (engl. <i>composition 4</i> )
DAA	(engl. <i>Doubly Asymptotic Approximation</i> ) dvostruka asimptotska aproksimacija
DCA	detonacijski kalorimetar
DYSMAS/ELC	hidrokod za modeliranje interakcije podvodne eksplozije i konstrukcije
DYNA3D	trodimenzionalni program konačnih elemenata
EOS	(engl. <i>Equation of state</i> ) jednadžba stanja materijala
EOS JWL	Jones-Wilkins-Lee (JWL)
EU	Europska unija
FEM	(engl. <i>Finite Element Method</i> ) metoda konačnih elemenata
FSI	(engl. <i>Fluid-Structure Interaction</i> ) interakcija fluida i konstrukcije
GRP	polimerne trake ojačane staklenim vlaknima
HBX-1	(tekuća smjesa TNT-a, RDC-a i aluminija) vrsta eksploziva
H-6	(smjesa RDX/TNT/aluminij/vosak 45/30/20/5 (USA)) vrsta eksploziva
KT300	Koenenov test

KV	(engl. <i>Laboratory detonation chamber</i> ) laboratorijska detonacijska komora
LS Dyna i USA	(engl. <i>Underwater Shock Analysis (USA) code and LS Dyna</i> ) računalni program za proračun odgovora broda ili podmornice na djelovanje podvodne eksplozije
LSTC	Livermore Software Technology Corporation
LS Dyna	(engl. <i>Livermore Software Dyna</i> ) softverski paket za analizu konačnih elemenata i numeričke računalne simulacije inženjerskih zadataća
Mat_Null	model materijala bez krutosti u programu LS Dyna
MAT_RTH	model betona u programu LS Dyna
MAT_PLASTIC_KINEMATIC	model tla, betona i čelika u programu LS Dyna
MSC-Dytran	softverski paket za analizu konačnih elemenata i numeričke računalne simulacije inženjerskih zadataća
MW	(engl. <i>Mine warfare</i> ) Minsko ratovanje (miniranje i razminiranje)
NATO	(engl. <i>North Atlantic Treaty Organization</i> ) Organizacija Sjevernoatlantskog sporazuma
OPTIMEX PDV	(engl. <i>photonic Doppler</i> ) brzinomjer za mjerenje profila brzine
OS RH	Oružane snage Republike Hrvatske
PRONTO/SPH	modificiran program hidrodinamike glatkih čestica
PR	Poissonov koeficijent
RDX	vrsta eksploziva (Cyclonite; Hexogen; smjesa TNT-a- i dodatka)
RO	gustoća materijala
SAD	Sjedinjene Američke Države
SEM	metoda spektralnih elemenata za podvodnu eksploziju
SIGY	granica popuštanja materijala
SPC	nepropusna granična ploha u programu LS Dyna
TNT	trinitrotoluen, vrsta eksploziva
UNDEX	(engl. <i>Underwater Explosion</i> ) podvodna eksplozija
UWB	(engl. <i>ultra wideband, ultra-wide band and ultraband</i> ) radio tehnika
WTC	(engl. <i>World trade centre</i> ) Svjetski trgovački centar

## Popis simbola

### Latinična slova

$A$	konstanta koja ovisi o vrsti i specifičnoj težini eksploziva
$A_1, A_2, A_3$ i $A_4$	koeficijenti empirijskih izraza koji ovise o vrsti eksploziva
$a$	duljina brida kocke eksploziva
$A_{elementa}$	ploština najveće plohe elementa
$A_{reacoupling}$	ploština kontaktne plohe tekućine i krutog tijela
$B$	konstanta koja ovisi o vrsti i specifičnoj težini eksploziva
$c$	brzina zvuka u materijalu
$C$	klasa betona
$C_d$	matrica prigušenja
$c_1$	brzina zvuka u sredini 1
$C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5,$ i $C_6$	koeficijenti polinoma jednadžbe stanja, koji ovise o vrsti materijala
$D_k$	prostorna dijagonala kocke eksploziva
$d_e$	brzina detonacije eksploziva
$D$	dubina središta eksplozije u odnosu na slobodnu površinu vode
$d_k$	dijagonala plohe kocke eksploziva
$d$	udaljenost od središta eksplozivnog punjenja do dna
$E_u$	energija udarnog vala
$e$	baza prirodnog logaritma ( $e=2,71828$ )
$E$	modul elastičnosti
$E_j$	unutarnja energija po jedinici početnog volumena
$E_0$	energija detonacije eksploziva
$F$	energija oslobođena pri detonaciji
$F_1$ i $F_2$	funkcija gustoće i brzine detonacija
$F_{coupling}$	sila interakcije tekućine i krutog tijela

$f(\tau)$	funkcija eksponencijalnog opadanja tlaka
$f$	frekvencija udarnog vala
$g$	gravitacijska konstanta Zemlje ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )
$G(x, z)$ i $F(x, z)$	donja i gornja granica područja kavitacije
$h_w$	visina vodenog stupca
$I$	impuls udarnog vala
$k$ i $K$	koeficijenti koji ovise o vrsti eksploziva (za TNT $k=1$ )
$K_d$	matrica krutosti
$k_0$	koeficijent koji ovisi o vrsti tla na dnu
$K_1, K_2, K_3, K_4$ i $K_5$	koeficijenti empirijskih izraza koji ovise o vrsti eksploziva
$l$	koeficijent koji ovisi o vrsti eksploziva
$L_c$	koeficijent volumena i ploštine najveće plohe elementa
$M$	matrica masa
$m$	koeficijent koji ovisi o vrsti eksploziva
$N$	broj stupnjeva slobode
$P$	maksimalni tlak eksplozije u elementu
$P_{atm}$	atmosferski tlak
$P_{coupling}$	tlak na kontaktu vode i konstrukcije
$p_b$	tlak u plinskom mjehuru
$P_{cj}$	Chapman-Jogetov tlak
$p_1$	tlak u sredini 1
$P_1$	maksimalni tlak eksplozije u zraku
$P_c$	konstanta koja ovisi o vrsti i specifičnoj težini eksploziva
$p_d(t)$	tlak na površini brane
$P_h$	hidrostatički tlak
$P_{hu}$	ukupni hidrostatički tlak uključujući i tlak zraka
$P_{in}$	unutarnji tlak na kontaktu odsječaka

$P_m$	maksimalni tlak udarnog vala
$P_{m1}$	maksimalni tlak prvog pulsiranja plinskog mjehura
$P_{okv}$ i $P_{okz}$	tlak okoline u vodi i zraku
$P_{out}$	vanjski tlak na kontaktu odsječaka
$P_{eos}$	tlak iz jednadžba stanja na temelju relativnog volumena
$p_x$	pomak točke
$p_w(t)$	tlak udarnog vala, koji je u funkciji vremena, u određenoj točki vode
$p_{max}(x,z,t)$ i $p(t,R)$	promjena tlaka udarnog vala u funkciji vremena i položaja mjerne točke
$Q_M$	koeficijent numeričke stabilizacije u programu LS Dyna
$Q_x$	Specifična energije mase eksploziva
$Q_{TNT}$	TNT ekvivalent
$R$	udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke
$R_w$	vektorska funkcija raspodjele udarnog vala
$R_1$ i $R_2$	konstanta eksploziva u jednadžbi stanja
$ir_2$	udaljenost od središta imaginarnog eksploziva iznad slobodne površine vode do promatrane točke za proračun vremenske promjene tlaka u određenoj točki
$r_3$	udaljenosti od središta imaginarnog eksploziva ispod dna do promatrane točke, za proračun vremenske promjene tlaka u određenoj točki
$R_{ep}$	radijus eksplozivnog punjenja
$R_m$ i $R_{max}$	radijus plinskog mjehura i prvi maksimalni radijus plinskog mjehura
$R_V$	koeficijent refleksije
$S_w$	slanost morske vode
$S$ i $S_T$	relativna promjena gustoće, stišljivost tekućine
$S_1, S_2$ i $S_3$	konstante jednadžbe stanja, koje ovise o materijalu
$T$	period udarnog vala
$t$	vrijeme
$t_b$	vrijeme detonacije
$T_1$	prvi (prirodni) period plinskog mjehura
$t_1$	vrijeme dolaska fronte izravnog udarnog vala do promatrane točke



$t_2$	vrijeme dolaska fronte udarnog vala od središta eksplozije do slobodne površine vode i reflektiranog udarnog vala od slobodne površine vode do promatrane točke
$t_3$	vrijeme dolaska fronte udarnog vala do dna i reflektiranog udarnog vala od dna do promatrane točke
$t_p$	vrijeme trajanja pozitivnog tlaka udarnog vala
$t_w$	temperatura vode
$T_v$	koeficijent prjenosa vala
$[\ddot{u}]$	vektor ubrzanja čvorova
$[\dot{u}]$	vektor brzine čvorova
$[u]$	vektor pomaka čvorova
$V_0$ i $V_T$	početni i povećani volumen sredine
$V_e$	volumen eksploziva
$V_R$	relativni volumen
$v_c$	konstanta koja ovisi o vrsti i specifičnoj težini eksploziva
$V_{elementa}$	volumen elementa
$v_1$	brzina titranja u sredini 1
$v_x$	komponenta brzine materijala
$W$	masa eksplozivnog naboja
$z$	koordinate promatrane točke
$Z_1$	valna impedancija sredine 1
$z_s$	skalirana udaljenost

#### Grčka slova

$\alpha$	koeficijenti koji ovisi o vrsti eksploziva
$\alpha$ , $\alpha'$ i $\alpha''$	kutovi loma zvuka
$\alpha_{gr}$	granični kut refleksije
$\alpha_u$	kut upada zrake
$\alpha_l$	kut loma zrake
$\alpha_1$ i $\alpha_2$	koeficijenti u jednadžbi gibanja
$\beta$	koeficijent koji ovisi o vrsti eksploziva

$\gamma_0$	konstanta jednadžbe stanja koja ovisi o vrsti eksploziva
$\gamma$	specifična težina vode
$\dot{\epsilon}$	brzina deformacije
$\Delta t$	vremenski korak
$\Delta t_{critical}$	kritični vremenski korak
$\Delta x$	horizontalna udaljenost između čvorova
$\Delta V$	relativno povećanje volumena
$\theta_1$	vremenska konstanta drugog pulsiranja plinskog mjehura
$\theta$	vremenska konstanta opadanja tlaka udarnog vala
$\lambda$	valna duljina
$\lambda_p$	zona nadtlaka
$\mu$	viskoznost tekućine
$\xi_1, \xi_2$	karakteristike viskoznog prigušenja
$\rho, \rho_0$ i $\rho_T$	gustoća materijala, početna i trenutna gustoća
$\sigma_a$	naprezanje u materijalu
$\sigma_d$	posmično naprezanje
$\sigma(x, y, z)$	tenzor naprezanja u konačnom elementu
$\tau_p$	vrijeme djelovanja nadtlaka
$\tau_j$	vrijeme kašnjenja koje odgovara vremenu potrebnom da val prevali udaljenost od promatrane točke do točke $x_j$
$(x, z)$	koordinate promatrane točke u ravnini
$\varphi$	kut koji zatvara spojnica središta eksplozije i promatrane točke s horizontalom
$\omega_1, \omega_2$	dominantne vlastite frekvencije konstrukcije
$\omega$	konstanta eksploziva u jednadžbi stanja



# 1 UVOD

Tijekom povijesti ljudskog roda borbe i ratovi su se stalno pojavljivali i svaka strana u sukobu je pokušavala pronaći neko sredstvo ili način na koji će pobijediti protivnika. Ostvarivanjem pobjede pobjednici su jačali svoj politički utjecaj, vojnu i gospodarsku moć, što im je omogućavalo daljnje ulaganje u društveni, gospodarski razvoj, jačanje vojne moći i daljnje osvajanje.

Otkriće eksploziva i kontinuirani razvoj raznih eksploziva, kao i formacijskih i improviziranih eksplozivnih naprava, značajno je utjecao na borbena i teroristička djelovanja. Primjenom eksploziva u terorističkim i borbenim djelovanjima povećavao se broj ljudskih žrtava kao i materijalne štete. Eksplozivna sredstva, kao generatori visokog tlaka, u vrlo kratkom vremenu, su postali jedna od najučinkovitijih sredstava za uništavanje ljudskih života i nanošenje materijalnih šteta većih razmjera.

Korištenje eksploziva je također omogućilo, manjim dobro obučanim i uvježbanim terorističkim skupinama, prijetnju i napade na značajno vojno jače države i koalićijske vojne snage. Ovakav način terorističkog djelovanja je oblik asimetrične prijetnje ili asimetričnog ratovanja, koji se sve češće primjenjuju u posljednje vrijeme. Primjer asimetričnog ratovanja je napad izvršen na Svjetski trgovački centar (WTC) u New Yorku i Pentagon, 11. rujna 2001. godine. Posljedice napada su velik broj stradalih osoba i velike materijalne štete. Napad je izvršila mala, dobro obučena i organizirana teroristička skupina od 18 članova. Gospodarski moćna država i vojna velesila, Sjedinjene američke države (SAD), nisu mogle spriječiti napad ili značajnije umanjiti njegove posljedice [1].

Ostvarivanje vojnih ciljeva u borbenim operacijama značajno ovisi o korištenju eksplozivnih formacijskih sredstava, odnosno eksplozije. Zahtjevi moćnih država za jačanjem svojih borbenih sposobnosti nameću potrebu stalnog ulaganja u istraživanja djelovanja eksplozije u zraku, u tlu i pod vodom, što omogućava razvoj i usavršavanje eksplozivnih formacijskih sredstava.

Pored spomenutog, treba istaknuti kako se provode stalna istraživanja djelovanja

podvodne eksplozije na plovila (brodove i podmornice) i podvodne građevine u cilju povećanja njihove otpornosti.

S druge strane, eksplozija je izuzetno brza kemijska reakcija koja stvara visoki tlak u vrlo kratkom vremenu i oslobađa ogromnu količinu energije, što se može primjenjivati, pored destruktivnih i u pozitivne i korisne svrhe, kao što su: građevinarstvo, rudarstvo, razbijanje leda na plovnim rijekama i kanalima, geofizici, pri razvoju novih balističkih materijala i dr.

Podvodne građevine kao što su obalne i hidrotehničke građevine, pomorska infrastruktura (luke, vojne luke, podzemne vojne luke, maskirni vezovi, podvodni dijelovi stupova mosta, podvodni tuneli te nasute, lučne i betonske brane i ostale hidrotehničke građevine kao i podvodna infrastruktura, poput plinovoda, elektro kabela, vodovoda i drugih instalacija, riječne luke i infrastruktura su potencijalne mete terorističkih napada.

Podvodne građevine su dio linija komunikacija i potpore čija je operativna raspoloživost od presudnog značaja za provedbu i potporu vojnih operacija te humanitarnih, gospodarskih i svih drugih aktivnosti na nekom području. Onesposobljavanjem ili rušenjem podvodnih građevina prekidaju se linije komunikacije i opskrbe, a njihovim popravkom i osposobljavanjem ponovno se uspostavljaju linije komunikacije i opskrbe.

Stoga se nameće kao nužna zadaća proučavanje djelovanja podvodne eksplozije na spomenute građevine te predlaganje mjera za odvratanje od napada (pasivna obrana), smanjenje broja direktnih i indirektnih žrtava i materijalnih šteta te što bržeg popravka, u slučaju oštećenja tijekom terorističkih napada.

Pomorske vojne snage koriste učinke podvodne eksplozije uporabom raznih formacijskih mornaričkih oružnih sustava (torpedo, mornaričke mine i dubinske bombe) za postizanje ciljeva rata. Tijekom ofenzivnih i defenzivnih vojnih operacija, zaštita ili rušenje obalnih i hidrotehničkih građevina provodi se u funkciji potpore ratnim operacijama kojima se ostvaruju ciljevi na taktičkoj, operativnoj i strategijskoj razini ratovanja.

Pasivne mjere zaštite i tehnička zaštita podvodnih građevina čini niz planiranih i provedenih mjera tijekom prostornog planiranja, projektiranja, građenja i održavanja u cilju stvaranja preduvjeta za značajno otežane uvjete napada i uništenja. Naime njihovo onesposobljavanje i uništenje zahtjeva angažiranje većih snaga, povećane rizike izvođenja operacije te velike gubitke pri provođenju napadnih operacija. Stoga se često izbjegavaju takve operacije odnosno tako se napadač odvraća od napada, a građevina pasivno štiti.

Radi toga se prostornim planerima, projektantima i graditeljima postavlja pitanje na koji način postići pasivnu obranu i otpornost, a s druge strane, kako omogućiti što jednostavnije onesposobljavanje te brz popravak i stavljanje u operativnu uporabu obalne i hidrotehničke građevine te infrastrukture.

Republika Hrvatska je članica Organizacije Sjevernoatlantskog sporazuma (engl. North Atlantic Treaty Organization – NATO) i Europske unije (EU), a pripadnici OS RH sudjeluju u raznim međunarodnim vojnim misijama, što je svrstava u grupu zemalja, koje su potencijalne mete terorističkih napada. U Republici Hrvatskoj postoji vrlo bogata pomorska i riječna infrastruktura te hidrotehničke elektroenergetske građevine, koje su potencijalne mete terorističkih napada. Tijekom Domovinskog rata izvršeno je miniranje nasute brane Peruča, što je moglo prouzročiti velike štete na nizvodnom području da nisu poduzete određene mjere. Treba posebno istaknuti nedavno otvoreni Pelješki most čije bi rušenje ili onesposobljavanje podvodnom eksplozijom imalo vrlo veliki negativan učinak na ukupnu nacionalnu sigurnost Republike Hrvatske i Europske unije.

Istraživanje teme provedeno je temeljem dosadašnjih znanja i osobnih iskustava stečenih tijekom praktičnog projektiranja, pripreme i provedbe minerskih radova pri izvođenju iskopa u stijeni, dijelom i ispod razine vode, kao i stečenih teoretskih znanja tijekom izobrazbe u vojnim školama, proučavanja u sklopu priprema za potrebe održavanja nastave i vježbi na Hrvatskom vojnom učilištu „Dr. Franjo Tuđman“.

Također treba napomenuti znanja stečena tijekom studiranja na diplomskom i poslijediplomskom magistarskom studiju i obimnu literaturu, inženjerska znanja iz područja tehničkih, sigurnosnih i vojnih znanosti te znanja iz područja pomorskih

građevina, hidromehanike, hidroakustike, podvodne eksplozije, hidraulike hidrotehničkih građevina, numeričkog modeliranja i računalstva i dr.

Tijekom višegodišnjeg iskustva i rada na prostornom planiranju, pripremi taktičko-tehničkih studija i elaborata, te projektiranju, pripremi za gradnju, građenju i održavanju pomorske infrastrukture uočen je nedostatak određene regulative (zakona, propisa, standarda, normi i dr.) koja bi regulirala ovo vrlo značajno područje. Posebnu pozornost potrebno je posvetiti sigurnosti i otpornosti podvodnih građevina pri prostornom planiranju, projektiranju, građenju i održavanju.

Treba istaknuti problem, ograničenja postojećih raspoloživih matematičkih modela za proračun podvodne eksplozije u interakciji s podvodnim konstrukcijama, koje su potencijalne mete terorističkih i vojnih napada.

Stoga se nameće potreba za istraživanjem podvodne eksplozije kao fizikalne pojave i razvoj složenijih numeričkih modela korištenjem računalnih programa koji bi omogućili dobivanje točnijih i kompletnijih podataka, koji će inženjerima projektantima omogućiti kvalitetnije projektiranje ekonomičnih i otpornih konstrukcija. Svakako treba istaknuti kako je to omogućio intenzivan razvoj računalne tehnike i računalnih programa sa složenijim numeričkim modelima.

Eksperimentalno istraživanje podvodne eksplozije je vrlo složeno, tehnički i sigurnosno zahtjevno te zahtijeva posebno opremljene poligone i skupocjenu opremu kao i dobro obučene ljudske potencijale za provedbu eksperimenta. Primjer takvog poligona, za ispitivanja podvodnog oružja u RH je van upotrebe već duži niz godina.

## 1.1 Predmet i ciljevi istraživanja

Predmet istraživanja u ovom doktorskom radu je podvodna eksplozija kao fizikalna pojava i njeno djelovanje na podvodne građevine. Istraživanje je provedeno korištenjem raspoložive literature i numeričkim simulacijama na dostupnom računalnom programu. Provedeno je proučavanje i razumijevanje podvodne eksplozije kao fizikalne pojave, matematičkih formulacija, numeričkog modeliranja i postupka. Zatim su pripremljeni numerički modeli i u računalnom programu je na

numeričkim modelima istražena podvodna eksplozija i njeno djelovanje na podvodne građevine. Istraživanje se provodi na numeričkim modelima u računalnom programu LS Dyna, koji je izradila Livermore Software Technology Corporation (LSTC).

Istraživanja djelovanja podvodne eksplozije numeričkim modeliranjem i verifikacijom dobivenih rezultata pomoću raspoloživih eksperimentalnih rezultata i rezultata dobivenih pomoću empirijskih izraza ne zahtijevaju velika financijska sredstva i nisu opasna za razliku od eksperimentalnih istraživanja.

Istraživanja su provedena u cilju potvrđivanja i unaprjeđenja spoznaja i tehnika proračuna djelovanja udarnog vala od podvodne eksplozije na podvodne građevine.

Prezentirani su opisi fizikalnih pojava, matematički i numerički modeli te rezultati istraživanja, koji se mogu koristiti za daljnja istraživanja, kao i za eksperimentalna istraživanja u laboratorijskim uvjetima te na terenu. Osim navedenog, također mogu koristiti inženjerima koji projektiraju i provode proračune otpornosti podvodnih građevina na djelovanje podvodne eksplozije. Rezultati istraživanja mogu se također koristiti za iniciranje unaprjeđenja postojeće građevinske regulative, koja regulira projektiranje, građenje i razvoj održavanja podvodnih građevina.

Analiza fizikalnih pojava, razvoj teorije te razvoj matematičkih modela i numeričkih postupaka može dati doprinos daljnjem poboljšanju razumijevanja i opisa djelovanja podvodne eksplozije. Spomenuta analiza također stvara osnovu za daljnje istraživanje predmetne zadaće, što će rezultirati projektiranjem ekonomičnijih i pouzdanijih konstrukcija izloženih potencijalnom djelovanju podvodne eksplozije.

Istraživački ciljevi se ostvaruju analizom, razumijevanjem i shvaćanjem nastanka i djelovanja podvodne eksplozije kao fizikalne pojave te pripremom matematičkih i numeričkih modela kao i istraživanje djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine pomoću numeričkih simulacija, u računalnom programu LS Dyna 11. Glavi cilj je izrada matematičkih i numeričkih modela udarnog opterećenja na građevinu nastalog eksplozijom.



Pored navedenog glavnog cilja istraživanja određeni su i pomoćni ciljevi istraživanja, koji su:

- 1) definiranje podvodne eksplozije odabirom relevantnih fizikalnih veličina kroz studiju osjetljivosti ulaznih parametara numeričkim modeliranjem i obradom empirijskih izraza,
- 2) definiranje geometrijskih veličina i diskretizacija promatranog područja djelovanja podvodne eksplozije za generiranje numeričkih modela
- 3) definiranje parametara modela materijala (eksploziv, voda, zrak, tlo i građevina) i
- 4) analiza rezultata numeričkih simulacija i predlaganje smjernica za praktično inženjersko modeliranje i proračun podvodne eksplozije.

### 1.1.1 Hipoteze istraživanja

- 1) Numeričkim modeliranjem se može simulirati udarno opterećenje uslijed podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i u ograničenoj sredini, ograničenom slobodnom površinom vode i/ili dnom.
- 2) Numeričkim modeliranjem se može simulirati interakcija udarnog opterećenja podvodne eksplozije i podvodne konstrukcije.
- 3) Maksimalni tlak za volumen vode oblika kocke je približan maksimalnom tlaku za volumen vode oblika kvadra određenih dimenzija za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini.
- 4) Numerički rezultati tlaka ne ovise o veličini konačnih elemenata eksploziva, a ovise o veličini konačnih elemenata vode.
- 5) Numerička simulacija daje jednake rezultate za model sa slojem zraka iznad vode kao i model sa slobodnom površinom vode bez sloja zraka iznad vode.

## 1.2 Istraživanje podvodne eksplozije

Područje znanstvenog interesa je proučavanje i istraživanje djelovanja podvodne eksplozije kao posljedice terorističkih napada i ratnih djelovanja, te proučavanje fizikalnih pojava i procesa tijekom podvodne eksplozije s ciljem utvrđivanja djelovanja na konstrukciju, kao i odgovora konstrukcije te ponašanja materijala izloženog djelovanju udarnog vala podvodne eksplozije, kao i sagledavanje mogućnosti umanjenja štetnih posljedica na podvodnim građevinama.

Istraživanja obuhvaćena u ovom radu provedena su u više faza koje su međusobno povezane, a svaka od njih čini zasebnu cjelinu.

### **Prva faza istraživanja**

U prvoj fazi istraživanja prikupljena je osnovna relevantna literatura iz područja podvodne eksplozije kao fizikalne pojave i njenog djelovanja na konstrukciju, koja je tijekom rada kontinuirano dopunjavana.

Proučavanje, razumijevanje i shvaćanje osnovnih čimbenika terorističkih napada i ratnih djelovanja te vrste eksplozivnih sredstava koja se koriste za postizanje ciljeva terorističkih napada i ratnih djelovanja kao i mogućnost korištenja djelovanja podvodne eksplozije za ostvarenje ciljeva terorističkih i borbenih operacija.

Proučavanje, analiza, razumijevanje i shvaćanje fizikalnih i kemijskih procesa pri iniciranju i širenju detonacijskog vala u eksplozivnom punjenju, te širenju udarnog vala pod vodom tj. podvodnoj eksploziji (engl. *underwater explosion (UNDEX)*), (eksploziv, iniciranje, detonacija, udarni val, plinski mjehur i dr.).

Provedeno je proučavanje, analiza, razumijevanje i shvaćanje generiranja i disperzije udarnih djelovanja podvodne eksplozije (udarni valovi, produkti eksplozije i plinski mjehur) u okolni medij (vodu) i posebno interakciju udarnih djelovanja i vodene mase te određivanje djelovanja vodene mase na podvodne građevine. Učinci djelovanja podvodne eksplozije mogu prouzročiti: elastične ili plastične deformacije, naprezanja koja prekoračuju graničnu čvrstoću, pukotine, slom materijala, gubitak kontinuiteta materijala, te odvajanje i odbacivanje fragmenata konstrukcije i kolaps građevina.

Pronalazak i odabir relevantnih eksperimentalnih rezultata djelovanja podvodne eksplozije te empirijskih izraza za izračun određenih fizikalnih veličina podvodne eksplozije.

Razumijevanje djelovanja udarnog opterećenja (engl. *impact loading*), kao posebne vrste dinamičkog opterećenja, te razumijevanje vrsta udarnih opterećenja s obzirom na nastanak udarnog opterećenja.

Identifikacija mjera zaštite građevina i građevnih kompleksa (obalnih, urbanih, prometnih, hidrotehničkih, privrednih, vojnih, i dr.) od ratnih i terorističkih djelovanja, kao i mjera za učinkovitije otklanjanje posljedica djelovanja.

## **Druga faza istraživanja**

Proučavanje osnovnih matematičkih formulacija koje opisuju pojavu i širenje djelovanja podvodne eksplozije u vodi, kao i numeričkih formulacija, tehnika i metoda rješavanja diferencijalnih jednadžbi.

Proučavanje matematičkih i numeričkih formulacija te zakonitosti modeliranja kao osnove za provedbu numeričkih simulacija i sustavnih numeričkih istraživanja podvodne eksplozije.

Proučavanje analiza fizikalnih i mehaničkih karakteristika materijala korištenih u numeričkom modelu (eksploziv, voda, zrak, tlo, beton i čelik tj. armatura), sukladno zahtjevima računalnih programa iz raspoložive literature.

## **Treća faza istraživanja**

Prikupljanje literature za upoznavanje s postavkama i osnovama rada u računalnim programima ANSYS 18 i LS-Dyna 11. Osiguranje svih preduvjeta koji omogućavaju obučavanje i praktični rad u računalnim programima ANSYS 18 i LS-Dyna 11. Poseban je naglasak na praktičnom radu u programima ANSYS 18 i LS-Dyna 11 kao i upoznavanju s matematičkim i numeričkim formulacijama te zakonitostima modela ugrađenih u programe kao osnova za provedbu sustavnih numeričkih istraživanja podvodne eksplozije korištenjem numeričkih simulacija.

Proučavanje računalnih programa, vježbanje i obučavanje na konkretnim jednostavnim modelima u programima ANSYS 18 i LS Dyna 11, kao osnova za pokušaj uspješnog modeliranja jednostavnog modela podvodne eksplozije.

Nakon utvrđivanja prednosti programa LS Dyna u modeliranju podvodne eksplozije, nastavljeno je daljnje vježbanje i obučavanje u pripremi jednostavnog modela podvodne eksplozije, te proračunu i pregledu dobivenih rezultata u programu LS Dyna.

## **Četvrta faza istraživanja**

Definiranje geometrijskih elemenata te fizikalnih, mehaničkih i parametara jednadžbi stanja materijala korištenih u numeričkom modelu (eksploziv, voda, zrak, tlo i beton), sukladno zahtjevima računalnog programa, iz raspoložive literature. Numeričkom

simulacijom podvodne eksplozije u računalnom programu dobivaju se određene fizikalne veličine (tlak, brzina, naprezanje, pomak, u vremenu i dr.), određene točnosti. U računalnom programu LS Dyna 11 provedeno je više serija numeričkih proračuna raznih modela podvodne eksplozije, analizirani su dobiveni rezultati i uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima.

Modeliranjem je obuhvaćeno: podvodna eksplozija u neograničenoj sredini, podvodna eksplozija ograničena slobodnom površinom vode, podvodna eksplozija ograničena dnom, podvodna eksplozija ograničena slobodnom površinom vode i dnom te interakcija podvodne eksplozije i konstrukcije, kao i globalni model. Globalni model podvodne eksplozije podrazumijeva djelovanje podvodne eksplozije koja je ograničena slobodnom površinom vode i dnom te je u interakciji s građevinom tj. gravitacijskom armirano betonskom branom.

U svakom navedenom području istraživanja razvijeno je više grupa modela s različitim parametrima, a selektirani su realizirani relevantni modeli i prezentirani u ovom radu za obradu teme. Posebno treba istaknuti kako je jedan globalni model prezentiran u radu, a to je model podvodne eksplozije u interakciji s gravitacijskom armiranobetonskom branom, uz ograničenje slobodnom površinom vode i dnom.

### 1.3 Očekivani znanstveni doprinosi

Tijekom pripreme i izrade doktorskog rada bit će ostvareni slijedeći istraživački doprinosi:

- 1) Definiran model iniciranja i širenja udarnog vala te generiranja i pulsiranja plinskog mjehura u vodi.
- 2) Analiziran utjecaj koeficijenata u empirijskim izrazima za izračun tlaka na odstupanja dobivenih rezultata.
- 3) Određen utjecaj promjene oblika i smanjenje prostora vode na rezultate numeričkog proračuna tlaka podvodne eksplozije.
- 4) Definirana veličina konačnih elemenata eksploziva, vode i građevine.
- 5) Definiran utjecaj oblika eksplozivnog punjenja te refleksije udarnog vala od slobodne površine vode i dna na raspodjelu tlaka podvodne eksplozije.
- 6) Razrađena metodologija zadavanja sloja zraka iznad površine vode i dna (sloja tla).

## 1.4 Razvoj i metodološke pretpostavke istraživanja

Doktorski rad je pripremljen na temelju ranije provedenih istraživanja podvodne eksplozije empirijskim izrazima, koji daju ograničene rezultate za neke fizikalne veličine, primjenom ograničenog broja određenih parametara. Za provedbu istraživanja, u okviru ovog rada, primijenjena je analiza, provjera i odabir raspoloživih informacija. Istraživanjem je obuhvaćena analiza postojeće znanstvene literature. Istraživanja podvodne eksplozije provedena su na numeričkim modelima u računalnom programu, dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza. Nakon što je utvrđeno kako su odstupanja rezultata u prihvatljivim granicama nastavljena su daljnja istraživanja.

Prilikom izrade teorijskog dijela rada korištene su sljedeće znanstvene metode: induktivna i deduktivna metoda, metoda analize i sinteze te metoda intervjuiranja kolega. Za pregled raspoložive literature i stvaranje novih teorija i hipoteza istraživanja korištena je deduktivna metoda, kao i metoda analize. Pri izradi numeričkog modela podvodne eksplozije korištene su metode indukcije i sinteze. Pored navedenih metoda, također su korištene metode usporedbe i opisa.

Tijekom pripreme i oblikovanja modela podvodne eksplozije korištena je tehnika numeričkog modeliranja u računalnom programu LS Dyna te je provedena numerička simulacija podvodne eksplozije pomoću različitih algoritama za proračun. Odabrani su povoljni i prihvatljivi numerički modeli za opis podvodne eksplozije, koje je bilo moguće realizirati u okviru raspoloživog kapaciteta računala.

Nakon provedene numeričke simulacije na usvojenom modelu u računalnom programu LS Dyna metodom komparacije uspoređene su dobivene vrijednosti i vrijednosti dobivene pomoću empirijskih izraza te je validirana numerička simulacija. Također su prethodno uspoređene vrijednosti dobivene pomoću empirijskih izraza s različitim parametrima, koji se spominju u literaturi. Tako je odabran prihvatljiv model. Također je moguće odabrati različite veličine konačnih elemenata u modelu, koje daju manja prihvatljiva odstupanja tlaka na određenim udaljenostima od središta eksplozije.

Tijekom pisanja doktorskog rada navedene metode su najčešće korištene u raznim kombinacijama, jedna metoda s drugom ili više metoda istovremeno.

## 1.5 Struktura rada

Struktura doktorskog rada oblikovana je prema uputama i pravilima Građevinskog i arhitektonskog fakulteta Osijek Sveučilišta Josip Juraj Strossmayer u Osijeku. Svi stručni pojmovi prevedeni su na hrvatski jezik, a uz pojedine pojmove ostavljeni su izvorni nazivi na engleskom jeziku, u zagradi, radi jasnoće i povezivanja terminologije s literaturom. U radu je dan presjek višegodišnjeg rada na proučavanju i istraživanju podvodne eksplozije kao fizikalne pojave i njenog djelovanja. Rad se sastoji od predgovora, sažetka na hrvatskom i engleskom jeziku, sadržaja, popisa slika, popisa tablica, popisa kratica i simbola, teksta glavnog dijela rada i zaključka te popisa literature i priloga te životopisa autora.

Glavni tekst rada podijeljen je u sedam poglavlja. Prvo poglavlje je uvodno poglavlje s opisom predmeta i ciljeva istraživanja, hipoteza istraživanja i očekivanim znanstvenim doprinosima te razvojem i metodološkim postavkama istraživanja.

U drugom poglavlju prikazuje se pregled nekih dosadašnjih istraživanja na temu rada temeljem raspoložive literature s težištem na pregledu postojećih fizikalnih opisa, teorijskih postavki i numeričkih modela podvodne eksplozije.

U trećem poglavlju rada opisani su osnovni pojmovi eksplozija, eksplozivi, mehanizam eksplozije, dat je pregled empirijskih izraza, teorijski matematički izvodi, uspoređeni različiti empirijski izrazi, usporedba eksplozije u zraku i vodi, vrste eksplozija u vodi, eksplozija u neograničenoj sredini, eksplozija omeđena vodenom plohom (ograničena slobodnom površinom vode), omeđena dnom (ograničena dnom), eksplozija omeđena vodenom plohom (ograničena slobodnom površinom vode) i istovremeno omeđena dnom (ograničena dnom), kao i mjerenje tlakova i drugih parametara eksploziva i eksplozije – uređaji i oprema.

U četvrtom poglavlju rada opisano je djelovanje udarnog vala, koji nastaje od eksplozije u vodi, načini djelovanja i parametri djelovanja podvodne eksplozije, matematičke formulacije, pojava i djelovanje plinskog mjehura. Dane su empirijske jednadžbe za proračun određenih parametara djelovanja i opisani neki konkretni primjeri djelovanja podvodne eksplozije na brane.

U petom poglavlju dane su matematičke formulacije koje opisuju podvodnu eksploziju, zatim su navedeni računalni programi koji se koriste za proračun podvodne eksplozije te je opisan računalni program LS Dyna, numerički model, metoda konačnih elemenata i interakcije podvodne eksplozije i konstrukcije. Također su navedene mehaničke karakteristike te jednadžbe stanja s parametrima, za neke osnovne materijale.

U šestom poglavlju su prezentirani eksperimentalni rezultati i empirijski izrazi za izračun određenih parametara podvodne eksplozije, utjecaj hidrostatičkog tlaka na ukupni tlak podvodne eksplozije, pripremljeni su numerički modeli i provedena istraživanja podvodne eksplozije u računalnom programu LS Dyna te su dobiveni rezultati uspoređeni s rezultatima dobivenim temeljem eksperimenta i empirijskih izraza. Istražena je podvodna eksplozija u neograničenoj sredini, ograničena podvodna eksplozija, gdje su ograničenja: slobodna površina vode, dno i slobodna površina vode i dno zajedno, i interakcija podvodne eksplozije i konstrukcije te interakcija podvodne eksplozije s gravitacijskom betonskom branom. U svakom istraživanju su opisani dobiveni rezultati i izvršena analiza rezultata te potvrđena ili odbačena početna pretpostavka, zatim su dani prijedlozi za praktičnu primjenu pri inženjerskom proračunu podvodnih građevina, kao i zaključci.

U sedmom poglavlju su dana zaključna razmatranja rada, izravni znanstveni doprinos istraživanja te smjernice za daljnja istraživanja. Predstavljena struktura doktorskog rada ima za cilj prikazati istraživanje i ostvareni znanstveni doprinos, koji se očituje u znanstveno postavljenim novim spoznajama o djelovanju podvodne eksplozije na podvodne građevine.

U osmom poglavlju navedena je bibliografija, a na kraju je dan životopis autora.

## 2 PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

### 2.1 Početna istraživanja

I. F. Panaa i dr. [2] 2015. navode kako su Berthlot i Vieille te Mallard i Le Chatellier, neovisno jedni o drugima, 1880. godine, opisali podvodnu eksploziju. Proučavanjem propagacije plamena u plinovima u cijevi zaključili su kako, u nekim slučajevima, plamen propagira nadzvučnom brzinom.

Chapman i Jouguet (1900. – 1905.) su spomenutu pojavu opisali jednadžbama održanja mase, količine gibanja i energije.

U razdoblju od 1940. do 1945. Zeldovitch, Van Neuman i Doring su predložili naziv fizikalne pojave „detonacijska struktura“ (engl. *detonation structure*), gdje je udarni val proizvod detonacije („izgaranje eksploziva nadzvučnom brzinom“).

Detonacija eksplozivnog materijala u vodenom mediju bila je veliko otkriće u Drugom svjetskom ratu. Od tada su znanstvenici proučavali formiranje i širenje podvodnih udarnih valova kako bi procijenili njihove učinke na trup broda, podmornice i dr. [2].

### 2.2 Djelovanje podvodne eksplozije

Robert H. Cole [3] u svojoj knjizi pod nazivom Podvodna eksplozija UNDEX (engl. *Underwater explosion*) je koristio rezultate istraživanja podvodnih eksplozija koje su provedene u razdoblju 1941.-1946. godine. Knjiga predstavlja pokušaj prikaza cjelovitog razumijevanja fizikalnih procesa, što bi trebalo biti od koristi svim koji su zainteresirani za daljnje istraživanje i onima koji praktično provode podvodne eksplozije u razne svrhe.

Za potrebe opisa fizikalnih hidrodinamičkih pojava pažnja je posvećena razvoju potrebnih relacija za izračunavanje određenih parametara podvodne eksplozije. Istraživanja su provedena pomoću teorijskih i eksperimentalnih metoda kako bi se objasnile vrijednosti dobivenih rezultata određenih parametara i ograničenja te su nakon selekcije dobivenih rezultata pripremljeni dostupni materijali.



Knjiga je koristila dio dostupnih vojnih rezultata stvarno provedenih miniranja i vojnu pomoć te laboratorijske kapacitete pri istraživanju, a pripremljena je kao dostupna za sve zainteresirane.

U knjizi su opisane teorijske postavke fizikalnih pojava, prezentirani rezultati istraživanja, analize veza između pojedinih parametara te su dani empirijski izrazi za proračun određenih parametara podvodne eksplozije. Knjiga se često spominje i koriste se određeni dijelovi u većem dijelu kasnije izdane literature, a posebno su često korišteni empirijski izrazi predloženi u knjizi.

Također u ovom radu su korišteni modeli nekih eksperimenata kao osnova za izgradnju numeričkog modela podvodne eksplozije i provedbu istraživanja.

Britanski i američki stručnjaci [4] 1950. su pripremili zajednički rad, u kojem su pokušali objediniti istraživanja podvodne eksplozije, koja su provedena tijekom Drugog svjetskog rata s obje strane Atlantika.

Mnogi zapisi su bili izgubljeni ili zapravo skriveni, osim onih koji su objavljeni u javnim publikacijama pa je stoga trebala biti stvorena cijela nova literatura razvijena na temelju novih istraživanja uz značajan utrošak vremena i novca, koja su obuhvatila stare i nove probleme.

Obrambeno dokumentacijsko središte za znanost i tehnološke informacije iz Virginije (Defence documentation centre for scientific and technical information Cameron station, Alexandria, Virginia), je 1953. izdalo knjigu [5] u kojoj je opisano skaliranje parametara podvodne eksplozije.

Faktori skaliranja pomoću kojih se energetski spektar udarnog vala podvodne eksplozije može skalirati iz jednih uvjeta pomoću određenih parametara (vrsta eksploziva, masi eksplozivnog punjenja i udaljenost od središta eksplozije) u druge uvjete. U radu su prikazani faktori skaliranja za idealni akustični val kao i eksperimentalni rezultati, za koje su dostupne izmjerene vrijednosti. U oba slučaja, skaliranje eksplozije je u skladu s podacima dok skaliranje idealnog akustičkog vala daje previsoke razine spektra, na višim frekvencijama.

V. J. Cushing u studiji [6] 1969. opisuje pojavu kavitacije u području (engl. *Bulk Cavitation*), koja nastaje u površinskom sloju vode nakon refleksije udarnog vala (engl. *shockwave*) od slobodne površine vode (engl. *free water surface*). Kada tlačni udarni val od podvodne eksplozije dosegne slobodnu površinu vode, zanemarivi dio energije udarnog vala prolazi kroz graničnu plohu (voda-zrak) i širi se u zrak, a veći dio energije se reflektira natrag u vodu.

Postojeće akustičke teorije nisu uspjele opisati dio vala koji prolazi granicu različitih sredina i reflektirane valove jer akustička teorija implicira linearni odnos naprezanje/deformacija za vodu, uključujući sposobnost vode da izdrži vlak. Analiza navedena u ovom izvješću pretpostavlja kako voda ne može izdržati nikakvu značajnu napetost, tako da upadni udarni val uzrokuje cijepanje i lomove površinskog sloja vode prema gore. Područje nastanka mjehurića iznad donje (relativno) mirne vode naziva se područje kavitacije (engl. *Bulk Cavitation*).

Energija sadržana u upadnom tlačnom udarnom valu je privremeno pohranjena u kinetičkoj i gravitacijskoj potencijalnoj energiji nastalih pukotina i mjehurića u području kavitacije. Ovo izvješće opisuje mehanizam cijepanja vodene mase, kavitaciju i formiranje pukotina (zračnih mjehurića i mjehurića vodene pare u vodi). Dinamika udarnog vala proučava pojave pukotina i kavitaciju područja u površinskom sloju vode i stvaranje sekundarnih valova pod vodom.

John W. Pritchett [7] 1971. je teoretski opisao nastajanje, pulsiranje (širenje i skupljanje) i kretanje sfernog plinskog mjehura, koji se pojavljuje prilikom podvodne eksplozije. Prikazani su brojni teorijski proračuni kretanja plinskog mjehura koji pulsira u neograničenoj, homogenoj, nestlačivoj, neviskoznoj tekućini, koristeći različite "modele" za opis ponašanja unutrašnjosti plinskog mjehura. Unutrašnjost plinskog mjehura opisana je kao adijabatski homogeni idealni plin. U većini testiranih modela pokazalo se kako su rezultati gotovo identični i dobro se slažu s eksperimentalnim rezultatima i proračunima, koje su izvršili drugi istraživači, koji su uzeli u obzir stlačivost vode izvan plinskog mjehura.

B. V. Zamyshlyaev i dr. [8] 1973. u knjizi su dali odgovor na pitanje kako dinamička opterećenja od podvodne eksplozije, kao posebna i bitna varijabla ukupnih vanjskih

opterećenja, djeluju na konstrukciju broda. Pri istraživanju djelovanja podvodne eksplozije javljali su se problemi pri opisu hidrodinamičkog polja čak i za najjednostavniji slučaj krute prepreke pa se morao uzeti u obzir i učinak difrakcije udarnog vala, odnosno obilaženja prepreke, uz refleksiju i lom valova.

E. Wielandt [9] 1974. je pripremio teoretsko istraživanje seizmičkih valova koje stvaraju podvodne eksplozije. Eksplozija je opisana u smislu volumena izvora, koji je karakteriziran istisnutim volumenom u funkciji vremena, gdje oblik i tlak izvora ne moraju biti poznati.

Rješavanjem linearne valne jednadžbe sa zadanim rubnim uvjetima koji predstavljaju izvor u volumenu na dnu mora, jednostavan je linearni odnos između izvora u volumenu i seizmičkog pomaka polja na određenoj udaljenosti.

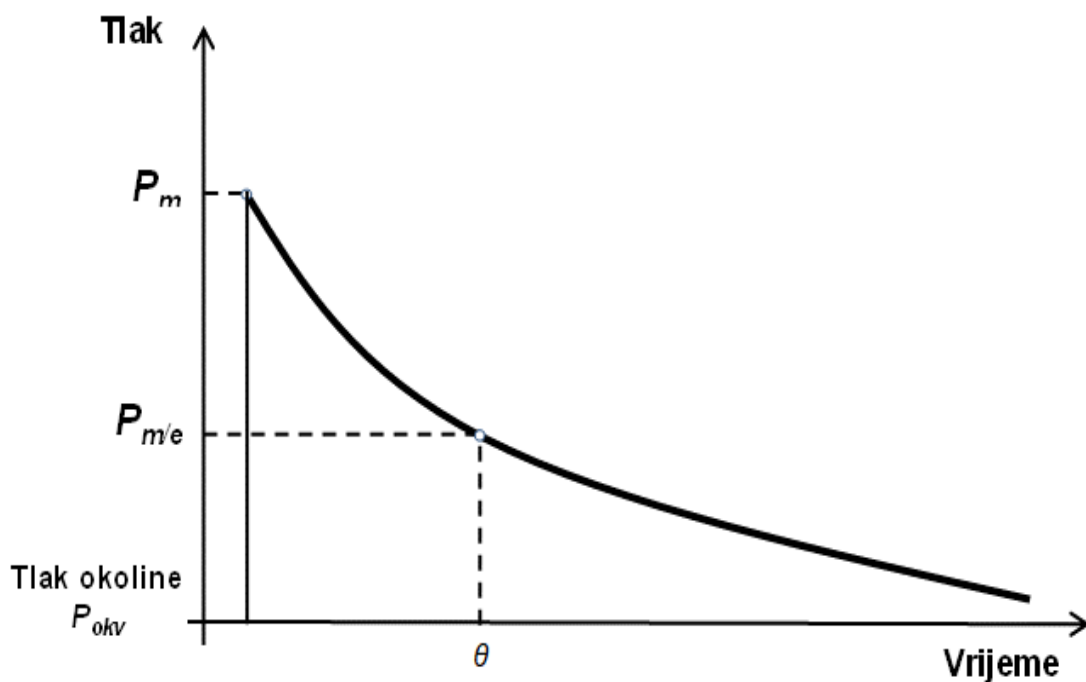
Pokazalo se kako ovaj odnos ostaje točan, kao dobra aproksimacija, za eksploziju u izvoru. Tako volumen plinskog mjehura podvodne eksplozije može se uzeti kao izvor u volumenu unutar linearne teorije, što se može izračunati, ali u praksi se računa iz perioda mjehura. Ova teorija se može koristiti za sve podvodne eksplozije na većim dubinama.

Neka pitanja ostaju otvorena, u slučaju plitke eksplozije i pojave kavitacije na površini. Za podvodne eksplozije na dubini blizu optimalne, teorija predviđa spektar amplituda i apsolutnu amplitudu seizmičkog vala, koja je blizu eksperimentalne disperzije.

R. B. Walde i S. Wang [10] 1976. navode kako mornarica i druge vladine agencije trenutačno ulažu zajedničke napore u istraživanje izvedivosti alternativnog koncepta u dizajnu pomorskih brodova povećane otpornosti na djelovanje podvodne eksplozije, za potrebe mornarice budućnosti.

M. M. Swisdak [11] 1978. je u izvješću o podvodnoj eksploziji opisao osnovne fizikalne pojave i parametre podvodne eksplozije (udarni val i plinski mjehur) te dao niz praktičnih tablica, grafikona, koji prikazuju učinke eksploziva nakon detonacije eksplozivnog punjenja pod vodom. U tablicama, korisnik može jednostavno na izravan način, dobiti veliku količinu potrebnih informacija o podvodnim eksplozijama, bez opsežnog pretraživanja i čitanja literature.

Detonacija eksplozivnog punjenja pod vodom pretvara uglavnom čvrsti eksplozivni materijal u plinovite produkte, koji stvaraju izuzetno visok tlak. Ovaj tlak se prenosi na okolnu vodu i širi se kao udarni val u svim smjerovima. Po dolasku udarnog vala na određenu udaljenost dolazi do trenutačnog porasta tlaka do maksimalne vrijednosti. Nakon toga, tlak pada gotovo eksponencijalnom brzinom. Potrebno je samo kratko vrijeme u kojem se tlak smanji na  $1/e$  ili 36,8 % svoje maksimalne vrijednosti. Vrijeme potrebno da tlak padne na vrijednost od  $1/e$  je definirano kao konstanta smanjenja tlaka udarnog vala, vidjeti sliku 2.1.



Slika 2.1 Vremenska promjena tlaka [11]

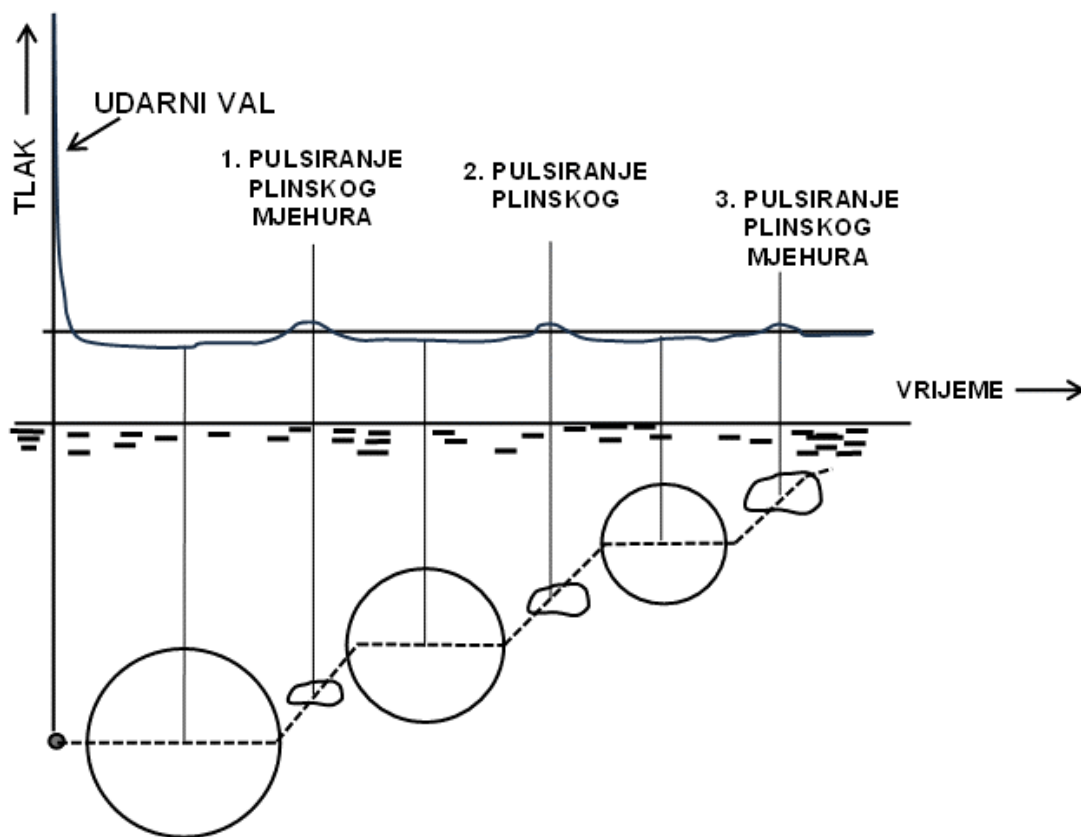
Na slici 2.1 je prikazana promjena tlaka udarnog vala u vremenu. Na dijagramu su prikazani neki značajni parametri podvodne eksplozije.  $P_m$  je maksimalni tlak udarnog vala, a  $\theta$  vremenska konstanta udarnog vala i impuls udarnog vala, koji je jednak površini omeđenoj krivuljom tlaka i osi vremena, te tlak okoline  $P_{okv}$

Maksimalni tlak udarnog vala i vremenska konstanta smanjenja tlaka ovise o vrsti eksplozivnog punjenja, gustoći i težini punjenja i udaljenosti promatrane točke od središta eksplozije, a tlak okoline ovisi o dubini podvodne eksplozije.

Nakon udarnog vala, javljaju se naknadni impulsi tlaka, koji nastaju od mnogo sporijeg fenomena, odnosno pulsiranja plinskog mjehura koji sadrži plinovite produkte eksplozije. Visoki tlak plina uzrokuje inicijalno brzo širenje plinskog mjehura i inerciju vode koja se kreće oko plinskog mjehura te povećava plinski mjehur i smanjuje tlak u plinskom mjehuru.

Vanjsko gibanje prestaje tek nakon što tlak plina u plinskom mjehuru padne znatno ispod tlaka okoline. Tada veći tlak okoline ponovno pokreće gibanje okolne vode, smanjenje plinskog mjehura i porast tlaka. Tlak u plinskom mjehuru pada ispod tlaka okoline i kada plinski mjehur dosegne svoju minimalnu veličinu, plin se komprimira na tlak viši od tlaka okoline. Tako se generira novi udarni val i cijeli se proces ponavlja. Plinski mjehur tako više puta pulsira.

Na slici 2.2 prikazan je vremenski dijagram položaja i veličine plinskog mjehura [11].



Slika 2.2 Prikaz položaja i veličine plinskog mjehura u vremenu, koji odgovaraju krivulji tlak – vrijeme [11]

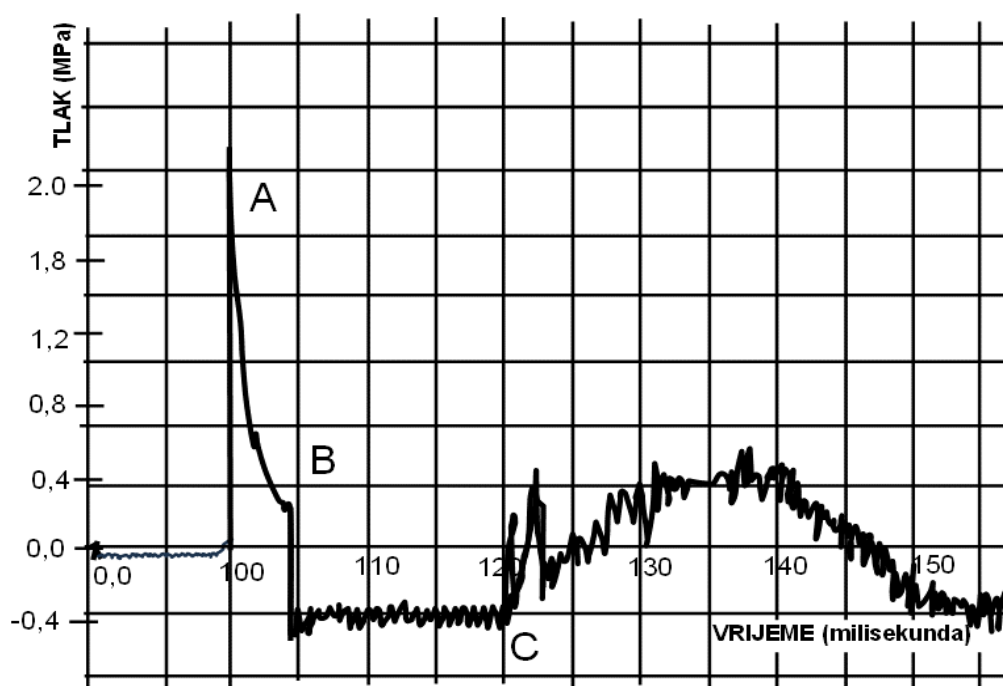
Na slici 2.2 prikazan je dijagram tlak-vrijeme, koji prikazuje nizak tlak plinskog mjehura tijekom faza u kojima je plinski mjehur maksimalne veličine i impulse tlaka koji se emitiraju iz plinskog mjehura u trenutku kad je njegova veličina minimalna. Period pulsiranja plinskog mjehura je vrlo dug u usporedbi s promjenom tlaka udarnog vala.

Na plinski mjehur djeluje uzgon pa stoga migrira prema površini vode. Na slici 2.2 isprekidana krivulja predstavlja položaj centra plinskog mjehura u funkciji vremena. Ova krivulja pokazuje kako je brzina podizanja plinskog mjehura prema površini najveća kada je plinski mjehur blizu minimalne veličine, a gotovo je brzina nula kada je plinski mjehur maksimalne veličine.

Joseph A. Clark [12] 1981. je opisao kavitaciju, koja nastaje interakcijom udarnih valova od podvodne eksplozije s površinom vode. Kad se površinski sloj vode ubrzava prema gore udarni val se reflektira, a ispod njega se formira područje vode ispunjeno mjehurićima zraka. Kada površinski sloj vode padne natrag, područje kavitacije (engl. *bulk cavitation*), brzo kolabira i javlja se drugi impuls tlaka dok se konačno ne zatvori.

Impuls zatvaranja je povezan s kavitacijom područja i od praktičnog značaja je jer gustoća toka energije (vremenski integral intenziteta) često usporediva s onom kod početnog udarnog vala. Teorijske metode za opis ponašanja udarnog vala, zatvaranja područja su slijedile dva osnovna pristupa, u svom razvoju.

Prvi pristup je hidrodinamička formulacija problema odnosno kavitacije cijelog područja, koje ima različite faze (širenje izravnog udarnog vala, formiranje i kolaps područja kavitacije), vidjeti sliku 2.3.



Slika 2.3 Dijagram izmjerene tlaka od podvodne eksplozije u blizini područja kavitacije [12]

Na slici 2.3 iz dijagrama vremenske promjene tlaka, u blizini područja kavitacije, mogu se vidjeti značajke impulsa, zatvaranje i kavitacija. Ovaj primjer prikazuje vrijednosti tlaka, koje su izmjerene na uređaju za mjerenje tlaka, koji je postavljen na udaljenosti od 21,34 m ispod površine vode na udaljenosti 152,40 m od središta eksplozivnog naboja od eksploziva HBX-I mase 544,32 kg, koji je detoniran na dubini od 21,34 m.

Početni tlačni udarni val (A) prolazi mjerni uređaj tlaka dok ga ne prekine od površine reflektirani negativni udarni val (B). Tada tlak pada i poprima negativnu vrijednost. Ovo stanje znači kako je mjerni uređaj blizu područja kavitacije vode koja kolabira (C). Udarni val zatvaranja zatim prolazi mjerni uređaj koji ima manju maksimalnu amplitudu, ali značajno dulje vrijeme trajanja od onog početnog tlaka udarnog vala.

Mouritz i D. S. Saunders [13] 1993. su ispitivali djelovanje udarnog vala generiranog podvodnom eksplozijom na razvoj mikro oštećenja u polimernim trakama ojačanim staklenim vlaknima (GRP). GRP se obično koristi za izgradnju oplata na malim pomorskim plovilima, koji mogu biti izloženi podvodnoj eksploziji. U pokusima, opterećenje podvodnom eksplozijom je postepeno povećavano.

Ispitivane su trake izložene djelovanju eksplozije u zraku i pod vodom radi usporedbe veličine progiba. Trake u zraku su imale veće progibe od traka izloženih djelovanju podvodne eksplozije. Nakon djelovanja udarnog vala od podvodne eksplozije ispitivana je mikrostruktura GRP optičkim i elektronskim skenerom i nisu uočena nikakva oštećenja na polimernoj matrici ni na staklenim vlaknima. Nasuprot tome, kada je traka bila u zraku, tada su nastale male pukotine u polimernoj matrici pri niskim tlakovima udarnih valova.

S. Menon [14] 1996. opisuje dinamiku plinskog mjehura, koji nastaje tijekom podvodne eksplozije pomoću Euler-Lagrangove metode na trodimenzionalnim konačnim elementima. Prvo se simulira širenje i kolaps mjehurića pare u spremniku za vodu i rezultati se uspoređuju s rezultatima iz paralelne eksperimentalne studije. Eksperimentalni i numerički rezultati pokazuju dobro kvalitativno i kvantitativno slaganje i pokazuju kako je pobuda Rayleigh - Taylorove nestabilnosti glavni uzrok sudaranja mjehurića.

Ovo opažanje je u skladu s ranijim rezultatima i potvrđuje kako nestabilnost igra značajnu ulogu u gubitku energije eksplozije. Simulacije su također bile provedena kako bi se istražile interakcije mjehurić-mjehurić i mjehurić-stijenka. Rezultati iz studije interakcije mjehurić - mjehurić pokazuju formiranje vodenog mlaza kad se jedan mjehurić spaja s drugim, što je u skladu s eksperimentalnim istraživanjima opisanim u literaturi [14]. Kolaps mjehurića u blizini krute stijenke i stvaranje mlaza velike brzine koji se vraća na stijenk u također je uspješno simuliran. Maksimalna vrijednost udarnog tlaka i brzina tečenja fluida dobro se slaže s eksperimentalnim rezultatima.

Trevino, [15] 2000. je proveo istraživanje serije podvodnih i zračnih eksplozija primjenom numeričke metode Arbitrary – Lagrange - Eulerova (ALE). Istraživanje se prvenstveno odnosi na učinke interakcije eksploziv-fluid, fluid-konstrukcija i fluid-zrak, te širenje tlaka udarnog vala kroz ispitivani medij, s ciljem provjere točnosti ALE analize. Trodimenzionalne analize podvodnih eksplozija provedene su korištenjem detonacije eksploziva TNT-a. Utvrđeno je kako su dobiveni rezultati numeričkim modeliranjem i simulacijom prihvatljivi, a ALE metoda modeliranja i simulacije podvodnih i zračnih eksplozija pouzdana, ekonomična i vremenski prihvatljiva.



L. Olovsson i dr., [16] 2003. pripremili su upute za korisnike računalnog programa LS Dyna s primjerima rješenja raznih zadataka interakcije fluida i konstrukcije (engl. *Fluid-Structure Interaction (FSI)*). Upute imaju za cilj objasniti korisnicima osnovne elemente potrebne za opis određenih fizikalnih pojava i modeliranje različitih FSI zadataka. Prikazane su ALE naredbe i neki rezultati s razlikama među različitim računalnim metodama koje se mogu primijeniti.

Yasseri, [17] 2008. daje pregled literature koja se odnosi na procjenu udarnog opterećenja i objedinjuje elemente koji su relevantni za projektiranje brodova, s obzirom na pristupačnost i praktičnost modela. Ovaj rad također daje odgovor po pitanju djelovanja udarnog opterećenja od podvodne eksplozije na brod, s naglaskom na ocjenu načina i sredstva za ublažavanje učinka podvodne eksplozije. Detaljno je opisano korištenje komercijalno dostupnih paketa računalnih programa koji koriste metodu konačnih elemenata za analizu dinamičkog odgovora broda na djelovanje podvodne eksplozije. Navedeni su računalni programi za analizu rješavanje podvodne eksplozije u interakciji s brodom kao što su: ABAQUS, ANSYS, MSC-Dytran i LS Dyna.

U literaturi su prezentirani rezultati istraživanja djelovanja podvodne eksplozije na brodove. Postoji velik broj istraživanja ove zadaće, što je očekivano s obzirom na značaj ovih istraživanja zbog otpornosti brodova za potrebe uspješne provedbe pomorskih borbenih operacija, borbenoj moći mornaričkih snaga, prevlasti na moru i moći nacionalnih država.

A. Grzadziela [18] 2011. prezentira rezultate provedenih ispitivanja djelovanja udara na brod za ocjenu otpornosti trupa broda, brodske opreme i uređaja. Ispitivanje udarnog djelovanja na brod ovisi o obliku konstrukcije broda i kriterijima otpornosti broda na udare. Glavni problem je što su ispitivanja djelovanja udarnog opterećenja na brod izrazito skupa. Numeričko modeliranje i simulacija, koristeći metodu konačnih elemenata, mogu pružiti informacije za uvid u detalje modela fluida, dinamičke karakteristike trupa broda i njegove unutarnje komponente.

Provedeno je modeliranje i simulacija udara na brod, a predviđeni rezultati uspoređeni su s testom udara na brod, podaci su prilagođeni za ispitivanja na moru. Prikazani su pristupi analizi udara na brod i preliminarna istraživanja parametra te njihov značaj.

Vremenska promjena tlaka podvodne eksplozije prenosi se preko udarnog vala, koji se širi kroz vodu i udara u brod što uzrokuje ubrzanje trupa broda i pojavu sila u čvorovima konačnih elemenata. Tijekom postupka se zadaju stupnjevi slobode pravokutne ploče i pojednostavljuje dijagram interakcije te se određuje ubrzanje pomoću Newmarkove metode središnjih razlika. Također je potrebno zadati raspored uređaja, uvjeta eksplozije i tijekom ubrzanja u trupu broda.

M. H. Mousum dr. [20] 2015. navodi kako podvodna eksplozija kao rezultat terorističkog djelovanja ili slučajnog incidenta može prouzročiti gubitak ljudskih života i oštećenje konstrukcije. Opterećenja uslijed djelovanja podvodne eksplozije predstavljaju veliki izazov i za civilne i za vojne organizacije. Kako bi se smanjio učinak na konstrukciju, mora se razumjeti mehanika i odgovor konstrukcije podvrgnute opterećenju podvodnom eksplozijom.

Nakon pregleda postojećih metoda, za simulaciju je odabran odgovor čelične i kompozitne konstrukcije izložene udarnim valovima. Težište je na analizi brodskih čeličnih i kompozitnih konstrukcija primarno izloženih udarnom valu, koji nastaje od podvodne eksplozije.

Metoda konačnih elemenata pri numeričkoj simulaciji koristi se kako bi se simulirao dinamički odgovor neukružene uronjene cilindrične ljuske podvrgnute djelovanju udarnog vala. Opterećenje konstrukcije kao i kinetička energija, koja se prenosi udarnim valom izračunava se iz parametra eksplozije pomoću empirijskih izraza.

Procjena dinamičkog odgovora konstrukcije u interakciji s fluidom provedena je pomoću eksplicitnog računalnog programa LS Dyna, koji koristi metodu konačnih elemenata. Također je provedena analiza osjetljivosti odgovora konstrukcije na promjenu različitih parametra poput faktora udara, tretiranja prostora fluida i anizotropije materijala.

J Chen, X. Liu, i Q. Xu [21] 2016. istraživali su vrste oštećenja betonske gravitacijske brane izložene djelovanju podvodne eksplozije, u cilju procjene otpornosti brane. U radu je prikazan numerički proračun interakcije fluida i konstrukcije koristeći numeričku metodu konačnih elemenata i Arbitrary – Lagrange - Eulerovu metodu.

G. Colicchio i dr. [19] 2018. istraživali su ponašanje konstrukcije izložene djelovanju podvodne eksplozije. Ispitivanje hidroelastične interakcije između podvodne eksplozije i elastične ploče provedeno je numeričkim postupkom dekompozicije domene.

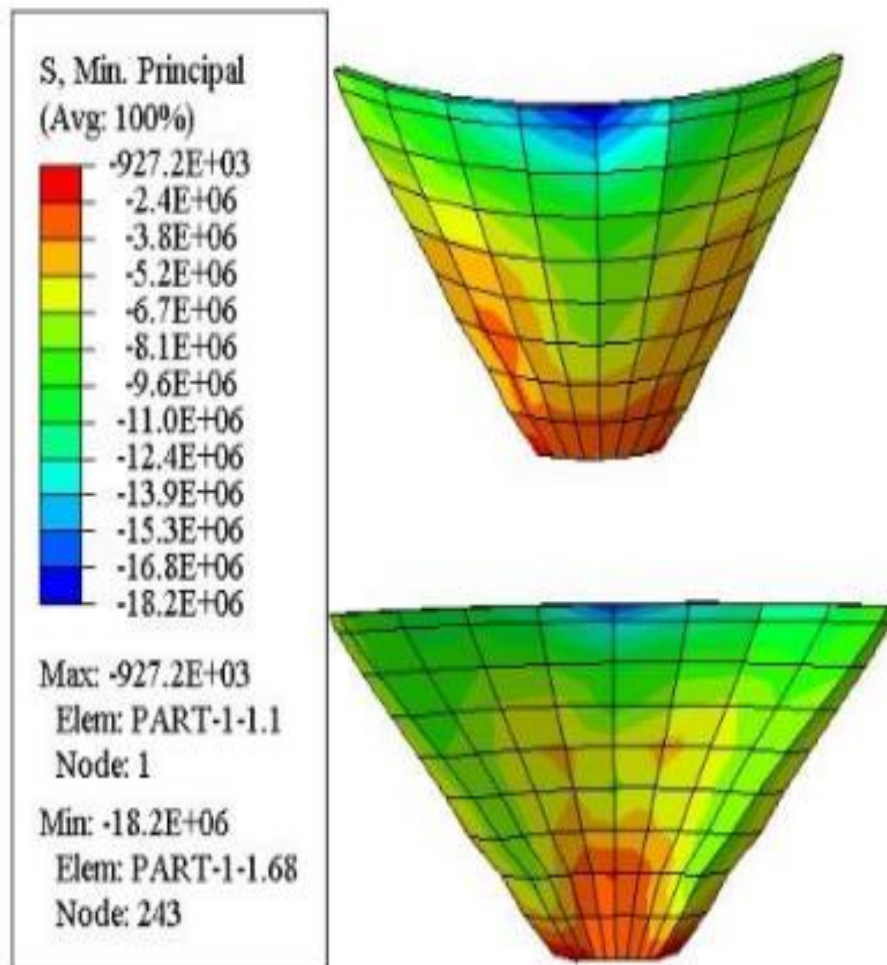
Trodimenzionalne značajke problema zahtijevaju veliko opterećenje računala, koje se može smanjiti kroz slabu vezu jednodimenzionalnog radijalnog modela eksplozije. Slaba veza omogućava rješavanje širenja eksplozije, dalje od granica, a trodimenzionalni model tlačnog toka koristi se gdje je interakcija između tlačnog vala i graničnog toka postala trodimenzionalna.

Trodimenzionalni model protoka na granicama izravno je povezan s modalnom analizom konstrukcije, koja modelira odgovor čvrstih granica poput elastičnih ploča. To omogućuje simulaciju interakcija fluid-konstrukcija kao jaku vezu, kako bi se opisali hidroelastični učinci. Pored ostalog, model je također korišten za istraživanje interakcije podvodne eksplozije s trupom broda, koji se modelira kao ortotropna ploča. Ispituje se interakcija tekućine i konstrukcije, ističući potrebu kontakta tekućine i konstrukcije, zbog praćenja mogućeg početka kavitacije.

Radna grupa LS Dyna [22] 2018. opisala je jednadžbe stanja i razne modele materijala s uputama za korištenje. Posebno treba istaknuti model betona MAT\_272, MAT\_RTH, koji se koristi za analizu ponašanja betonske konstrukcije izložene udarnom opterećenju kao što je djelovanje podvodne eksplozije.

M, Moradi, S. M. Aghajanzadeh, H. Mirzabozorg i M. Alimohammadi [23] 2017., su istraživali ponašanje lučne brane izložene djelovanju podvodne eksplozije. Istraživanje je provedeno za različite udaljenosti središta podvodne eksplozije od uzvodnog lica brane s različitim količinama TNT eksploziva te za linearni i nelinearni model ponašanja materijala. U numeričkom proračunu su prikazani dobiveni i rezultati radijalnih, tangencijalnih i vertikalnih pomaka krune brane.

Također su prikazane raspodjele maksimalnih i minimalnih glavnih napreznja koja se pojavljuju u brani, vidjeti sliku 2.4.

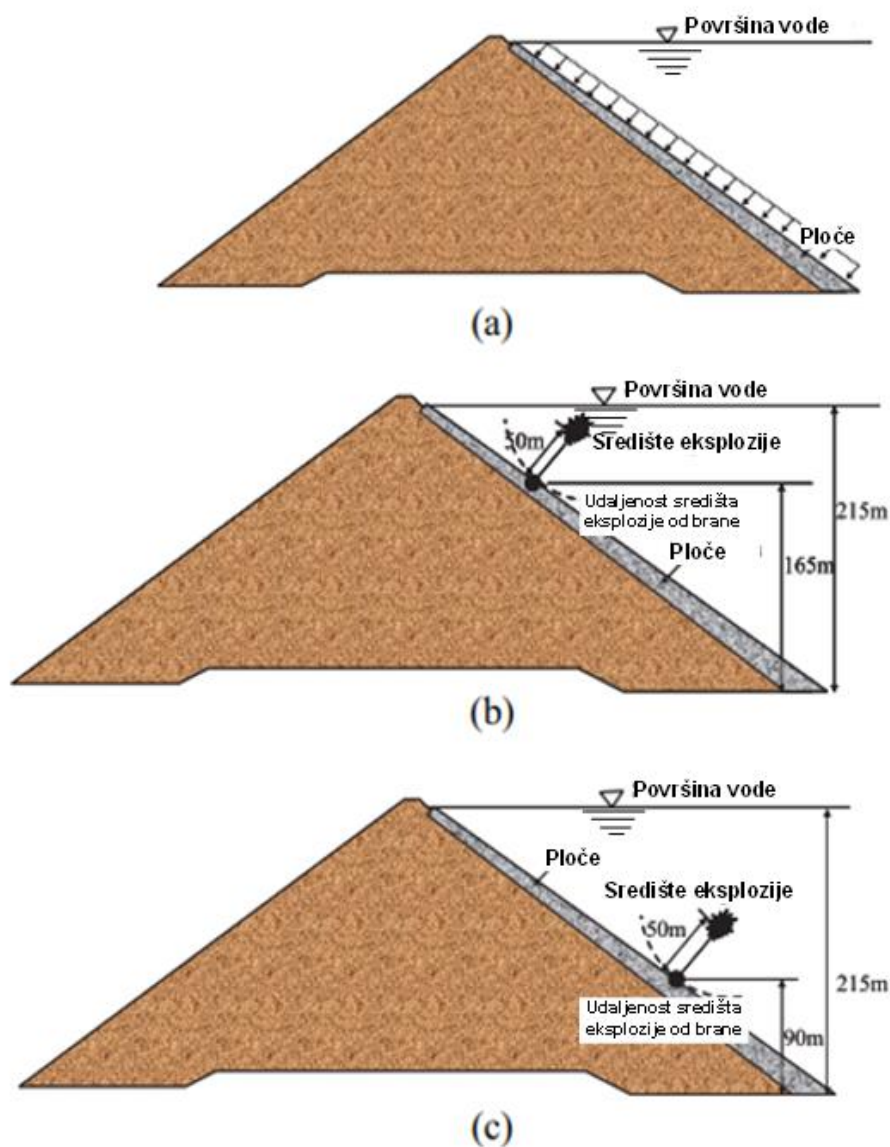


Slika 2.4 Raspodjela glavnih naprezanja na lučnoj brani [23]

L. Lu, Y. Zhu, i dr. [24] 2019. su istraživali djelovanje podvodne eksplozije na nasutu kamenu branu s betonskim ekranom visine 223 m, na uzvodnom licu brane. Za analizu loma trodimenzionalne nasute kamene brane s betonskim ekranom uslijed djelovanja podvodne eksplozije korišten je prošireni plastični Drucker-Pragerov model materijala. Tijekom istraživanja provedene su numeričke simulacije za određivanje stupnja oštećenja betonskog ekrana izloženog djelovanju udarnog vala od podvodne eksplozije.

Rezultati simulacije pokazuju kako su najslabiji elementi betonske ploče u kojima dolazi do prekoračenja vlačne čvrstoće, na desnom boku brane i lijevom dijelu krune brane.

Djelovanje podvodne eksplozije je veće na donjim nego na gornjim pločama betonskog ekrana brane. Stoga se pri projektiranju na tim dijelovima betonskog ekrana nasute brane moraju poduzeti mjere zaštite kako bi se povećala njihova otpornost na djelovanje podvodne eksplozije, vidjeti sliku 2.5.



Slika 2.5 Presjek nasute brane s prikazom položaja središta eksplozije [24]

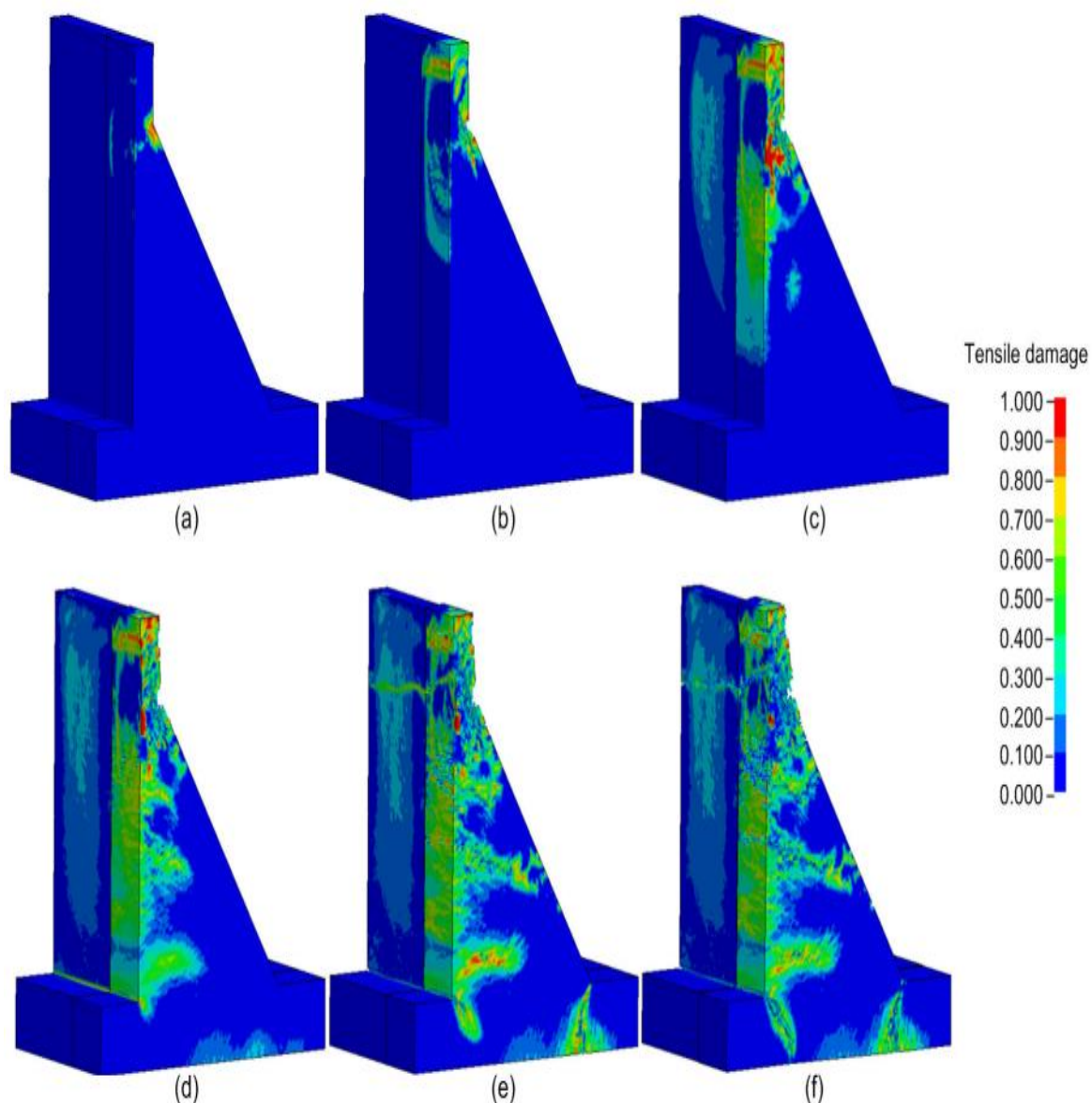
Na slici 2.5 prikazan je presjek nasute kamene brane s betonskim ekranom s dva različita položaja središta eksplozije [24]. Brana je visoka 223 m, središte podvodne eksplozije, za oba položaja, je udaljeno 50 m od uzvodnog lica brane, mjereno po normali na plohu betonskog ekrana, u oba različita položaja.

X. Huang, i dr. [25] 2020. su istraživali ponašanje gravitacijske betonske brane izložene djelovanju podvodne eksplozije, kao glavne potencijalne mete terorističkih i napada tijekom rata. Eksploziv je postavljen na određenoj dubini u blizini brane. Najveće tragedije od rušenja brane, uslijed djelovanja podvodne eksplozije, vjerojatno bi se dogodile u naseljenim područjima nizvodno od brane. Međutim, eksperimentalna istraživanja su pokazala kako je slom gravitacijske betonske brane izložene djelovanju podvodne eksplozije (UNDEX) iznimno rijedak. Istraživanja sloma betonske gravitacijske brane izložene djelovanju podvodne eksplozije su provedena centrifugalnim testovima i numeričkim simulacijama.

Zbog male debljine gornjeg dijela brane došlo je istovremeno do vlačnog naprezanja pri savijanju na uzvodnoj strani i vlačnog naprezanja od reflektiranog vala na donjoj strani brane, što je rezultiralo prekoračenjem vlačnih naprezanja i oštećenjem gornjeg dijela, na uzvodnoj i na nizvodnoj strani brane. Slom u donjem dijelu brane je izmjeren na visini od oko jedne trećine visine brane. Ovaj slom nastaje uglavnom zbog vlačnih naprezanja od savijanja u uzvodnoj strani brane. Slom počinje na uzvodnom licu brane i dalje se širi prema nizvodnom licu brane, pod kutom od  $15^\circ$  od horizontale.

Temeljni mehanizmi sloma zbog spomenutih prekoračenja vlačne čvrstoće potvrđeni su i uočeni u dijagramima vremenskog tijeka deformacija. Slom u brani prikazan u studiji sličan je onima koji su se dogodili i opisani su u prošlim ratovima, gdje su brane bile izložene sličnim scenarijima opterećenja podvodnim eksplozijama.

Rezultati istraživanja su otkrili postojanje dva vlačna sloma unutar brane, jedan u gornjem, a drugi u donjem dijelu brane, vidjeti sliku 2.6.



Slika 2.6 Numerički rezultati razvoja vlačnih naprezanja i sloma: (a) 0,05 ms; (b) 0,10 ms; (c) 0,20 ms; (d) 0,35 ms; (e) 0,60 ms i (f) 2,0 ms [25]

Prethodno su prikazani neki radovi koji se odnose na podvodnu eksploziju kao fizikalnu pojavu i fizikalne procese tijekom detonacije eksploziva, generiranja i širenja udarnog vala te širenja i skupljanja plinskog mjehura. Nadalje je opisano djelovanje podvodne eksplozije na cilj, koji je prvenstveno brod ili podmornica. Jasno je kako su ova istraživanja poticana zbog ogromnog interesa obrane, što je omogućilo visoku razinu istraženosti i velik broj radova ove vrlo kompleksne i složene tehničke zadaće.

Pregled tehničkih zadataka prema složenosti, od opisa ponašanja konstrukcija izloženih djelovanju statičkih, zatim dinamičkih do udarnih opterećenja, ove posljednje zadatke su najkompleksnije. Posebno treba istaknuti kako se istovremeno analizira fluid i konstrukcija kao i njihova interakcija. Također nije zanemarivo kako je ponašanje materijala u odnosu na statička opterećenja puno složenije jer materijali se sasvim drugačije ponašaju ako su izloženi statičkim, dinamičkim i udarnim opterećenjima.

U ranijim radovima, opisana je podvodna eksplozija kao fizikalna pojava i dane su matematičke formulacije podvodne eksplozije u obliku diferencijalnih jednadžbi. Temeljem eksperimentalnih istraživanja pripremljeni su empirijski izrazi za izračun određenih fizikalnih parametara podvodne eksplozije (tlak, impuls, energija, ...). Razvoj računala i numeričkih metoda omogućio je rješavanje vrlo složenih diferencijalnih jednadžbi približnim numeričkim postupcima, što se vidi iz navedenih radova. Uočava se postepen napredak u razvoju numeričkih modela, numeričkih metoda i računalnih mogućnosti rješavanja sve složenijih zadataka.

Također u posljednjem razdoblju, pojavljuju se primjeri rješavanja djelovanja podvodne eksplozije na hidrotehničke građevine (nasute brane, betonske gravitacijske brane i lučne betonske brane) koristeći spoznaje, rezultate i tehnike koje su razvijene za potrebe proučavanja i istraživanja djelovanja podvodne eksplozije na brodove i podmornice.

Interakcija podvodne eksplozije (udarni val i plinski mjehur) i obalne građevine je vrlo složena fizikalna pojava, a njeno matematičko i numeričko modeliranje zahtjeva veliki napor. Prikazani primjeri pokazuju dobro slaganje numeričkih i eksperimentalnih rezultata, ali za konkretne ograničene laboratorijske primjere.

Daljnje istraživanje treba omogućiti razvoj kvalitetnih numeričkih postupaka koji će omogućiti pouzdan, ekonomičan i jednostavan proračun stanja naprezanja i deformacija u građevinama izloženim djelovanju podvodne eksplozije, uz minimalna odstupanja od dostupnih eksperimentalnih rezultata. Razvijeni numerički postupci bi omogućili projektantima jednostavan proračun građevina izloženih djelovanju podvodne eksplozije. Na ovaj način bi se postigla veća pouzdanost i otpornost građevina izloženih djelovanju podvodne eksplozije.



Poznavanje načela i ciljeva terorističkih i ratnih djelovanja i usvajanja temeljnih znanja iz područja obrane i sigurnosti u cilju implementacije zahtjeva obrane i nacionalne sigurnosti svakako bi pomoglo stručnjacima, koji se bave prostornim planiranjem, projektiranjem i građenjem. Tijekom prostornog planiranja, projektiranja i građenja građevina i infrastrukture, koje mogu biti izložene djelovanju podvodne eksplozije potrebno je sagledati mjere sigurnosti, koje treba implementirati.

Pored spomenutog također je potrebno pripremati i odgovarajuću regulativu koja će propisati mjere kojih se trebaju pridržavati projektanti i graditelji građevina, pri prostornom planiranju, projektiranju i građenju obalnih i hidrotehničkih građevina, koje su potencijalne mete terorističkih napada i koje trebaju biti otporne na djelovanje podvodne eksplozije. Mjere treba primijeniti poradi postizanja veće pouzdanosti od rušenja kao i udovoljavanja zahtjevima obrane i nacionalne sigurnosti.

## 3 PODVODNA EKSPLOZIJA

### 3.1 Općenito o eksplozijama

Eksplozija podrazumijeva dovoljno brz proces pretvaranja fizičkog, nuklearnog ili kemijskog sustava iz jednog u drugo stanje. Proces je praćen pretvaranjem potencijalne energije čestica u kinetičku, odnosno u mehanički rad. Rad je uvjetovan brzom ekspanzijom plinova, koji su postojali ili su stvoreni za vrijeme eksplozije [26].

Ovisno o načinu na koji je izazvana, pojava eksplozije može biti: fizička, kemijska i nuklearna. Fizičke eksplozije su izazvane fizičkim pojavama koje uzrokuju trenutni prijelaz tvari iz jednog fizičkog stanja u drugo. Prirodne pojave koje izazivaju eksplozije su: eksplozija pregrijanog parnog kotla, udar meteora, prskanje boce pod tlakom, eksplozija pražnjenja visokog napona, potresi, vulkani za vrijeme aktivnosti, stvaranje novih zvijezda i sl. [26].

Eksplozija se sastoji od dvije faze i to su: prva faza predstavlja pretvaranje nekog oblika energije u oblik energije stlačenih plinova, a druga faza podrazumijeva munjevito širenje jako stlačenog plina [26].

Nuklearne eksplozije nastaju pri lančanim nuklearnim reakcijama, koje se mogu odvijati fisijom (cijepanjem) ili fuzijom (spajanjem) jezgra, uz oslobađanje ogromne količine energije u različitim oblicima: toplinska , mehanička i energija u obliku zračenja [26].

Pod kemijskom eksplozijom podrazumijevamo samošireći proces kemijskih reakcija kroz eksplozivnu tvar. Zahvaljujući velikoj brzini odvijanja reakcija, proces se praktički odvija u volumenu same eksplozivne tvari. Uslijed odvijanja egzotermnih reakcija oslobađa se toplina, koja zagrijava plinovite produkte koji su pod visokim tlakom.

Kemijski proces je eksplozivan ako ispunjava tri uvjeta:

- Proces je egzoterman,
- Proces se odvija velikom brzinom i
- Proces stvara plinove.

Ova tri uvjeta proizlaze iz uvjeta samoširenja, koji također mora biti ispunjen. Što znači kako se proces započet u bilo kojem dijelu eksplozivne tvari mora spontano prenositi po čitavoj eksplozivnoj tvari. Brzina samoširenja, toplina i tlak nisu apsolutne i nepromjenjive vrijednosti već su one međusobno zavisne [26].

Egzotermnost procesa je uvjetovana izdvajanjem topline, ako proces ne prati izdvajanje topline onda proces nema mogućnost nastavka, jer ako eksplozivna tvar za svoj kemijski proces traži stalni dotok energije izvana onda ta tvar nije eksplozivna. Stoga egzotermna sposobnost pretvaranja ovisi o kemijskoj strukturi eksplozivne tvari. Egzotermnost pretvaranja određena je time što su veze između atoma u produktima pretvaranja znatno jače nego u samoj eksplozivnoj tvari.

Mehanizam oslobađanja topline vezan je s promjenama molekularnog i atomskog položaja. Unutar strukture određene eksplozivne tvari u procesu kemijske reakcije dolazi do niza kombinacija aktiviranih atoma, iona, radikala i drugih atomski aktivnih grupa u težnji za prelazak iz višeg energetske stanja u niže energetske stanje.

Kao rezultat prijelaza oslobađa se energija i mijenjaju se atomske i molekularne strukture, koje su međusobno čvršće povezane nego prije odvijanja kemijskih reakcija, jer su valentni elektroni sišli na niže energetske nivoe pa je tako sustav postao termodinamički stabilniji [26].

Eksplozija je kemijska reakcija kojom eksploziv iz početnog stanja prelazi u plinovito stanje pri čemu nastaje vrlo visoka temperatura i tlak, a proces se odvija ekstremno brzo i oslobađa velike količine topline. Temperatura produkata eksplozije je oko 3000 °C, tlak je oko 5000 MPa (50000 atm), što ovisi o vrsti eksplozije te vrsti i količini eksploziva. Eksplozivi mogu biti u krutom, tekućem ili plinovitom stanju [3].

Toplina eksplozije je osnovni kriterij radne sposobnosti eksplozivnog punjenja. Kod većine eksplozivnih punjenja toplina eksplozije se kreće u granicama od 3700 do 7500 KJ/kg. Najkarakterističniji element eksplozivnog pretvaranja je velika brzina odvijanja procesa. Prijelaz od početnog stanja do stanja konačnih produkata odvija se u vremenu od  $10^{-3}$  do  $10^{-6}$  sekundi. Velika brzina odvijanja procesa razlikuje eksplozive od ostalih goriva i materijala [26].

Povećanje brzine odvijanja procesa ovisi o povećanju temperature i tlaka. Poznato je kako za svako povećanje temperature od 10 °C porast brzine kemijske reakcije je 2 do 4 puta pa povećanje temperature od nekoliko tisuća stupnjeva značajno povećava brzinu procesa. Također povećanje tlaka od  $10^5$  do  $10^8$  uzrokuje povećanje brzine reakcije u plinskoj fazi i do  $10^6$  puta [26].

Velika brzina odvijanja procesa omogućuje odvijanje procesa u stalnom nepromijenjenom volumenu (u prvoj fazi), a to stvara ogromnu koncentraciju energije (od 2000 do 7000 KJ/dm<sup>3</sup>). Brzina širenja eksplozivnog procesa - što nazivamo i brzina detonacije – kreće se od 2000 do 9300 m/s [26].

Osim energetske i kinetičke karakteristika eksplozivnog punjenja, mogućnost pojave eksplozije, a naročito brzina samoširećeg efekta, zavisi od prijenosa energije u drugoj fazi eksplozije. Kemijsko pretvaranje može se odvijati veoma različito u odnosu na brzinu širenja i karakter vanjskog djelovanja, a u zavisnosti od mehanizma prijenosa energije [26].

Vrlo visok tlak, koji se pojavljuje pri eksploziji i rušilački efekt ne bi bilo moguće postići ako kemijsku reakciju eksplozivne tvari ne prati i stvaranje velike količine plinova (tablica 3.2).

Bez pojave velikih količina plinova ne bi došlo do druge faze eksplozije. Naime, produkti eksplozije su u trenutku eksplozije trenutno „zarobljeni“, odnosno samokomprimirani, u malom volumenu pa se pojavljuje svojstvo transmisije energije, jer se u procesu širenja, potencijalna energija pretvara u drugi oblik energije vršeći rad [26].

## 3.2 Eksplozivi

### 3.2.1 Osnovna svojstva eksploziva

Eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje detoniraju pod djelovanjem vanjskog impulsa, koji može biti mehanički, toplinski ili eksplozivni, prelaze potpuno ili djelomično u plinovito stanje, oslobađaju ogromne količine energije, u vrlo kratkom vremenu, koja može biti pretvorena u mehanički rad.

Neke vrste eksploziva su: trinitrotoluen (TNT), nitroglicerol, penetrit, heksogen, amonijski nitrat, petin, RDX, Tetryl, AN-FO, Dinamit, C4 ili Composition 4, je uobičajena vrsta plastičnog eksploziva i druge vrste eksploziva koje su opisane u literaturi [28], [29] i [30].

Eksplozivi su sami po sebi nestabilni, a nakon iniciranja prolaze kroz kemijski proces i postaju stabilni. Kemijska reakcija se može pokrenuti dovođenjem dovoljne količine energije u neku točku eksploziva. Iniciranje reakcije može se izvesti pomoću zagrijane žice ili topline trenja od udarca udarnom iglom, koji u većini slučajeva djeluju izravno na malu količinu posebno osjetljivog materijala.

Nakon pokretanja procesa, razvija se toplina i tlak, koji su dovoljni za pokretanje eksplozivne reakcije u susjednom dijelu eksplozivne tvari, a reakcija se širi kroz eksplozivnu tvar [3].

Često se TNT koristi kao referentni eksploziv pri čemu se ostali eksplozivi pomoću određenih koeficijenata, koji se dobiju iz odnosa specifične energije, pretvaraju u TNT, što omogućuje jednostavnije daljnje računanje pojedinih veličina i njihovo uspoređivanje. U tablici 3.1 dani su koeficijenti pretvorbe nekih vrsta eksploziva [31].

Tablica 3.1 Koeficijenti pretvorbe eksploziva [31]

Eksploziv	Specifična energija mase	TNT ekvivalent
	$Q_x$ (kJ/kg)	$Q_x/Q_{TNT}$
Mješavina B (60 % RDX, 40 % TNT)	5190	1,148
RDX (Ciklonit)	5360	1,185
HMX	5680	1,256
Nitroglicerin (tekući)	6700	1,481
TNT	4520	1,000
Eksplozivna želatina (91 % nitroglicerin, 7,9 %, nitroceluloza, 0,9 % antracid, 0,2 % voda)	4520	1,000
60 % Nitroglicerin dinamit	2710	0,600
Semtex	5660	1,250
C4	6057	1,340

Eksplozivi, pri detonaciji, oslobađaju ogromne količine energije, u vrlo kratkom vremenu, koja se može pretvoriti u mehanički rad. Brzu detonaciju eksploziva omogućava kisik, koji se nalazi u samom eksplozivu pa neki eksplozivi mogu detonirati i u zatvorenim prostorima bez pristupa atmosferskog kisika [28].

Eksplozivi su uvjetno stabilni; kruti, tekući ili plinoviti spojevi ili smjese, koji nakon iniciranja, kemijskom reakcijom se pretvaraju u stabilno stanje [2].

Nakon iniciranja eksploziv detonira, što predstavlja poseban način sagorijevanja kod kojeg plamen detonacije putuje kroz masu eksploziva velikom brzinom, po zakonu gibanja udarnog vala. Proces širenja kemijske reakcije unutar eksplozivne tvari odvija se nadzvučnom brzinom, brzina zvuka u zraku iznosi oko 340 m/s. Brzina detonacije eksploziva iznosi od 3000 do 9000 m/s, što ovisi o vrsti eksploziva. Brzina detonacije je brzina detonacijskog vala kojom se val širi kroz eksploziv.

Za neke vrste eksploziva brzina detonacije je prikazana u tablici 3.2.

Tablica 3.2 Brzina detonacije eksploziva [32]

Naziv eksploziva	Formula	Brzina detonacije (m/s)
TNT	$C_7H_5N_3O_6$	6940
RDX	$C_3H_6N_6O_6$	8940
H-6	RDX/TNT/AL/WAX 45.1/29.2/21.4/4.7	7440
HBX-1	RDX/TNT/AL/WAX	7310

Eksplozivne smjese nakon eksplozije pretvaraju se u plinove visoke temperature i tlaka [28].

Neke od minersko-tehničkih značajki eksploziva su: brzina detonacije, brizantnost, snaga, volumen plinova, specifični tlak i temperatura eksplozije. Brizantnost predstavlja sposobnost eksploziva, koja se odnosi na razaranje pregrade, koja se nalazi u neposrednom kontaktu s eksplozivnim punjenjem.

Brizantnost eksploziva i njegova razorna snaga ovise o brzini detonacije. Snaga ili radna sposobnost eksploziva je njegovo radno djelovanje odnosno snaga koju razvija [28].

Eksplozivni naboj tijekom detonacije prelazi u plinovito stanje, plinovi se šire i u nekoliko milisekundi zauzimaju tisuću puta veći volumen od početnog. Pri detonaciji eksplozivnog punjenja oslobađa se toplinska energija, povećava se tlak i volumen plinovitih produkata eksplozije.

Povećanje volumena od početnog volumena eksplozivnog punjenja do novonastalog volumena plinovitih produkata eksplozije ovisi o vrsti eksploziva. Povećanje volumena plinovitih produkata eksplozije za neke eksplozive prikazano je u tablici 3.3.

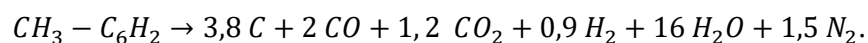
Tablica 3.3 Volumen plinovitih produkata eksplozije [26]

Naziv eksploziva	Volumen plinovitih produkata eksplozije (litra (l))	
	Na 1 kg eksploziva	Na 1 litar eksploziva
Nitroglicerín	765	935
Trinitrofenol	715	1145
Trinitrotoluen	740	1180
Nitroglicerín	890	1105

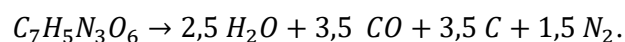
Iz tablice se može primijetiti kako od eksplozivnog punjenja trinitrotoluena (TNT) volumena 1 litra (l) nakon detonacije se dobije 1180 litara (l) plinovitih produkata eksplozije. Tijekom detonacije eksplozivnog punjenja, u vrlo kratkom vremenu, pojavljuje se ekspanzija produkata eksplozije, koji djeluju na okolinu. Maksimalni tlak kod eksplozije kondenziranih eksplozivnih punjenja dostiže vrijednost i do 10<sup>7</sup> kPa [26].

Tijekom eksplozije odvija se kemijska reakcija, za čije kontinuirano odvijanje je potreban kisik za oksidaciju ugljika u CO<sub>2</sub> i vodika u H<sub>2</sub>O. Odnos između količine kisika kojeg sadrži eksploziv i količine kisika koja je potrebna za kompletan proces detonacije eksploziva naziva se bilanca kisika. Svaki eksploziv ima karakterističnu bilancu kisika, a ona može biti pozitivna, negativna ili uravnotežena.

Eksploziv koji za detonaciju treba kisik iz okoline ima negativnu bilancu kisika. Trinitrotoluen (TNT) ima negativnu bilancu kisika, koja iznosi -74 %. Pri eksploziji jednog mola trinitrotoluen nastaju CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> i 45,6 g čađe. Jednadžba kemijskog razlaganja, ako konstanta ravnoteže vodenog plina iznosi K=3 pri temperaturi eksplozije, odvija se prema sljedećoj kemijskoj jednadžbi [28]:

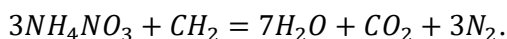


U literaturi [33] prikazana je i druga jednadžba razgradnje trinitrotoluena:



Eksploziv koji za detonaciju ima dovoljno kisika ima pozitivnu bilancu kisika. Amonijski praškasti eksplozivi imaju neznatno pozitivnu bilancu kisika od +0,2 do +1 %.

Praškasti granulirani amonijsko-nitratni uljni eksplozivi, na zapadu poznati pod nazivom ANFO, dobivaju se miješanjem 94,5 % amonijskog nitrata i 5,5 % dizelskog ulja. ANFO ima nultu tj. uravnoteženu bilancu kisika. Kemijska reakcija se odvija prema sljedećoj kemijskoj jednadžbi [28]:



Gustoća eksploziva može se izraziti specifičnom masom. Specifična masa je omjer gustoće eksploziva i gustoće vode u standardnim uvjetima. Specifična masa komercijalnih eksploziva kreće se od 0,6 do 1,7 g/cm<sup>3</sup>. Osim rijetkih izuzetaka, gušći eksplozivi imaju veće brzine detonacije i nakon detonacije stvaraju veće tlakove [29].

### 3.2.2 Mehanizam eksplozije

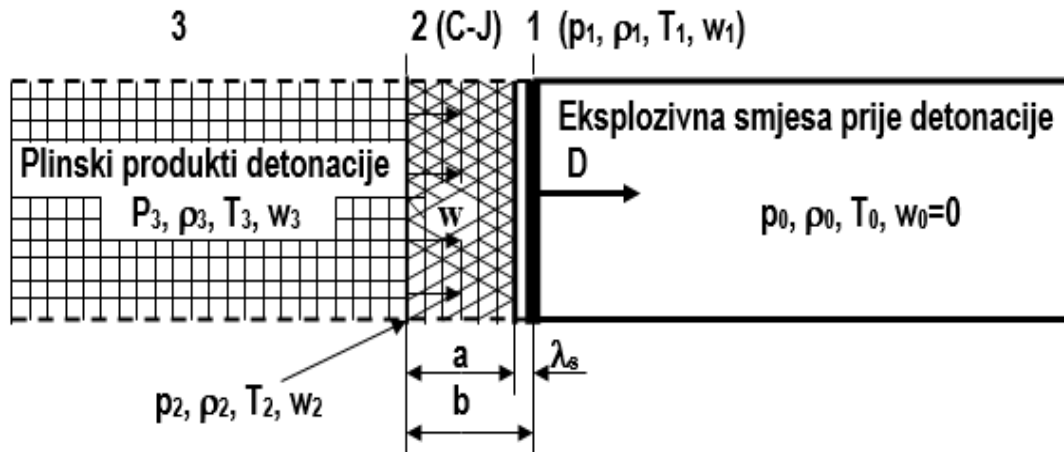
Iniciranjem eksploziva započinje kemijski proces, eksplozivno punjenje detonira brzinom od 3000 do 9000 m/s, generira se detonacijski udarni val i tlak naglo raste (oko 14000 MPa) i razvija se temperatura (oko 3000 K), što ovisi o vrsti eksploziva.

Proces detonacije se sastoji od fronte detonacije i zone kemijske reakcije kao što je prikazano na slici 3.1. Fronta detonacije (ili udarni val), prikazana je zonom 1 na slici 3.1, koju karakterizira vrlo visok tlak, gustoća i temperatura, čija je širina reda duljine slobodnog puta molekule. Iza fronta detonacije je zona kemijske reakcije (zona 1 - 2), čija je širina od 0,1 mm do nekoliko mm. Ravnina koja prolazi kroz točku 2 zove se Chapman - Jouguetova ravnina ili C-J ravnina. Iza zone kemijske reakcije je zona 2 - 3, zona plinskih produkata detonacije [33].

U radovima Chapman - Jouguetova postavljen je fizički model procesa detonacije, prvo, u zoni kemijske reakcije detonacijskog vala postoji zona "povišenog tlaka" (zona neekspandiranih plinova) iza fronta udarnog vala, koja se širi brzinom detonacije, odnosno većom brzinom, zbog energetske podrške fronte vala. U skladu s ovim modelom, fronta udarnog vala tlači, zagrijava i izaziva samozapaljenje sloja eksplozivne smjese koja je podvrgnuta njegovom djelovanju. S odvijanjem kemijske reakcije, volumen plina raste, a tlak pada do vrijednosti konačnog stanja plinskih produkata detonacije.



Područje povišenog tlaka neposredno iza fronta udarnog vala naziva se "kemijski vrh". Za takav model detonacijskog pretvaranja, može se dokazati opravdanost i hipoteze Chapman - Jougueta. Postojanje "kemijskog vrha" i pulsirajući karakter detonacije je eksperimentalno potvrđeno kako za plinske tako i za kondenzirane eksplozivne smjese [33].

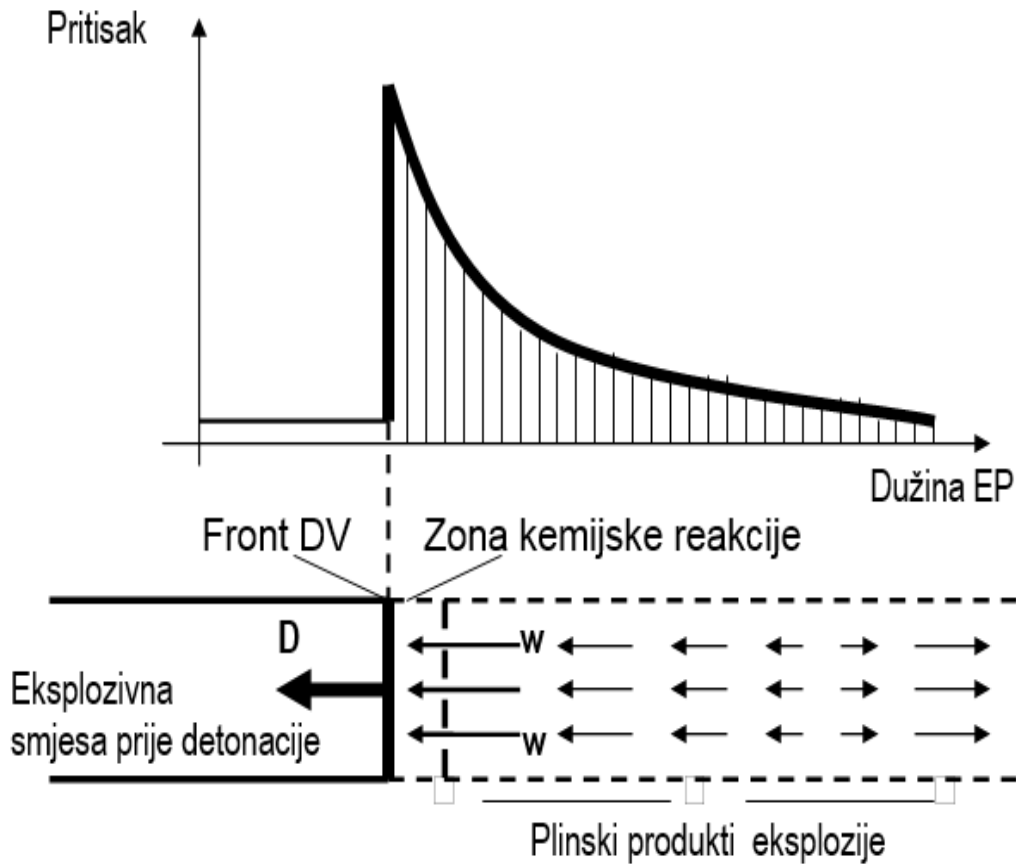


Slika 3.1 Shema širenja stvarne detonacije; 0 – Eksplzivna smjesa prije detonacije; 1 - Fronta detonacije (predstavlja udarni val); 2 – Završena kemijska reakcija (C-J ravnina); 3 - Plinski produkti detonacije;  $a$  - Širina zone kemijske reakcije;  $\lambda_s$  – Širina fronta detonacije (udarnog vala) i  $b$  - Širina zone detonacije [33]

Eksperimentalna istraživanja ukazala su na pulsirajući karakter detonacije kako kod plinovitih tako i kod kondenziranih eksplozivnih materija. Ova su otkrića dovela u sumnju postavljeni fizički model detonacije, odnosno postavljene energetske strukture zone izdvajanja topline.

Rezultati novijih eksperimentalnih istraživanja procesa detonacije ukazuju na uzajamno djelovanje fronta udarnog vala u području samozapaljenja i na vrlo složene nestacionarne hidrodinamičke procese, koji i diktiraju "izbor" procesa širenja u datoj sredini: pulsirajući ili ravnomjerni. Prema Apinu, širenje procesa detonacije po kondenziranoj eksplozivnoj materiji je uvjetovano tzv. probojno - strujnim mehanizmom izazivanja kemijskih reakcija. U skladu s tim mehanizmom u procesu detonacije dolazi do proboja struje plinova iz zone reakcija u slojeve eksplozivne materije, koji nisu zahvaćeni reakcijom.

Na slici 3.2 prikazan je proces detonacije i fronta detonacijskog vala [33].

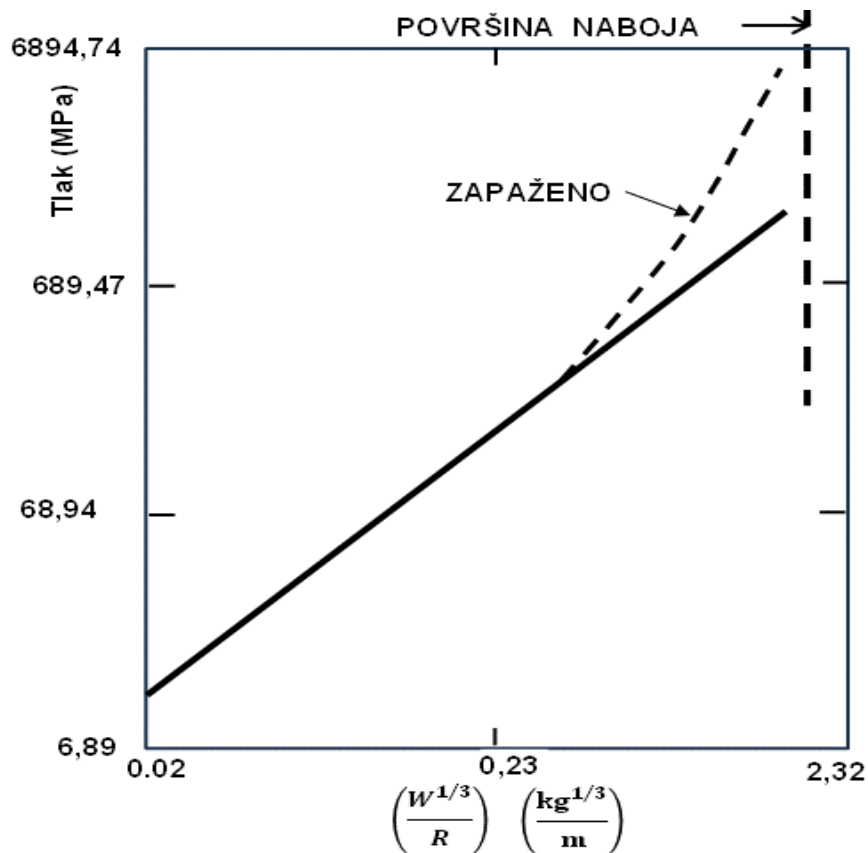


Slika 3.2 Shema odvijanja procesa detonacije cilindričnog eksplozivnog punjenja [33]

Tijekom detonacije, udarni val formira se u volumenu eksplozivnog punjenja, na slici 3.2 prikazan je prirast tlaka u odnosu na težinu eksplozivnog punjenja i radijusa udaljenosti od središta eksplozivnog punjenja do njegova ruba.

Na slici 3.3 prikazan je maksimalni tlak udarnog vala i širenje udara, u eksplozivnom punjenju, skaliran i izražen u funkciji  $z_s = W^{1/3}/R$ , gdje  $z_s$  skalirana udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke,  $W$  je masa eksplozivnog punjenja, a  $R$  je udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke.

Vidi se kako je prirast tlaka udarnog vala, unutar volumena eksplozivnog punjenja, dijelom linearan, a na rubnom dijelu pojavljuje se nelinearni prirast udarnog vala.



Slika 3.3 Promjena tlaka udarnog vala u funkciji  $W^{1/3}/R$  [32]

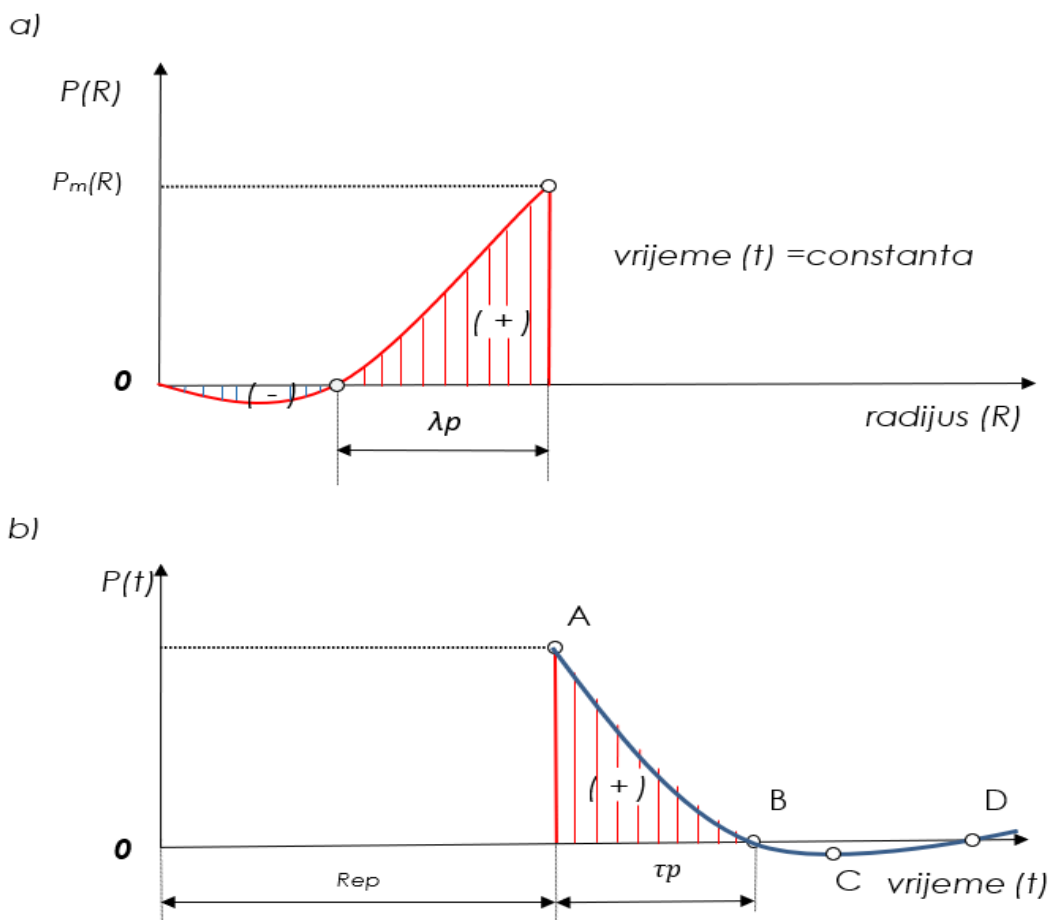
Detonacijski val je složene strukture, njegovo širenje je uvjetovano gibanjem udarnog vala u zoni kemijske reakcije i zoni konačnih produkata detonacije. U realnom procesu detonacije kemijske reakcije odvijaju se u konačnom vremenu, prema tome i širina fronta realnog detonacijskog vala ima konačnu vrijednost [33].

Detonacija eksplozivne tvari je takav oblik pretvorbe kod kojeg se energija aktiviranja prenosi kroz eksplozivnu tvar mehanizmom adijabatske kompresije udarnih valova. To ponašanje je uvjetovano velikom brzinom odvijanja kemijske reakcije u reakcijskoj zoni, tako da se nastali plinovi "nemaju vremena" širiti u suprotnom smjeru od smjera širenja zone fronta, već podržavaju front, pri čemu se stvaraju još veći tlakovi koji utječu na povećanje brzine odvijanja kemijskih reakcija, a time i nove količine plinova. Zona odvijanja kemijskih reakcija pri detonaciji znatno je uža nego pri sagorijevanju i s frontom sačinjava tzv. detonacijski val [26].

Brzina širenja detonacijskog vala je najznačajnija karakteristika brizantne eksplozivne tvari. Ta brzina ne ovisi o vanjskim uvjetima, već prvenstveno od kemijskog sastava eksplozivne tvari, promjera punjenja, gustoće punjenja, početnog impulsa i nekih drugih faktora [26].

Tijekom eksperimenta izmjerene su vrijednosti tlaka u određenim točkama eksplozivnog polja u različitim vremenima. Eksplozivno polje je prostor u kojem dolazi do promjena parametara nakon eksplozije, kao posljedica djelovanja eksplozije. Utvrđeno je kako se promjena tlaka u vremenu ponaša po eksponencijalnoj funkciji. Gibanje fronta udarnog vala sastoji se od pomicanja skoka tlaka od ruba plinovitih produkata eksplozije iza fronte vala u smjeru širenja [33].

Na slici 3.4 prikazana je promjena tlaka pri detonaciji i razvoju udarnog vala u eksplozivnom punjenju te širenju udarnog vala u okolini.

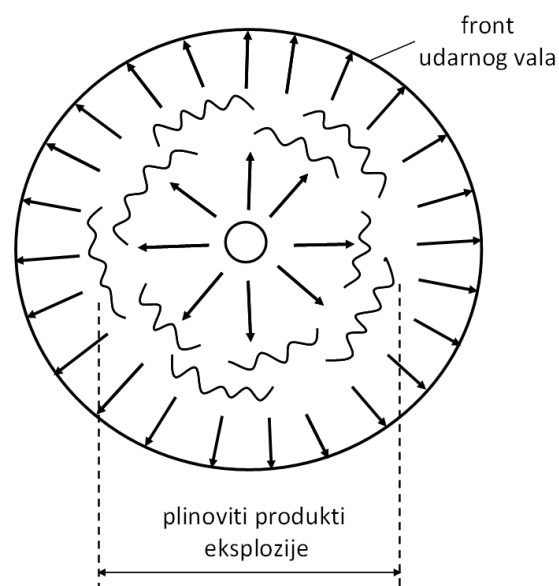


Slika 3.4 Promjena tlaka (a) udarnog vala od centra eksploziva do kontakta s okolinom i (b) udarnog vala u okolinu [27]

Na slici 3.4 a) prikazana je promjena tlaka u volumenu eksplozivnog punjenja, u trenutku kad je udarni val dosegao rub eksplozivnog punjenja. Prostorno širenje zone nadtlaka ( $\lambda p$ ) je dužina udarnog detonacijskog vala. Na slici 3.4 b) je prikazano rasprostiranje maksimalnog tlaka udarnog vala, nastalog detonacijom eksploziva, nakon detonacije eksploziva, u okolinu. Vrijeme djelovanja nadtlaka ( $\tau p$ ) naziva se period udarnog vala, a površina iznad perioda vala naziva se puni impuls tlaka u promatranoj točki. Maksimalni tlak ( $P_m(R)$ ) naziva se „tlak na frontu udarnog vala“ [27].

Kod eksplozivne materije koja detonira, raste tlak u reakcijskoj zoni i do reda veličine  $2 \times 10^{10}$  Pa, nakon završetka kompletnog kemijskog procesa. Ekspanzija nastalih plinova oslobađa energiju, u vrlo kratkom vremenu, što se koristi prvenstveno za razaranje okoline, prskanje košuljice projektila, formiranje udarnog vala i njegovo rušilačko djelovanje [26].

Brizantno djelovanja užarenih plinovitih produkata eksplozije stvara orkan i snažnu turbulenciju, koji ima ograničen domet, što ovisi o gustoći sredine u kojoj je eksplozija inicirana. Kompresija sredine inicira udarni val koji se u jednom trenutku odvaja od plinovitih produkata i samostalno širi dalje kroz sredinu i ne prouzrokuje značajnije kretanje sredine kroz koju prolazi, što je prikazano na slici 3.5 [26].



Slika 3.5 Shematski prikaz odvajanja udarnog vala od plinovitih produkata eksplozije [26]

Eksplozija je inicirana kemijska reakcija koja se odvija u vrlo kratkom vremenu, tijekom detonacije stvara se toplina, plinovi i tlak unutar volumena eksplozivnog punjenja. Nakon završetka detonacije visoki tlak snažno tlači sredinu oko eksplozivnog punjenja i u sredini se formira komprimirana zona i taj poremećaj se širi u okolinu.

### 3.2.3 Faze podvodne eksplozije

Podvodna eksplozija je vrlo složena fizikalna pojava, koja se može podijeliti u više faza. Prva faza obuhvaća detonaciju eksplozivnog punjenja, pri čemu se eksplozivno punjenje kemijskom reakcijom pretvara u užarene plinske produkte pod visokim tlakom.

U drugoj fazi visoki tlak plinskih produkata generira udarni val, koji se radijalno širi u vodi, u početku većom brzinom, a nakon kraćeg vremena brzinom zvuka u vodi, po teoriji zvučnog vala. Val se širi kompresijom i širenjem slojeva vode, a pri tome uzrokuje promjenu gustoće, volumena i tlaka u vodi.

U trećoj fazi produkti eksplozije se šire i formiraju plinski mjehur, koji se višekratno širi i skuplja pa pokreće masu vode oko sebe i stvara tlakove u vodi te uzrokuje gibanje vodene mase.

## 3.3 Osnove teorije akustičnog vala

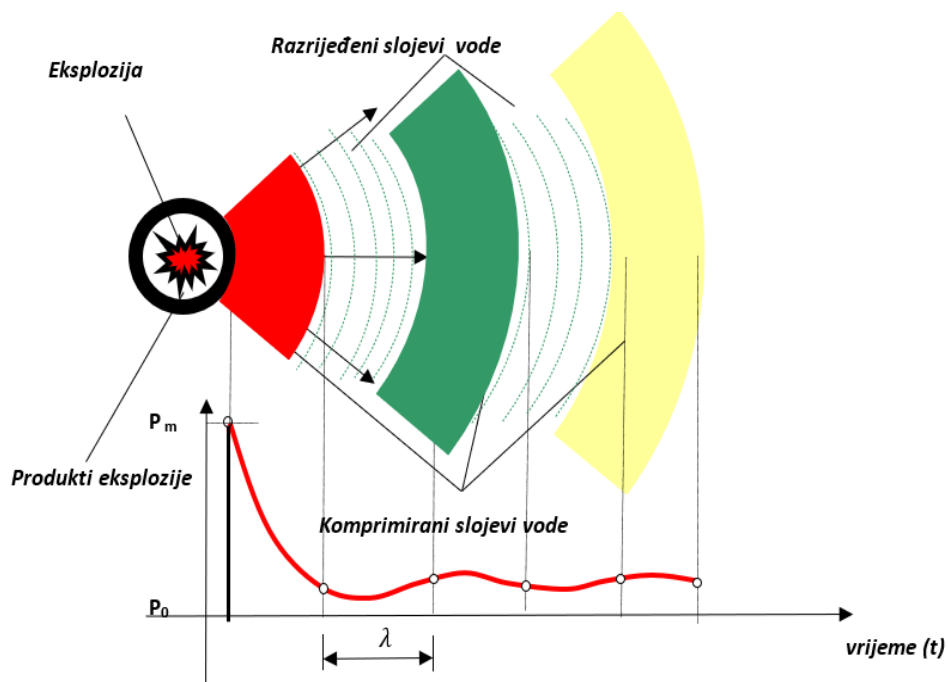
Nakon detonacije eksploziva, uslijed snažne kompresije sloja vodene mase koja ovija produkte eksplozije generira se udarni tlačni val, koji se širi u prostor vode. Širenje i ponašanje udarnog tlačnog vala od podvodne eksplozije odvija se prema teoriji akustičnog vala.

Stoga se nameće potreba opisati neke pojave i zakone akustičkog vala radi lakšeg razumijevanja fizikalnih pojava i primjene zakona na širenje, refleksiju i refrakciju udarnog vala nastalog pri podvodnoj eksploziji i u interakciji s konstrukcijom.

Širenje udarnog vala, u početku se odvija većom brzinom, koja nakon nekoliko milisekundi ili na udaljenosti od 10 polumjera eksplozivnog punjenja od središta eksplozije, se smanjuje na brzinu oko 1500 m/s, koja približno odgovara brzini širenja zvuka u vodi [20] i [2].

Širenje udarnog vala može se odvijati u plinovitom, tekućem i krutom mediju. Razlika je donekle u tome što se u plinovima i tekućinama javljaju samo longitudinalni valovi (kad se čestice pomiču u pravcu širenja vala), dok u krutim sredinama javljaju se i transverzalni valovi (kad se čestice pomiču okomito na pravac širenja vala) [34].

Generiranje i širenje udarnog vala te formiranje eksplozivnog polja, kod podvodne eksplozije, može se opisati koristeći analogiju nastanka i širenja zvučnog polja pod vodom. Zvučno polje kao i eksplozivno polje je vodeni prostor u kojem se širi zvučni odnosno udarni val eksplozije što uzrokuje promjene parametara polja uslijed djelovanja zvuka odnosno eksplozije. Ono nastaje kad se poremeti stacionarno stanje tlakova i gibanja čestica, neke elastične sredine. Podvodna eksplozija generira udarni val, čestice vode u neposrednom kontaktu s vanjskim sfernim slojem produkata eksplozije, ako je eksplozivni naboj oblika kugle, maksimalno su stlačene dok se udarni val širi radialno iz središta eksplozije u svim smjerovima, vidjeti sliku 3.6.



Slika 3.6 Shematski prikaz podvodne eksplozije (produkti eksplozije i udarni val) [34]

Gustoća vode u narednom sloju se povećava, a pod promijenjenim uvjetima naredni sloj vode prihvaća tlačni val pa mijenja početnu gustoću i komprimira se, a u njega penetriraju čestice iz prethodnog sloja, potiskujući njegove čestice prema narednom susjednom sloju. Smanjenjem tlaka stvara se niži tlak pa se čestice vode iz najbližeg

susjednog sloja gibaju u smjeru nižeg tlaka. Na njihovo mjesto, zbog smanjenja tlaka, dolaze čestice iz susjednog sloja, itd. Tako se čestice vode pomiču u suprotnom smjeru i val nižeg tlaka vode se koncentrično pomiče [34].

Opisana pojava se ponavlja, a udarni val se radijalno širi sve dalje u prostoru u kojem se generira eksplozivno polje. Ovakva pojava može se promatrati kao promjena položaja čestica vode koje titraju oko svog ravnotežnog položaja. Umjesto pomaka čestica, može se promatrati promjena gustoće vode. Također u eksplozivnom polju postoje i druge pojave, čestice koje se gibaju imaju svoju brzinu i ubrzanje, a promjene su neposredno vezane za promjene tlaka u vodi. Ove pojave su sve međusobno povezane [34].

Razmak između dvaju uzastopnih maksimuma (ili minimuma) je valna duljina ( $\lambda$ ), broj periodičnih promjena u jedinici vremena je frekvencija ( $f$ ) i recipročna vrijednost frekvencije je period ( $T$ ). Najjednostavniji slučaj zvučnih valova je kad su vremenske promjene periodične i kad se promjene odvijaju po sinusoidi i kosinusoidi te eksponencijalnom prikazu [34].

### 3.3.1 Osnovna svojstva elastične sredine

Nadalje će biti pojašnjene pojave zgušćivanja (kompresije) i razrjeđivanja (ekspanzije) tekućine. Relativna promjena gustoće, stišljivost  $S_T$ , bit će:

$$S_T = \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0}, \quad (3.1)$$

gdje je:

$\rho_0$  - početna gustoća i

$\rho_T$  - trenutna gustoća nakon promjene.

Širenje je promjena gustoće koja uzrokuje promjenu volumena, ako je početni volumen  $V_0$ , a povećani volumen  $V_T$ , onda je relativna promjena volumena sredine:

$$\Delta V = \frac{V_T - V_0}{V_0} = \frac{\delta V}{V_0} \quad (3.2)$$

Veličine  $S_T$  i  $\Delta V$  mogu imati pozitivni ili negativni predznak [34].

Matematički opis zvučnih valova u jednoj ravnini, u ravnini valova, osnovne valne jednadžbe zapisane su obliku:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \quad \text{jednadžba održanja mase,} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial v_x}{\partial t} \quad \text{jednadžba održanja količine gibanja i} \quad (3.4)$$



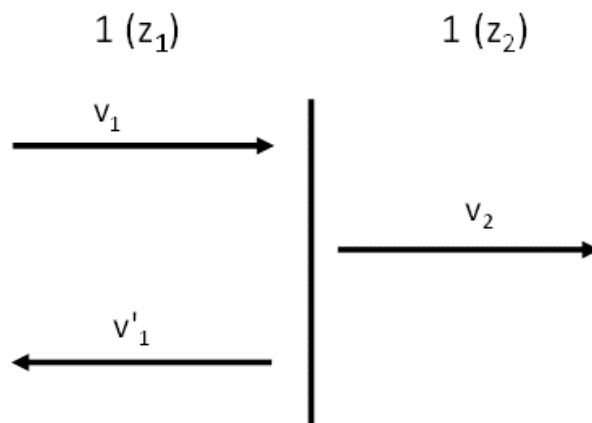
$$\frac{\partial S}{\partial t} = k \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{jednadžba održanja energije.} \quad (3.5)$$

Gdje je  $p$  tlak,  $\rho_0$  statička (početna) gustoća materijala,  $v_x$  je komponenta brzine materijala,  $S$  je relativna promjena gustoće tj. stišljivost.

Rješavanje diferencijalnih jednadžbi je vrlo složeno i kompleksno za ograničen broj jednostavnih zadaća. Razvoj numeričkih postupaka i računala omogućio je korištenje numeričkog računalnog postupka za rješavanje ove vrlo kompleksne zadaće. Svakako je potrebno nakon više serija provedenih, dobro odabranih, numeričkih računalnih simulacija podvodne eksplozije uz promjene raznih parametara provesti eksperimente kako bi se verificirali dobiveni rezultati.

### 3.3.2 Refleksija zvučnog vala pri okomitom upadu

Zvučni val se može prikazati zrakama koje izlaze iz izvora i koje su okomite na čelo vala. Ova činjenica omogućava primjenu optičkih zakona, koji se odnose na refleksiju svjetlosti, u akustici [34], vidjeti sliku 3.7.



Slika 3.7 Shema refleksije i prolaza udarnog vala na graničnoj plohi [34]

Pretpostavimo kako zvučni val upada okomito na granicu dviju neograničenih sredina s valnim impedancijama  $Z_1 = \rho_1 c_1$  i  $Z_2 = \rho_2 c_2$ , gdje je  $\rho$  gustoća, a  $c$  brzina zvuka. Jedan dio energije će se reflektirati od granice dviju sredina, a drugi dio energije će prijeći u drugu sredinu [34].

Za određivanje koeficijenta refleksije u jednadžbi, dovoljno je izraziti kontinuitet titrajnih brzina,  $v_1 + v'_1 = v_2$  i kontinuitet tlaka  $p_1 + p'_1 = p_2$  na graničnoj ravni, gdje su:

$v_1, p_1$  - amplituda brzine i tlak upadnog vala,

$v'_1, p'_1$  - amplituda brzine i tlak reflektiranog vala i

$v_2, p_2$  - amplituda brzine i tlak u prolaznom valu,

$$p_1 = Z_1 v_1; \quad p'_1 = -Z'_1 v'_1 \quad \text{i} \quad p_2 = Z_2 v_2. \quad (3.6)$$

Faktori refleksije i prijenosa određuju se iz odnosa tlakova:

$$r_v = \frac{p'_1}{p_2} \quad \text{i} \quad t_v = \frac{p_2}{p_1}. \quad (3.7)$$

Nakon sređivanja izraza dobivamo sljedeće jednadžbe:

$$r_v = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{i} \quad t_v = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (3.8)$$

Koeficijenti refleksije i prijenosa određuju se na temelju odnosa intenziteta:

$$R_v = \frac{\frac{p_1'^2}{Z_1}}{\frac{p_1^2}{Z_1}} = r_v^2 = \left( \frac{1 - \frac{Z_1}{Z_2}}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} \right)^2 \quad \text{i} \quad (3.9)$$

$$T_v = \frac{\frac{p_2^2}{Z_2}}{\frac{p_1^2}{Z_1}} = \frac{Z_1}{Z_2} t_v = \frac{4}{\left( \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} + \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}} \right)^2}. \quad (3.10)$$

Vrijednost  $R_v + T_v = 1$ , prema zakonu o održanju energije, koeficijenti  $Z_1$  i  $Z_2$  ovise samo o svojstvima sredine [34]. Koeficijent prijenosa je maksimalan i jednak jedinici ako su vrijednosti  $Z_1$  i  $Z_2$  jednake, a smanjuje se s povećanjem ili smanjenjem odnosa njihovih vrijednosti.

### 3.3.3 Refleksija vala pri kosom upadu

U akustici kao i u optici refleksija i lom zraka podliježe Deckartovom zakonu, naime:

- reflektirana i prijelomna zraka su u ravnini upadne zrake,
- reflektirani kut jednak je upadnom i
- kut loma ( $\alpha_l$ ) s upadnim kutom ( $\alpha_u$ ), prema Snellovom zakonu, su u međusobnoj ovisnosti

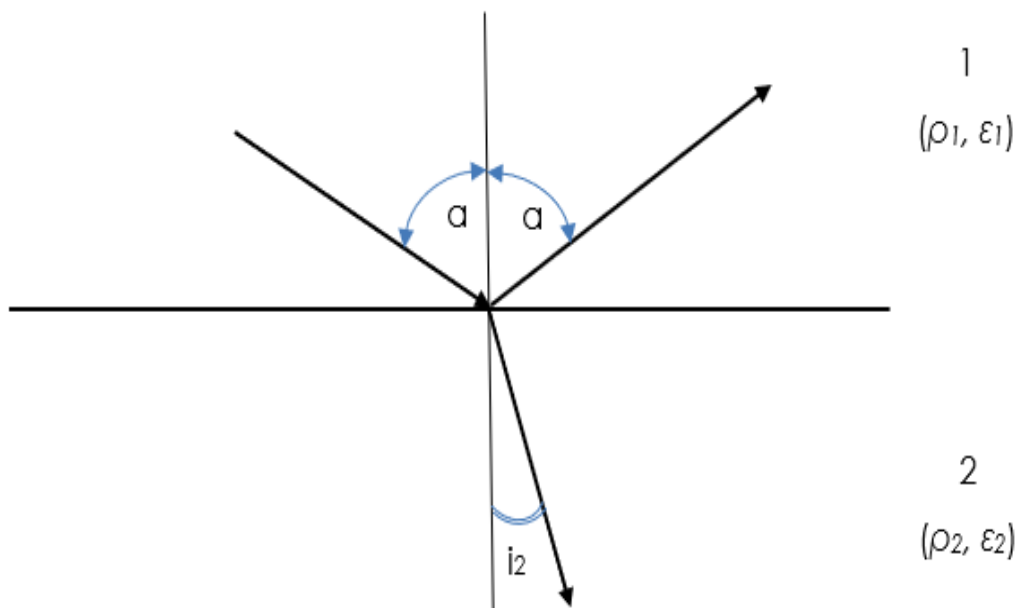
$$\frac{\sin \alpha_u}{\sin \alpha_l} = \frac{c_1}{c_2}. \quad (3.11)$$

Analogno ranijim razmatranjima, a polazeći od kontinuiteta zvučnog tlaka i okoline titrajne brzine, dolazi se do izraza za koeficijent refleksije:

$$r_v = \frac{p'_1}{p_1} = \frac{Z_2 \cos \alpha_u - Z_1 \cos \alpha_l}{Z_2 \cos \alpha_u + Z_1 \cos \alpha_l}. \quad (3.12)$$

Granični kut je kut kod kojeg počinje potpuna refleksija, vidjeti sliku 3.8, granični kut je određen jednadžbom:

$$\sin \alpha_{gr} = \frac{c_1}{c_2}. \quad (3.13)$$



Slika 3.8 Refleksija i lom akustičke zrake pri kosom upadu [34]

Potpuna refleksija nastaje samo ako je zadovoljen uvjet  $c_1 < c_2$ , tj. pri prolazu zvuka u sredinu s većom brzinom širenja. Na primjer, ako zvuk iz zraka dolazi na vodenu površinu, onda je:

$$\sin \alpha_{gr} = \frac{330}{1500} = 0,22, \quad (3.14)$$

$$\alpha_{gr} = 12,7^\circ. \quad (3.15)$$

Refleksija zvučnih valova odvija se prema zakonima optike samo ako je valna duljina puno manja od dimenzija prepreke od koje se reflektira. Zvučni valovi zaobilaze prepreku i pri tome mijenjaju smjer širenja, tako dolazi do difrakcije ili skretanja valova. Što je veći odnos valne duljine prema dimenzijama prepreke, difrakcija je veća.

U većini slučaja, podvodne eksplozije djeluju na površine podvodnih građevina većih dimenzija tako da pojava difrakcije udarnog vala uglavnom nije moguća.

### 3.4 Brzina zvuka u morskoj vodi

Brzina zvuka u morskoj vodi je različita u raznim morima i godišnjim dobima te prosječno iznosi 1450 do 1550 m/s. Postoji više načina za određivanje brzine širenja zvuka u vodi ali se najčešće koristi sljedeća relacija [35]:

$$c = 1450 + 4,206t_w - 0,0366t_w^2 + 1,37(S_w - 35) + 0,0175h_w, \quad (3.16)$$

gdje je:

$c$  – brzina zvuka (m/s),

$t_w$  – temperatura vode (° C),

$S_w$  – slanost (‰) i

$h_w$  – dubina vode u m.

Na temelju ove jednadžbe može se zaključiti kako je brzina širenja zvuka u vodi funkcija temperature, slanosti i tlaka. Promjena temperature, slanosti i hidrostatičkog tlaka dovodi do promjene volumenske elastičnosti vode i gustoće, uslijed čega dolazi do promjene brzine zvuka. Povećanje temperature za 1 °C brzina širenja zvuka povećava se za 3,3 m/s [35].

Zvučni valovi pri prelazu iz jedne sredine u drugu se dijelom reflektiraju, a dijelom prelaze u drugi medij. Zbog različitih temperatura u površinskim i dubljim slojevima vode te stalnih promjena temperature ljeti i zimi te danju i noću stalno dolazi do iskrivljivanja zvučnih zraka zbog razlike u temperaturi (refrakcija) [35].

Prethodno spomenuto se može primijeniti i na slatku vodu u prirodnim i umjetnim jezerima (akumulacijama), rijekama, kanalima i sl. Jedina razlika je što kod slatke vode ne postoji utjecaj slanosti.

### 3.5 Hidrostatički tlak

U mirnoj tekućini, koja je u stanju mirovanja, pojavljuje se hidrostatički tlak, kao posljedica težine stupca vode, koji se linearno povećava s dubinom tekućine. Hidrostatički tlak u određenoj točki tekućine djeluje u svim smjerovima jednako pa vrhovi vektora tlaka razapinju kuglu sa središtem u promatranoj točki. Veličina tlaka u određenoj točki ovisi o dubini tekućine i gustoći tekućine, a računa se prema sljedećoj relaciji:

$$P_h(h_w) = \rho g h_w \text{ (MPa)}. \quad (3.17)$$

Gdje je  $\rho$  gustoća tekućine  $\text{kg/m}^3$ ,  $h_w$  dubina u metrima, a  $g$  je gravitacijska konstanta, koja iznosi  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ . Gustoća vode, na temperaturi od 4 °C, je  $1000 \text{ kg/m}^3$ , a morske vode  $1025 \text{ kg/m}^3$ . Porastom odnosno smanjenjem temperature gustoća vode se smanjuje. Specifična težina vode  $\gamma$  jednaka je umnošku gustoće morske vode  $\rho$  i gravitacijske konstante  $g$  pa je izraz za hidrostatički tlak u moru, kako slijedi:

$$P_h(h_w) = \rho g h_w = \gamma h_w = 1025 \cdot 9,81 h_w = 9810 h_w \text{ (N/m}^3\text{)} = 10,05 h_w \text{ (kN/m}^3\text{)}. \quad (3.18)$$

Prilikom određivanja hidrostatičkog tlaka također je potrebno dodati i atmosferski tlak – tlak stupca zraka na površini vode. Atmosferski tlak ovisi o visini stupca, vlažnosti i

temperaturi zraka te stopi opadanja standardne temperature. Za daljnju analizu uzima se atmosferski tlak zraka na razini mora (nadmorska visina je nula), uz standardnu temperaturu od 15 °C i stopu opadanja standardne temperature 0,0065 K/m, (kelvina po metru) pa je tlak:  $P_{atm}=101325$  (Pa) [36]. Izraz za ukupni tlak na određenoj dubini mora računa se prema sljedećoj relaciji:

$$P_{hu}(h_w) = P_{atm} + \gamma h_w \text{ (MPa)}. \quad (3.19)$$

Ukupni tlak na dubini mora od 20 m, prema relaciji 3.19, za usvojene vrijednosti atmosferskog tlaka ( $P_{atm}=101325$  Pa) i gustoće morske vode ( $\rho=1025$  kg/m<sup>3</sup>) i gravitacijske konstante ( $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>) iznos [37]:

$$P_{hu}(h_w) = P_{atm} + \gamma h_w = 101325 + 10055,25 \times 20, \quad (3.20)$$

$$P_{hu}(h_w) = 302430 \text{ (Pa)} = 0,30243 \text{ (MPa)}. \quad (3.21)$$

Za proračun ukupnog tlaka u slučaju da se vodena površina nalazi na određenoj nadmorskoj visini (jezero, akumulacija, rijeka, ...) tada je atmosferski tlak manji i gustoća tekućine je manja u odnosu na morsku vodu.

Vrijednosti tlaka, koji se javljaju kod podvodne eksplozije, su reda veličine do 5000 MPa. S obzirom na ogromne razlike u veličini hidrostatičkog i tlaka od djelovanja podvodne eksplozije i dubine na kojima se grade podvodne građevine, utjecaj hidrostatičkog tlaka se može zanemariti, za neke analize, što je primijenjeno u ovom radu.

### 3.6 Parametri eksplozivnog polja u vodi

Podvodna eksplozija predstavlja kompleksan proces termodinamičkih, aerodinamičkih i hidrodinamičkih pojava koji oslobađa ogromnu količinu energije u kratkom vremenu [27]. Cijeli proces detonacije predstavlja brzu propagirajuću reakciju, koja propagira u okolinu brzinom 7620 m/s [32]. Eksplozija predstavlja nuklearni, kemijski i fizički proces koji generira instant energiju (često i plinove), visoki tlak i udare. Ovaj sekvencijalni proces je praćen kemijskim i fizikalnim reakcijama, formiranjem reakcijskih produkata i oslobađanjem ogromne količine energije, koju prenosi u okolni medij [2].

Eksplozivi se nakon detonacije šire kao plin i u nekoliko milisekundi zauzimaju oko tisuću puta veći volumen od početnog. Udarni val eksplozije snažno tlači svaki materijal koji mu se nađe na putu [38].

Nakon iniciranja eksploziv detonira velikom brzinom u vrlo kratkom vremenu, pri čemu se povećava temperatura do oko 3000 °C i raste tlak na oko 5000 MPa, što se odvija u prostoru početnog volumena eksplozivnog punjenja. Nakon završetka detonacije, nastali plinoviti produkti eksplozije snažno tlače, guraju i odbacuju vodenu masu u izravnom kontaktu i povećavaju svoj volumen i do 1000 puta.

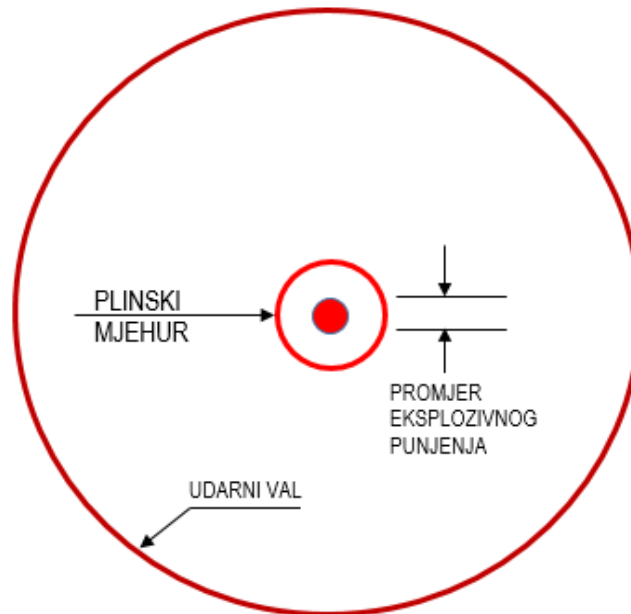
Visoki tlak u prostoru produkata eksplozije djeluje na okolni sloj vode i uzrokuje kompresiju vode i stvaranje kompresijskog sfernog pojasa, za eksplozivni naboj oblika kugle, u vodi, generira tlačni val koji se naziva udarni val. Prednja strana kompresijske zone se širi sferno, u početku brzinom 6000 – 8000 m/s, a zatim, nakon nekoliko milisekundi (na udaljenosti od 10 polumjera eksplozivnog punjenja od središta eksplozije), brzina se eksponencijalno smanjuje na oko 1500 m/s, koja približno odgovara brzini zvuka u vodi [2].

Od ukupne energije, koja nastaje u procesu podvodne eksplozije oko 57 % energije se odnosi na stvaranje udarnog vala, dok se oko 37 % ukupne energije odnosi na naknadne oscilacije i gibanje plinskog mjehura, a preostalih 6 % ukupne energije utroši se na toplinu (Arons, 1948.) [20]. Dok prema literaturi Nie [39], u podvodnoj eksploziji (UNDEX) oko 53 % od ukupne energije pretvara se u stvaranje udarnog vala, dok se preostali dio oko 47 % ukupne energije odnosi na naknadne oscilacije i gibanje plinskog mjehura.

Nakon iniciranja eksploziv detonira, u točki iniciranja eksploziva nastaje detonacijski val, koji se naglo širi i nastaju produkti eksplozije pod visokim tlakom. Plinoviti proizvodi rezultiraju sfernim plinskim mjehurom, koji se giba pod tlakom od 14000 MPa, pri temperaturi 3300 K. Visoki tlakovi uzrokuju kompresiju vode i stvaranje kompresijske zone, koja prenosi tlačni val kroz vodu [2].

Nakon eksplozije, eksploziv detonira i prelazi u plinovito stanje i stvara vrlo visoku temperaturu i tlak. Zbog toga se formira udarni val, a potom i „plinski mjehur“, od produkata eksplozije, koji se vrlo velikim brzinama šire u okolinu tj. vodu. Udarni val nastaje od dijela energije eksplozije, koju eksplozija predaje okolini, a širi se kroz vodu prethodeći rasprostiranju produkata eksplozije „plinskom mjehuru“. Udaljavanjem od centra eksplozije tlak opada, a ova pojava se naziva „slabljenje udarnog vala“ [27].

Nadalje će biti prikazan opis pojave, dijagram vremenske promjene tlaka udarnog vala, koji je dobiven na temelju eksperimentalnih rezultata kao i empirijskih izraza, predloženih u literaturi [32]. Na slici 3.9 je shematski prikaz eksplozivnog punjenja u obliku kugle, a centar eksplozije je u središtu kugle.



Slika 3.9 Udarni val i plinski mjehur pri podvodnoj eksploziji [32]

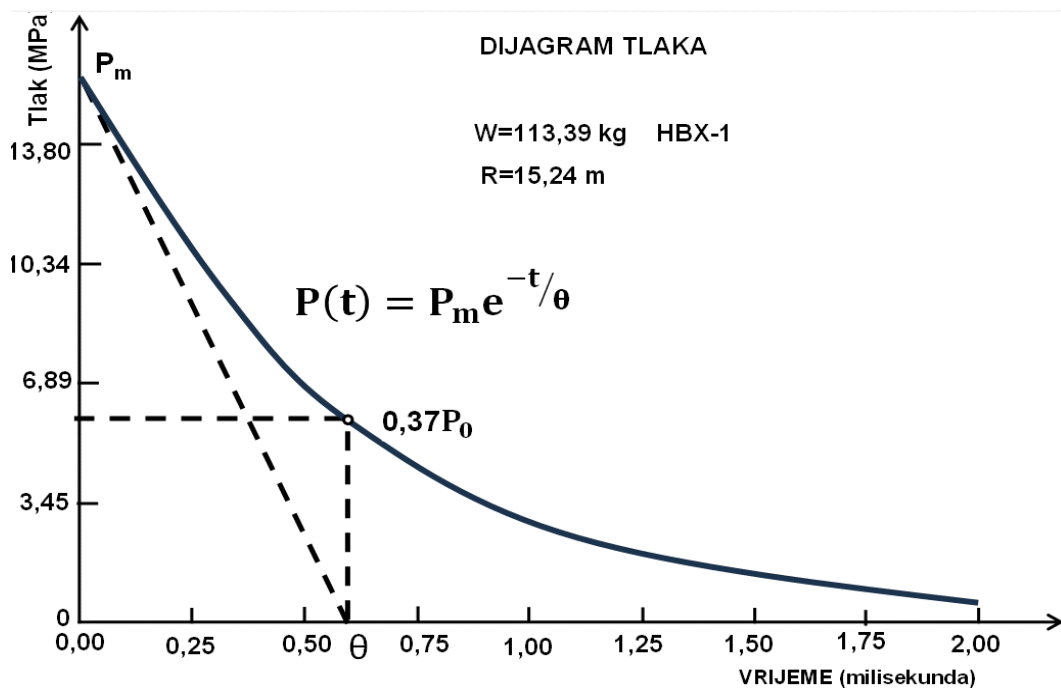
Na slici 3.9 prikazan je front udarnog vala i plinski mjehur koji se sferno šire u okolinu vodenog prostora. Formiranje i širenje plinskog mjehura događa se sa zakašnjenjem u odnosu na formiranje i širenje udarnog vala u vodi. Vrijeme propagacije udarnog vala odvija se u vremenu reda veličine milisekunde, dok se širenje i skupljanje (pulsiranje) plinskog mjehura odvija u vremenu reda veličine sekunde. Velika vremenska razlika ovih faza zahtijeva velike izazove u hidrodinamičkom modeliranju i računalnim metodama, koje uključuju obje faze [32].

Prostor u kojem se širi udarni val predstavlja eksplozivno polje. U svakoj točki eksplozivnog polja uslijed podvodne eksplozije pojavljuju se određene promjene parametara: pomak, titranje, deformacija, brzina, ubrzanje, tlak, impuls, gustoća, temperatura i dr. Udarni val se prenosi kroz vodenu sredinu kompresijom i širenjem slojeva vode. Treba napomenuti kako čestice vode titraju oko svog ravnotežnog položaja i tako prenose udarni val.

Zbog kompleksnosti rješavanja diferencijalnih jednadžbi koje opisuju eksplozivno polje (udarni val), najznačajniji parametri eksplozivnog polja u pojedinim točkama se mogu odrediti pomoću empirijskih izraza, koji su nastali temeljem eksperimentalnih istraživanja. Što se također odnosi i na generiranje, migriranje i pulsiranje plinskog mjehura, koji se pojavljuje nakon udarnog vala.

### 3.6.1 Analitički izrazi za izračun djelovanja podvodne eksplozije

Na slici 3.10 prikazan je dijagram promjena tlaka udarnog vala u funkciji vremena, u promatranoj točki, za konvencionalno oružje [32].



Slika 3.10 Dijagram promjene tlaka udarnog vala u funkciji vremena [32]

Na slici 3.10 prikazana je promjena tlaka u funkciji vremena. Vrijednost tlaka pada od maksimalne vrijednosti  $P_0$  u vremenu od  $t=0$  do  $1/e$  ( $e=2,71828$ ) ili na oko 37 % njegove početne vrijednosti u vremenskom intervalu milisekunde, gdje je  $\theta$  konstanta opadanja tlaka odnosno vremenska konstanta udarnog vala. Eksperiment je proveden detonacijom eksplozivnog punjenja 250 LB (113 kg) HBX-1 na udaljenosti od 50 ft (15 m) od promatrane točke. Funkcija tlaka ima maksimalnu vrijednost oko 2500 psi (17,24 MPa) i eksponencijalno se smanjuje do vrijednost oko 850 psi (5,86 MPa) za 0,62 milisekunde. Eksponencijalno ponašanje eksplozivnog polja za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini je izuzetno prikladno i omogućava izravno računanje impulsa i energije udarnog vala [32].



Tlak udarnog vala je određen izrazom [32]:

$$P(t) = P_m e^{-\frac{t}{\theta}} \quad 0 \leq t \leq \theta. \quad (3.22)$$

Za TNT (trinitrotoluen):

$$P_m \text{ (MPa)} = 53,3 \left\langle \frac{(W[\text{kg}])^{1/3}}{R[\text{m}]} \right\rangle^{1,13}, \quad (3.23)$$

$$\theta \text{ (m s)} = 0,092 (W[\text{kg}])^{1/3} \left\langle \frac{(W[\text{kg}])^{1/3}}{R[\text{m}]} \right\rangle^{-0,18}. \quad (3.24)$$

Energija udarnog vala:

$$E_u = \frac{1}{\rho_0 c_0} \int_0^t P^2(t) dt \quad (3.25)$$

Za TNT (trinitrotoluen):

$$E_u = 84,34 W^{1/3} (W^{1/3}/R)^{2,04} \text{ (mkPa)}, \quad (3.26)$$

Impuls udarnog vala:

$$I = \int_0^t P(t) dt. \quad (3.27)$$

Za TNT (trinitrotoluen):

$$I = 5,75 W^{1/3} (W^{1/3}/R)^{0,89} \text{ (kPa s)}. \quad (3.28)$$

### 3.6.2 Empirijski izrazi za određivanje parametara podvodne eksplozije

Temeljem provedenih eksperimentalnih istraživanja više autora je pokušalo temeljem dobivenih rezultata pripremiti empirijske izraze za potrebe rješavanja praktičnih inženjerskih proračuna djelovanja podvodne eksplozije na brodove, podmornice, podvodne građevine i sl. U narednom dijelu bit će predstavljeni neki najznačajniji empirijski izrazi iz literature.

U literaturi [3], Cole (1948.) na temelju provedenih eksperimentalnih istraživanja podvodne eksplozije, predlaže empirijske izraze. Empirijski izraz za određivanje maksimalnog tlaka  $P_m$ , na udaljenosti  $R$  od središta eksplozije:

$$P_m = k \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha. \quad (3.29)$$

Istraživanje koeficijenata ( $k$  i  $\alpha$ ) provedeno je za eksplozivni naboj pentolita oblika kugle, pa je dobiven izraz za tlak:

$$P_m \text{ (MPa)} = 52,39 \left( \frac{W^{1/3}(\text{kg})}{R(\text{m})} \right)^{1,13}. \quad (3.30)$$

Koeficijenti ( $k$  i  $\alpha$ ), za eksplozivni naboj TNT oblika kugle i gustoće  $1,52 \text{ g/cm}^3$ , dani su u izrazu za tlak:

$$P_m(\text{MPa}) = 58,56 \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}(\text{kg})}{R(\text{m})} \right)^{1,21}, \quad (3.31)$$

gdje su:

$k$  i  $\alpha$ , koeficijenti koji ovise o vrsti eksploziva,

$W$ : masa eksplozivnog punjenja (kg) i

$R$ : udaljenost promatrane točke od središta eksplozije (m).

Empirijski izraz za promjenu tlaka u vremenu na određenoj udaljenosti od središta eksplozije je [3]:

$$P(t) = P_m \cdot e^{-\frac{t}{\theta}}, \quad (3.32)$$

gdje su:

$P_m$ : maksimalni tlak na određenoj udaljenosti, prema izrazu (3.30),

$t$  - vrijeme dolaska fronte udarnog vala na određenu udaljenost i

$\theta$  - vremenska konstanta eksponencijalnog opadanja tlaka.

Impuls:

$$I\left(\frac{t}{W^{\frac{1}{3}}}\right) = l W^{\frac{1}{3}} \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\beta}, \quad (3.33)$$

Energija:

$$E_u\left(\frac{t}{W^{\frac{1}{3}}}\right) = m W^{\frac{1}{3}} \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{\gamma}, \quad (3.34)$$

gdje su:  $l$  i  $m$  te  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  koeficijenti koji ovise o vrsti i gustoći eksploziva,

$W$ : masa eksplozivnog punjenja (kg) i

$R$ : udaljenost promatrane točke od središta eksplozije (m).

U literaturi [3], su dane vrijednosti pojedinih koeficijenata za pojedine vrste eksploziva. Vrijednosti koeficijenata za TNT, gustoće 1,52 g/cm<sup>3</sup>, su:  $l=6,08$ ;  $\beta=0,86$ ;  $m=122,47$  i  $\gamma=2,11$ .

Empirijski izrazi za maksimalni tlak predlažu se za udaljenosti promatrane točke od središta eksplozije od  $10 R_{ep}$  do  $100 R_{ep}$ , gdje je  $R_{ep}$  radijus eksplozivnog punjenja [3].

Empirijski izraz za određivanje maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala  $P_m$  ako je  $R_{ep} < R < 6 R_{ep}$  [3]:

$$P_m(\text{Mpa}) = 710,16 \frac{R_{ep}}{R} e^{-\frac{2R_{ep}}{R}}, \quad (3.35)$$

gdje je  $R_{ep}$  promjer eksplozivnog punjenja, a  $R$  udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke.

Ako se uzme početna gustoća eksploziva 1,5 g/cm<sup>3</sup> izraz dobiva sljedeći oblik:

$$P_m(\text{MPa}) = 38,29 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} e^{0,1086 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R}}, \quad (3.36)$$

gdje su:

$W$ : masa eksplozivnog punjenja (kg) i

$R$ : udaljenost promatrane točke od središta eksplozije (m).

Period plinskog mjehura:

$$T = K \frac{W^{\frac{1}{3}}}{(D+33)^{\frac{1}{6}}} \text{ (s)}, \quad (3.37)$$

gdje su:

$K$ : koeficijent koji ovisi o vrsti eksploziva,

$W$ : masa eksplozivnog punjenja (kg) i

$D$ : dubina do središta eksplozije (m).

U literaturi [17] i [40], predlažu se i sljedeći empirijski izrazi za određivanje vremenske promjene tlaka  $P(R, \tau)$  na udaljenosti  $R$  od središta eksplozije:

$$P(R, \tau) = P_c \left[ \frac{R_{ep}}{R} \right]^{(1+A)} f(\tau), \quad (3.38)$$

$$\tau = \left[ \frac{a_c}{R} \right]^B \frac{v_c t}{a_c}, \quad (3.39)$$

$$f(\tau) = e^{(-\tau)}, \text{ za } \tau \leq 1, \quad (3.40)$$

$$f(\tau) = 0,8251 e^{-1,338\tau} + 0,1749 e^{-0,1805\tau}, \text{ za } \tau \leq 7, \quad (3.41)$$

gdje su:

$R$  - udaljenost promatrane točke od središta eksplozije,

$R_{ep}$  - radijus eksplozivnog punjenja u obliku kugle,

$f(\tau)$  – izraz za eksponencijalno opadanje tlaka i

$P_c, v_c, A$  i  $B$  – konstante koje ovise o vrsti i specifičnoj težini eksploziva.

Empirijski izraz za tlak udarnog vala je prikazan pomoću posebnih skalarnih valnih jednadžbi u obliku [17]:

$$p_t(x_j, t) = p_I(t) + p_x(x_j) \quad (3.42)$$

gdje su:

$p_I(t)$  - specifični tlak ovisan o vremenu na udaljenosti  $x_0$ ,

$p_x$  – je pomak točke, zadan relacijom:

$$p_x(x_j) = \frac{|x_s + x_0|}{|x_s + x_j|} \quad \text{za sferni val,} \quad (3.43)$$

$$= 1 \quad \text{za ravni val,}$$

gdje su:

$x_s$  - točka središta eksplozije i

$x_j$  – položaj promatrane točke.

Uzimajući u obzir vrijeme potrebno da val prevali put od promatrane točke do točke  $j_x$ , dobiva se izraz [17]:

$$p_I(x_j, t) = p_t \left( t - \frac{R_j - R_{ep}}{c} \right) \cdot p_x(x_j) \equiv p_t(\tau_j) p_x(x_j), \quad (3.44)$$

$$\begin{matrix} R_0 = \|x_s - x_0\| \\ R_j = \|x_s - x_j\| \end{matrix} \quad \text{za sferne valove} \quad (3.45 \text{ i } 3.46)$$

gdje su:

$c$  - brzina udarnog vala u fluidu i

$\tau_j$ - vrijeme kašnjenja koje odgovara vremenu potrebnom da val prevali put od promatrane točke do točke  $x_j$ .

U literaturi [17], su predložene vrijednosti pojedinih koeficijenata za dvije vrste eksploziva TNT, koji su različite gustoće (1,52 g/cm<sup>3</sup> i 1,60 g/cm<sup>3</sup>). Vrijednosti koeficijenata za TNT, gustoće 1,52 g/cm<sup>3</sup>, su:  $P_c = 1,42 \text{ GPa}$ ;  $v_c = 992 \text{ m/s}$ ;  $A = 0,13$  i  $B = 0,18$ . Vrijednosti koeficijenata za TNT, gustoće 1,60 g/cm<sup>3</sup>, su:  $P_c = 1,67 \text{ GPa}$ ;  $v_c = 1010 \text{ m/s}$ ;  $A = 0,18$  i  $B = 0,185$ .

U literaturi [8] i [37] je predloženo poboljšanje empirijskih izraza Cole 1948. [3] za izračun određenih parametara u eksplozivnom polju podvodne eksplozije. Empirijski izrazi za određivanje smanjenja maksimalnog tlaka  $P_m$ , pulsiranja plinskog mjehura podvodne eksplozije u dubokoj vodi, su:

$$P(t) = P_m e^{\frac{t}{\theta}}, \quad t < \theta \quad (3.47)$$

$$P(t) = P_m 0,368 \frac{\theta}{t} \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_p} \right)^{1,5} \right], \quad t_1 < t < \theta \quad (3.48)$$

$$P(t) = P \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_p} \right)^{1,5} \right] - \Delta P, \quad t_p > t > t_1 \quad (3.49)$$

$$P(t) = \frac{10^5}{\bar{r}} \left( \frac{0,686 \bar{P}_0^{0,96}}{\zeta} 5,978 \bar{P}_0^{0,62} \frac{1 - \zeta^2}{\zeta^{0,92}} - 30,1 P_0^{0,65} \zeta^{0,36} \right) - \frac{1,73 x 10^{10}}{\bar{r}^4 \bar{P}_0^{0,43}} (1 - \zeta^2) \zeta^{0,1} \quad (3.50)$$

$$T - t_2 \geq t \geq t_p$$

$$P(t) = P_{m1} e^{-\frac{(t-T)^2}{\theta_1^2}} \quad T + t_2 \geq t > T - t_2. \quad (3.51)$$

Gdje su:

$$P_m = \left\{ \begin{matrix} 4,41 \times 10^7 \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1,5} & 6 < \frac{R}{R_{ep}} < 12 \\ 5,24 \times 10^7 \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1,13} & 12 < \frac{R}{R_{ep}} < 240 \end{matrix} \right\} \text{ [MPa]} \quad (3.52)$$

$$\theta = \begin{cases} 0,405R_{ep}\bar{r}^{-0,45}10^{-3} & \bar{r} < 30 \\ 3,5\sqrt{lgr - 0,9}, & \bar{r} \geq 30 \end{cases}; \quad (3.53)$$

$$t_1 = \frac{R_{ep}}{c} (\bar{r} - m)$$

$$m = 11,4 - \frac{10,6}{\bar{r}^{0,13}} + \frac{1,51}{\bar{r}^{1,26}}; \quad \bar{r} = \frac{R}{R_{ep}}; \quad \bar{t} = \frac{c}{R_{ep}} t;$$

$$\Delta P = \frac{10^{-5}}{\bar{r}^4} (5635\bar{t}^{-0,54} - 0,113\bar{P}_h^{-0,54}\bar{t}^{-2}); \quad P^* = \frac{7,173 \times 10^8}{\bar{r}(\bar{t} + 5,2 - m)^{0,87}}; \quad t_p = \left( \frac{850}{\bar{P}_h^{-0,85}} - \frac{20}{\bar{P}_h^{-1/3}} + \right.$$

$$\left. m \right) \frac{R_{ep}}{c};$$

$$\frac{t_1}{(\bar{t}_1 + 5,2 - m)^{0,87}} = 4,9 \times 10^{-10} P_m \bar{r} \theta \frac{c}{R_0}; \quad P_{hu} = P_{atm} + \rho g D; \quad P_h = \frac{P_h}{P_{atm}};$$

$$P_{m1} = \frac{39 \times 10^6 + 24 P_h}{R_{bc}};$$

$$\vartheta_1 = 20,7 \frac{R_0}{P_h^{0,41}}; \quad t_2 = 3290 \frac{R_0}{P_h^{0,71}};$$

$$\bar{R} = \frac{\bar{R}}{R_{ep}}; \quad \bar{R}_{bc} = \sqrt{R^2 + \Delta H^2 - 2R\Delta H \sin \varphi}; \quad \Delta H = 13,2 \frac{W^{11/24}}{(H+10,3)^{5/6}}.$$

Gdje su:

$P_m$  maksimalni tlak udarnog vala (Pa),  $\theta$  vremenska konstanta udarnog vala (s),  $W$  masa eksploziva TNT (kg),  $R$  udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (m),  $R_{ep}$  početni radijus eksplozivnog punjenja (m),  $t_1$  vrijeme dolaska tlačnog udarnog vala do promatrane točke,  $t_p$  vrijeme trajanja pozitivnog tlaka udarnog vala (s),  $P_{hu}$  hidrostatički tlak u centru eksplozije (Pa),  $P_{atm}$  atmosferski tlak (Pa),  $c$  brzina zvuka u vodi (m/s),  $D$  početna dubina inicijalnog punjenja (m),  $P_{m1}$  maksimalni tlak prvog pulsiranja plinskog mjehura (Pa),  $\vartheta_1$  vremenska konstanta drugog pulsiranja (s),  $R$  udaljenost središta eksplozije do promatrane točke (m) i  $\varphi$  kut koji zatvara spojnica središta eksplozije i promatrane točke s horizontalom (°).

Empirijski izraz za izračunavanje maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala, za eksploziju u neograničenoj sredini, bez utjecaja slobodne površine vode i dna [27]:

$$P_m(R) = 53,3 \left( \frac{(\sqrt[3]{kW})}{R} \right)^n \quad (MPa), \quad (3.54)$$

gdje su:

$k$  - koeficijent koji ovisi o vrsti eksploziva (za TNT  $k=1$ ),

$W$  - masa eksploziva u kg,

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke u m i

$R_{ep}$  - radijus eksplozivnog punjenja u m.

Na temelju eksperimentalnog istraživanja utvrđeno je [27]:

$$n=1,13 \quad \text{za} \quad 7 < R/R_{ep} < 1000 \text{ i}$$

$$n=1,92 \quad \text{za} \quad 1 < R/R_{ep} < 5.$$

Pri podvodnoj eksploziji na dnu dolazi do pojačanja udarnog vala odnosno povećanja efekta eksplozije, u tom slučaju uvodi se i koeficijent  $k_0$ , koji daje utjecaj dna, a ovisi o vrsti materijala na dnu (stijena, pijesak, mulj i dr.) pa izraz ima sljedeći oblik [27]:

$$P_m(R) = 53,3 \left( \frac{(\sqrt[3]{k_0 W})}{R} \right)^n \quad (\text{MPa}). \quad (3.55)$$

Vrijednosti koeficijenata  $k_0$  za neke vrste tla su navedene u literaturi [27].

Promjena tlaka u vremenu na određenoj udaljenosti zahtijeva složen matematički opis, obično se aproksimira pomoću eksponencijalne funkcije ( $e^n$ ) ili hiperbole, u obliku [27]:

$$p(t, R) = p_m(R) \frac{1}{\left[ \alpha \left( \frac{t_c}{R_{ep}} - \frac{R}{R_{ep}} \right) + 1 \right]^2} \sigma_0 \left( \frac{t_c}{R_{ep}} - \frac{R}{R_{ep}} \right), \quad (3.56)$$

gdje su:

$c$  – brzina širenja zvuka u vodi,

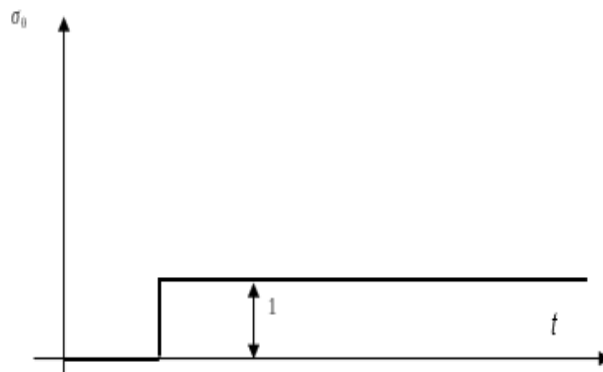
$\alpha$  – koeficijent eksploziva, za TNT  $\alpha = 0,27$  i

$R_{ep}$  – radijus eksplozivnog punjenja.

$$-\sigma_0 \left( \frac{t_c}{R_{ep}} - \frac{R}{R_{ep}} \right) = 0 \quad \text{za} \quad \frac{t_c}{R_{ep}} < \frac{R}{R_{ep}},$$

$$\sigma_0 \left( \frac{t_c}{R_{ep}} - \frac{R}{R_{ep}} \right) = 1 \quad \text{za} \quad \frac{t_c}{R_{ep}} \geq \frac{R}{R_{ep}}. \quad (3.57)$$

To je jedinična funkcija koja je do određene vrijednosti vremena 0, a kad se udarni val približi zadanoj točki tlak naglo raste skokom na 1, kao što je prikazano na slici 3.11 [27].



Slika 3.11 Graf jedinične funkcije [27]

Empirijski izraz za impuls je:

$$I(t, R) = p_m(R) \frac{R_{ep}}{\alpha c_0} \left[ 1 - \frac{1}{\alpha \left( \frac{t_0 - R}{R_{ep}} + 1 \right)} \right] \text{ vrijedi za } t \geq r/c. \quad (3.58)$$

Promjena tlaka u vremenu na određenoj udaljenosti ako se aproksimira eksponencijalnom funkcijom dobiva se sljedeći izraz [27]:

$$p(t, R) = p_m(R) e^{-\frac{1}{Q} \left( t - \frac{R}{c} \right)} \sigma_0 \left( t - \frac{R}{c} \right), \quad (3.59)$$

gdje je Q – vremenska konstanta, koja se može izračunati pomoću empirijskih izraza, koji su navedeni u literaturi [27].

Empirijski izraz za impuls:

$$I(t, R) = p_m(R) Q \left[ 1 - e^{-\frac{1}{Q} \left( t - \frac{R}{c} \right)} \right] \sigma_0 \left( t - \frac{R}{c} \right). \quad (3.60)$$

Tlak u nekoj točki u kojoj imamo djelovanje izravnog udarnog vala i reflektiranog vala od slobodne površine vode je:

$$p(t, r_1) = p_m(r_1) e^{-\frac{1}{Q} \left( t - \frac{r_1}{c} \right)} \sigma_0 \left( t - \frac{r_1}{c} \right) - p_m(r_2) e^{-\frac{1}{Q} \left( t - \frac{r_2}{c} \right)} \sigma_0 \left( t - \frac{r_2}{c} \right), \quad (3.61)$$

gdje su:

$r_1$  – udaljenost od središta eksploziva do promatrane točke i

$r_2$  – udaljenost koju prevali val od središta eksplozije do slobodne površine vode i reflektirani val od slobodne površine vode do promatrane točke [27].

Empirijski izrazi za izračunavanje tlaka u eksplozivnom polju, (Reid 1996.) [20]:

Maksimalni tlak:

$$P_m K_1 \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{A_1} \text{ (MPa)}. \quad (3.62)$$

Promjena tlaka na udaljenosti R:

$$P_m(t) = K_1 \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{A_1} \cdot e^{-\frac{(t-t_0)}{\theta}} \text{ (MPa)}. \quad (3.63)$$

Konstanta opadanja tlaka:

$$\theta = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{A_2}. \quad (3.64)$$

Empirijski izraz za izračunavanje impulsa udarnog vala [7]:

Impuls:

$$I(t) = K_3 W^{\frac{1}{3}} \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{A_3}. \quad (3.65)$$

Empirijski izraz za energiju udarnog vala te za period i radijus plinskog mjehura [20]:

Energija udarnog vala:

$$E_u(t) = K_4 W^{\frac{1}{3}} \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{A_4}, \quad (3.66)$$

Period plinskog mjehura:

$$T = K_5 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{\left( (D+9,8)^{\frac{5}{6}} \right)} \text{ (s)}, \quad (3.67)$$

Radijus plinskog mjehura:

$$R_m = K_6 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{\left( (D+9,8)^{\frac{1}{3}} \right)} \text{ (m)}, \quad (3.68)$$

gdje su:

$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, A_1, A_2, A_3, i A_4$  - koeficijenti koji ovise o vrsti eksploziva,

$W$  - masa eksplozivnog punjenja u kilogramima,

$R_m$  - udaljenost promatrane točke od središta eksplozije u metrima i

$D$  - dubina eksplozivnog punjenja u metrima.

Ovi empirijski izrazi su nastali na temelju empirijskih izraza (Cole 1948.) [3] pa je važno napomenuti kako se empirijski izrazi za maksimalni tlak predlažu za udaljenosti promatrane točke od središta eksplozije od  $10 R_{ep}$  do  $100 R_{ep}$ , gdje je  $R_{ep}$  radijus eksplozivnog punjenja [20].

Plinski mjehur, Grzadziela [18], ima više uzastopnih pulsiranja, uz postepeno smanjenje maksimalne veličine i tlaka udarnih valova i perioda. Pulsiranje plinskog mjehura ovisi o dubini i težini eksplozivnog punjenja, međusobna zavisnost prikazana je sljedećom relacijom [18]:

$$D < 1,2 \sqrt[3]{W}, \quad (3.69)$$

gdje je  $W$  - masa eksplozivnog punjenja u kilogramima.

Empirijski izraz za prvi period plinskog mjehura je [18]:

$$T_1 = 0,3 \frac{\sqrt[3]{W}}{1+0,1D} \quad (3.70)$$

Empirijski izraz za prvi, odnosno maksimalni radijus plinskog mjehura je [18]:

$$R_{max} = 1,53 \sqrt[3]{\frac{W}{1+0,1D}} \text{ (m)}. \quad (3.71)$$

Empirijski izrazi za eksploziv TNT je [18]:

Maksimalni tlak:

$$P_m = 523 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{1,13} 10^5 \text{ (Pa)} \quad (3.72)$$



Vremenska promjena tlaka na udaljenosti  $R$ :

$$p(t) = \left( K_1 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{A_1} \right) e^{-\frac{(t-t_0)}{\theta}} \text{ (MPa)}, \quad (3.73)$$

gdje je:  $t_0$  - vrijeme dolaska fronte udarnog vala u promatranu točku.

Konstanta opadanja tlaka (vremenska konstanta) je:

$$\theta = \sqrt[3]{W} \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{(-0,22)} 9,3 \times 10^{-5} \text{ (s)}. \quad (3.74)$$

Nakon detonacije, Trevino [15], eksplozivnog naboja, u obliku kugle, nastaje udarni val koji se sferno širi u prostor vode. Udarni val podvodne eksplozije dolazi do slobodne površine vode, smanjuje se (engl. *cut off*) i odbija kao negativni udarni val. Pretpostavlja se kako voda može izdržati određenu napetost, tako što udarni val uzrokuje cijepanje i razbijanje površinskog sloja vode. Područje između površinske ljuske i temeljne (relativno) mirne vode naziva se područje kavitacije, a cijeli proces je nazvan kavitacija područja (engl. *bulk cavitation*) [41] i [20].

Gornja i donja granica područja kavitacije može se odrediti pomoću određenih izraza. Gornja granica je skup točaka, u kojima je zadovoljena jednakost  $F(x,y)=0$ . Točke gornje granice određuju se iz spomenute funkcije, u sljedećem matematičkom zapisu [15] i [41]:

$$F(x, z) = K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_1} e^{-\left( \frac{r_2 - R}{c\theta} \right)} + P_{atm} + \gamma(D - z) - K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_2} \right]^{A_1} = 0 \quad (3.75)$$

Donja granica područja kavitacije je skup točaka koje zadovoljavaju jednakost  $G(x,y)=0$ , a točke se određuju prema spomenutoj funkciji prikazanoj u sljedećem matematičkom zapisu:

$$G(x, z) = \frac{P_i}{c\theta} \left\{ 1 + \left[ \frac{r_2 2D \left[ \frac{D+z}{r_2} \right]}{R} \right] \left[ \frac{A_2 r_2}{R} - A_2 - 1 \right] \right\} - \frac{A_1 P_i}{r_2} \left[ r_2 - 2D \left( \frac{D-z}{R} \right) \right] + \gamma \left( \frac{D-z}{R} \right) + \frac{A_1}{r_2} (P_i + P_{atm} + \gamma(D - z)) = 0 \quad (3.76)$$

$$P_i = K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_1} e^{-\left( \frac{r_2 - R}{c\theta} \right)} \quad (3.77)$$

Gdje su:

$x$  i  $z$  - koordinate promatrane točke,

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke,

$r_2$  - udaljenost od središta imaginarnog eksplozije do promatrane točke,

$c$  - brzina zvuka u vodi,

$D$  - dubina eksplozivnog punjenja,

$\theta$  - koeficijent smanjenja tlaka,

$\gamma$  - specifična težina vode,

$P_{atm}$  - atmosferski tlak,

$W$  – masa eksplozivnog punjenja i

$K_i$  i  $A_i$  – koeficijenti udarnog vala [15].

U literaturi su razni autori predložili različite vrijednosti koeficijenata empirijskih izraza za maksimalne vrijednosti tlaka TNT-a, neke vrijednosti su prikazane u tablici 3.4.

Tablica 3.4 Koeficijenti empirijskih izraza za TNT raznih autora [42, 20, 23, 3, 18 i 44]

Koeficijenti	Autori					
	Ozarmut	Mousem	Moradi	Cole	Gradziela	Rao
$K_1$ (k)	52,4	52,12	52,16	52,39	52,3	52,12
$A_1$ ( $\alpha$ )	1,13	1,18	1,13	1,13	1,13	1,18
$K_2$	0,084	0,092	0,0956		0,093	0,092
$A_2$	-0,23	-0,185	-0,22		-0,22	-0,185
$K_3$		6,52		5,44	5,768	6,52
$A_3$		0,98		0,80	0,63	0,98
$K_4$		94,34		82,53		94,34
$A_4$		2,155		2,05		2,155

U literaturi [37] su prikazani također empirijski izrazi (Zamyshlyayev, 1973.), na drugačiji način. Empirijski izrazi za određivanje smanjenja maksimalnog tlaka  $P_m$ , pulsiranja plinskog mjehura podvodne eksplozije, u dubokoj vodi, su:

$$p(t) = \begin{cases} P_m e^{\frac{t}{\theta}}, & 0 \leq t \leq \theta \\ P_m 0,368 \frac{\theta}{t} \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_p} \right)^{1,5} \right], & 0 \leq t \leq t_p \end{cases} \quad (3.78)$$

$$P_m = \begin{cases} 4,41 \times 10^7 \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1,5} & 6 < \frac{R}{R_{ep}} < 12 \\ 52,24 \times 10^7 \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1,13} & 12 < \frac{R}{R_{ep}} < 240 \end{cases} \quad (3.79)$$

$$t_p = \frac{R_0}{c} \left[ 850 \left( \frac{P_h}{P_{atm}} \right)^{0,81} - 20 \left( \frac{P_h}{P_{atm}} \right)^{\frac{1}{3}} + 11,4 - 1,06x \left( \frac{R}{R_{ep}} \right)^{0,13} + 1,51 \left( \frac{R}{R_{ep}} \right)^{1,26} \right] \quad (3.80)$$

$$\theta = \begin{cases} 0,405 R_0 \left( \frac{R}{R_{ep}} \right)^{0,45} 10^{-3}, & \frac{R}{R_0} < 30, \\ 3,5 \frac{R_0}{c} \sqrt{\lg \left( \frac{R}{R_{ep}} \right) - 0,9}, & \frac{R}{R_0} \geq 30 \end{cases} \quad (3.81)$$

$$P_{hu} = P_{atm} + \rho g D \quad (3.82)$$

Gdje su:  $P_m$  maksimalni tlak udarnog vala (Pa),  $\theta$  konstanta vremenskog opadanja udarnog vala (s),  $W$  masa eksploziva TNT (kg),  $R$  udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (m),  $R_{ep}$  početni radijus eksplozivnog punjenja (m),  $t_p$  vrijeme potrebno da plinski mjehur postigne maksimalni radijus (s),  $P_{hu}$  hidrostatički tlak u centru eksplozije (Pa),  $P_{atm}$  atmosferski tlak (Pa),  $c$  brzina zvuka u vodi (m/s),  $D$  početna dubina eksplozivnog punjenja (m).

Treba istaći kako su koeficijenti empirijskih izraza različiti za razne vrste eksploziva i za nuklearne eksplozije. U tablici 3.5 prikazane su vrijednosti koeficijenata za neke eksplozive i nuklearnu eksploziju [20].

Tablica 3.5 Koeficijenti empirijskih izraza za različite vrste eksplozivne tvari [20]

	Koeficijent	HBX-1	TNT	PENT	NUCLEAR
Maksimalni tlak udarnog vala	$K_1$	53,51	52,12	56,21	$1,06 \times 10^4$
	$A_1$	1,144	1,18	1,194	1,13
Koeficijent smanjenja	$K_2$	0,092	0,092	0,086	3,627
Konstanta	$A_2$	-0,247	-0,185	-0,257	-0,22
Impuls	$K_3$	7,263	6,52	6,518	$4,5 \times 10^4$
	$A_3$	0,856	0,98	0,903	0,91
Energija toka udarnog vala	$K_3$	106,8	94,34	103,11	$1,15 \times 10^7$
	$A_4$	2,039	2,155	2,094	2,04
Period plinskog mjehura	$K_5$	2,302	2,064	2,098	249,1
Radijus plinskog mjehura	$K_6$	3,775	3,383	3,439	400,5

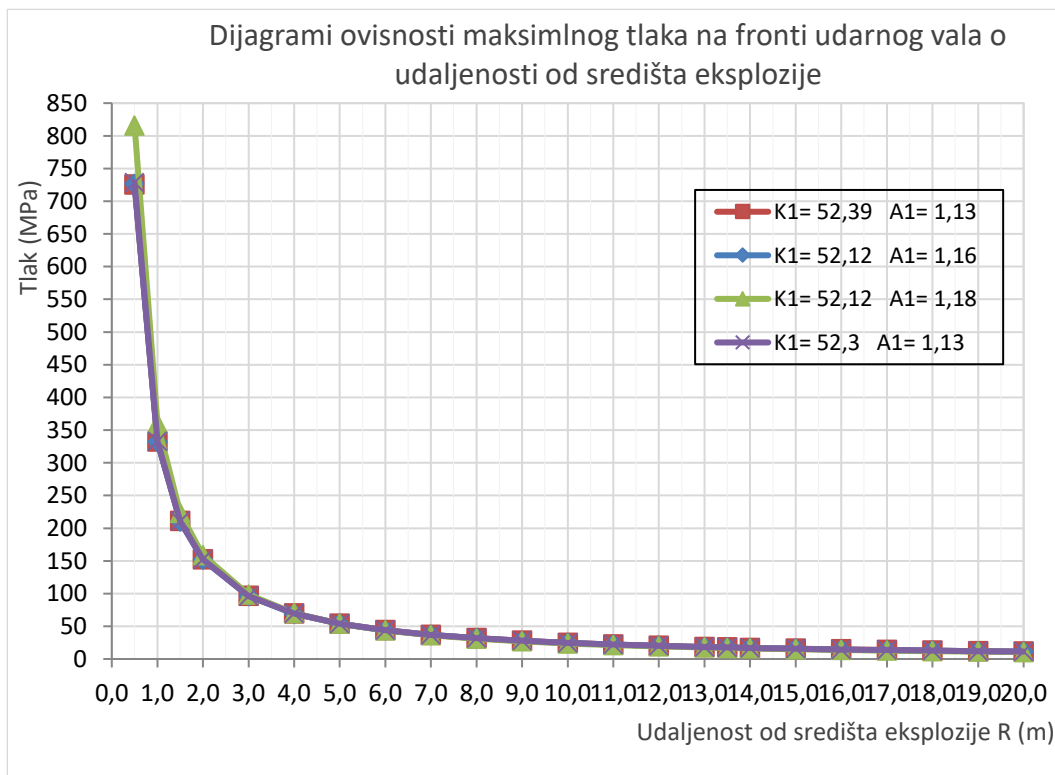
Temeljem raspoloživih empirijskih izraza mogu se izračunati neki parametri djelovanja podvodne eksplozije. Empirijski izrazi uzimaju u obzir samo neke ulazne veličine, što ovisi o izrazu (vrsta eksploziva, promjer eksplozivnog punjenja, masa eksplozivnog punjenja, udaljenost od središta eksplozije do promatrane (mjerne) točke. Pored spomenutih ulaznih veličina neki izrazi uzimaju u obzir i gustoću eksplozivnog punjenja. Svi ostali parametri daju svoj utjecaj kroz koeficijente kao veličine fiksne vrijednosti – konstante, za određenu vrstu eksploziva.

Pojedine fizikalne vrijednosti djelovanja podvodne eksplozije svakako ovise i o gustoći eksploziva, gustoći vode, brzini zvuka u vodi, temperaturi vode i gradijentu promjene temperature, hidrostatičkom tlaku, salinitetu vode, brzini detonacije eksploziva i mnogim drugim veličinama. Neke od spomenutih veličina se zadaju pri numeričkom modeliranju djelovanja podvodne eksplozije, u računalnim programima.

Empirijski izrazi mogu dati prihvatljive rezultate za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini, gdje nema interakcije izravnog udarnog vala s valovima reflektiranim od slobodne površine vode ili dna te pregrade. Proračun maksimalne vrijednosti i vremenske promjene tlaka u nekoj točki, u ograničenoj sredini, primjenom empirijskih izraza, dobije se zbrajanjem rezultata promjene vrijednosti tlaka kao zbroj pojedinih vrijednosti neovisnih izoliranih pojava.

Numeričkom simulacijom podvodne eksplozije u ograničenoj sredini rješava se zadaća uvažavajući istovremeno interakcije izravnih i reflektiranih valova u promatranom području.

Kako je navedeno, u literaturi su predložene različite vrijednosti koeficijenata u empirijskim izrazima za TNT. Za neke od predloženih koeficijenata proveden je izračun maksimalne vrijednosti tlaka, za eksploziv TNT mase 134,08 kg, na udaljenostima od 0,5 m do 20 m s korakom od 0,5 m, te su prikazane dobivene vrijednosti tlaka u dijagramima. Dijagrami maksimalne vrijednosti tlaka prikazani su na slici 3.12.



Slika 3.12 Ovisnosti maksimalnog tlaka na fronti udarnog vala o udaljenosti

Na slici 3.12 vidljiva su značajnija odstupanja na udaljenosti oko 0,5 m od centra eksplozije, a na ostalim dijelovima odstupanja su zanemariva.

U tablici 3.6 su prikazana relativna odstupanja vrijednosti maksimalnog tlaka ( $\Delta$ ) pojedinih krivulja od Coleove krivulje ( $K_I= 52,39$  i  $A_I= 1,13$ ), za masu eksploziva 136,08 kg [3].

Tablica 3.6 Odstupanje tlaka za različite koeficijente u empirijskom izrazu

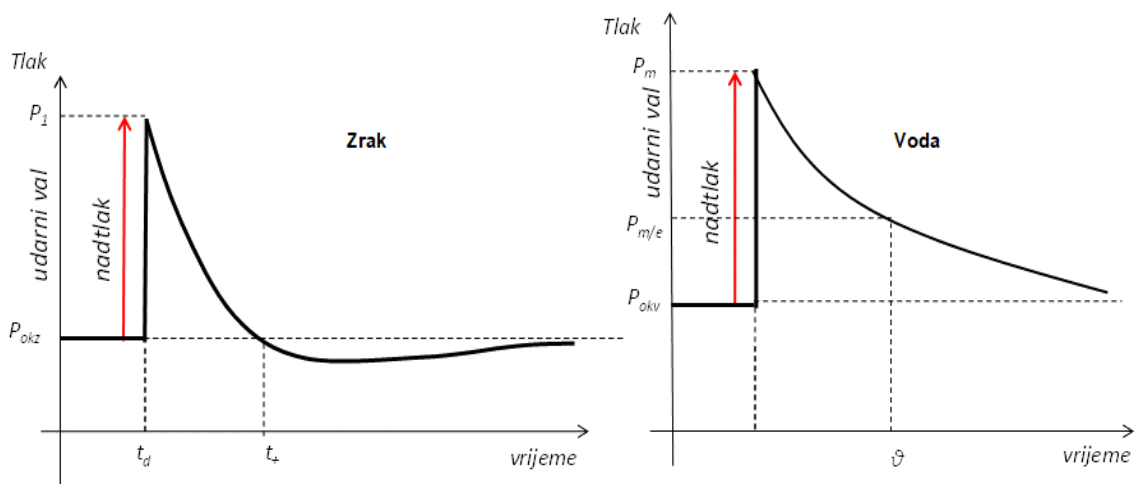
R	$K_I= 52,39$ $A_I= 1,13$	$K_I= 52,12$ $A_I= 1,16$	$\Delta$	$K_I= 52,12$ $A_I= 1,18$	$\Delta$	$K_I= 52,3$ $A_I= 1,13$	$\Delta$
m	MPa)	MPa)	%	MPa)	%	MPa)	%
0,5	725,64	726,5	-0,12	815,67	8,99	728,44	-0,49
1,0	332,48	331,9	0,16	360,00	6,93	332,84	0,55
1,5	210,86	209,9	0,44	223,10	5,95	210,50	0,76
2,0	152,34	151,7	0,44	158,88	5,34	152,08	0,76
3,0	96,35	95,9	0,44	98,47	4,58	96,18	0,76
4,0	69,61	69,3	0,44	70,12	4,11	69,49	0,76
5,0	54,09	53,9	0,44	53,89	3,78	54,00	0,76
6,0	44,02	43,8	0,44	43,46	3,53	43,95	0,76
7,0	36,98	36,8	0,44	36,23	3,33	36,92	0,76
8,0	31,80	31,7	0,44	30,95	3,17	31,75	0,76
9,0	27,84	27,7	0,44	26,93	3,03	27,79	0,76
10,0	24,72	24,6	0,44	23,78	2,91	24,67	0,76
11,0	22,19	22,1	0,44	21,25	2,81	22,15	0,76
12,0	20,11	20,0	0,44	19,18	2,72	20,08	0,76
13,0	18,37	18,3	0,44	17,45	2,64	18,34	0,76
13,5	17,61	17,5	0,44	16,69	2,60	17,58	0,76
14,0	16,90	16,8	0,44	15,99	2,57	16,87	0,76
15,0	15,63	15,6	0,44	14,74	2,50	15,60	0,76
16,0	14,53	14,5	0,44	13,66	2,44	14,51	0,76
17,0	13,57	13,5	0,44	12,72	2,39	13,55	0,76
18,0	12,72	12,7	0,44	11,89	2,33	12,70	0,76
19,0	11,97	11,9	0,44	11,15	2,29	11,95	0,76
20,0	11,29	11,2	0,44	10,50	2,24	11,27	0,76

Pregledom vrijednosti u tablici 3.6 vidi se kako je maksimalno relativno odstupanje tlaka, za analizirane koeficijente 8,99 %. U radu, pri modeliranju, koristi se količina eksploziva 134,08 kg i eksperimentalni rezultati, za tu količinu, Cole [3]. Stoga će se, tijekom daljnjih istraživanja i izračuna maksimalne vrijednosti tlaka pomoću empirijskog izraza, u ovom radu, kao mjerodavni, koristiti koeficijenti:  $K_I= 52,39$  i  $A_I= 1,13$ , [3].

### 3.7 Razlike između eksplozije u zraku i vodi

Podvodna i zračna eksplozija su slične prirode, postoje temeljne razlike u utjecaju koji udarni val ima u različitim medijima. Razlike između eksplozije u zraku i eksplozije u vodi su posljedica razlike različitih svojstava okoline u kojoj se odvija eksplozija tj. zraka i vode. Voda je otprilike 800 puta gušća od zraka, gustoća zraka je oko  $1,28 \text{ kg/m}^3$ , a gustoća vode je oko  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Voda je oko 10000 puta manje stlačiva od zraka. Za jednake težine eksplozivnog punjenja, udarni valovi u vodi stvaraju mnogo veće tlakove od one u zraku, ali imaju znatno manju brzinu čestica tijekom širenja. Plinski mjehur i njegova pulsiranja dodatno usložnjava i onako već zahtjevnu fizikalnu pojavu eksplozije u vodi te značajno pojačava nisku frekvenciju energije udarnog vala [46].

Dijagrami maksimalnog tlaka za eksploziju u zraku i vodi su različiti kao i empirijski izrazi za proračun određenih parametara eksplozije. Na slici 3.13 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka za eksploziju u zraku (lijevo) i eksploziju u vodi (desno) [47], [48] i [11].



Slika 3.13 Dijagram vremenske promjene tlaka eksplozije u zraku i u vodi [11] i [47]

Iz dijagrama promjene tlaka u vremenu je vidljivo kako su dijagrami različiti, kod eksplozije u zraku tlak okoline ( $P_{okz}$ ) je tlak zraka na mjestu eksplozije, dok kod podvodne eksplozije tlak okoline ( $P_{okv}$ ) je tlak zraka uvećan za hidrostatički tlak, na mjestu eksplozije. Veličine nadtlaka su različite, a tlak pada ispod tlaka okoline, kod eksplozije u zraku dok tlak kod eksplozije u vodi ne pada ispod tlaka okoline. Što znači

kako kod eksplozije u zraku tlak ima područje pozitivnog tlaka i područje negativnog tlaka, dok podvodna eksplozija ima samo područje pozitivnog tlaka.

Nadalje brzina širenja zvuka u zraku je oko 330 m/s, a u vodi je oko 1500 m/s. Tako je brzina zvuka u vodi oko 4,5 puta veća od brzine zvuka u zraku. Ova činjenica je važna zbog razlike u širenju, lomu, refleksiji i sl. udarnih valova, koji se ponašaju po teoriji akustičnih valova. Impuls tlaka udarnog vala u vodi je 15 do 20 puta veći nego u zraku. Empirijski izraz za određivanje maksimalnog tlaka za eksploziju u zraku  $P_1$ , količine eksploziva  $W$ , na udaljenosti  $R$  od središta eksplozije [47]:

$$P_1 = P_s(1 - \tau)e^{-\alpha\tau}, \quad \tau = \frac{t-t_a}{t_+ - t_n}, \quad (3.83)$$

gdje je  $\alpha$  koeficijent, koji ovisi o vrsti eksploziva, a  $\tau$  se određuje iz jednadžbe 3.83.

Postoje i drugi empirijski izrazi za izračun parametara eksplozije u zraku, što je opisano u literaturi [49].

Najpoznatiji empirijski izraz za određivanje maksimalnog tlaka  $P_m$  za eksploziju pod vodom, za količinu eksploziva  $W$ , na udaljenosti od središta eksplozije  $R$  [3]:

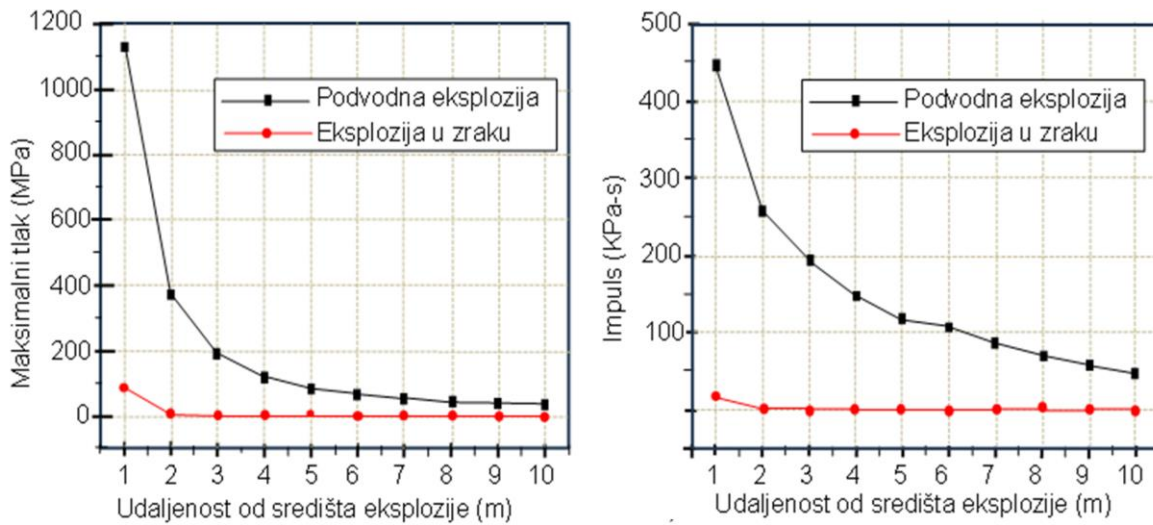
$$P_m = k \left( \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^\alpha, \quad (3.84)$$

gdje su  $k$  i  $\alpha$  koeficijenti koji ovise o vrsti eksploziva.

Pored tlaka postoje i drugi zajednički parametri eksplozije kao što je energija, impuls i dr. Impuls eksplozije predstavlja površinu između pozitivnog dijela krivulje tlaka i osi vremena, prema izrazu:

$$I = \int p_t(t) dt. \quad (3.85)$$

Na slici 3.14 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka (dijagram (a)) i dijagrami promjene impulsa, ovisno o udaljenosti, (dijagram b)), za eksploziju u zraku i podvodnu eksploziju. Početni maksimalni tlak kod podvodne eksplozije je oko 1180 MPa, dok je za eksploziju u zraku iznosi oko 150 MPa, što je ogromna razlika. U daljnjem dijelu dijagrama s vremenom razlika se smanjuje. Početni impuls za podvodnu eksploziju je oko 450 kPa-s, dok je za eksploziju u zraku oko 20 kPa-s.



Slika 3.14 Usporedbe dijagrama tlaka i impulsa eksplozije u zraku i pod vodom [50]

Temeljem prethodno spomenutog može se zaključiti kako je djelovanje podvodne eksplozije na konstrukciju višestruko veće od djelovanja eksplozije u zraku, za istu količinu eksploziva i udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke. Treba napomenuti kako je ovdje zanemareno dodatno djelovanje plinskog mjehura koji se javlja kod podvodne eksplozije.

Ova činjenica može utjecati na odabir načina terorističkog djelovanja na građevinu, tj. cilj može biti nadvodni ili podvodni dio građevine. Naravno pri načinu djelovanja napadač će u obzir uzeti i druge elemente kao što su način transporta eksploziva do građevine, količinu eksploziva, vrstu eksploziva, način postavljanja i aktiviranja, potencijalne rizike, mogućnosti i sposobnosti snaga za provedbu zadaće i dr.

### 3.8 Podjela podvodnih eksplozija prema dubini

Eksplozije u vodi odnosno podvodne eksplozije prema dubini mogu se podijeliti na plitke i duboke eksplozije.

Podvodne eksplozije ovisno o dubini, ispod vodene površine, mogu se podijeliti na plitke ili duboke, prema empirijskim izrazima, kojeg je predložio Le Méhautéi dr. [51]:

$$\frac{D}{w^{\frac{1}{3}}} < 0,397 \quad \text{plitka podvodna eksplozija i} \quad (3.86)$$

$$\frac{D}{w^{\frac{1}{3}}} < 6,347 \quad \text{duboka podvodna eksplozija} \quad (3.87)$$



gdje je:

$D$  – dubina središta eksplozije u odnosu na slobodnu površinu vode u metrima, pozitivna vrijednost prema dolje i

$W$  - masa eksploziva TNT-a u kilogramima [51].

Plitke podvodne eksplozije imaju veliki krater na površini vode u usporedbi s dubinom. Duboke podvodne eksplozije imaju malen krater u usporedbi s dubinom eksplozije [55]. Na slici 3.15 prikazana je plitka eksplozija. Plitka podvodna eksplozija nuklearnog testa na atolu Bikini, 1946. godine, dubina eksplozije je 61 metar, eksploziv bojeva glava 20 kt. Iznad površine vode eksplozija je oblikovala vodenu kupolu.



Slika 3.15 Plitka podvodna eksplozija na dubini od 61 m [50]

Primjer duboke podvodne eksplozije je WAHOO iz 1958. godine kao dio nuklearnog testa, vidjeti sliku 3.16. Dubina nuklearne eksplozije je bila 150 m ispod površine vode. Raspršena kupola vode je na visini od 270 m. Dijelovi plinskog mjehura se probijaju kroz kupolu, pri čemu su mlazovi vode izbijali u svim smjerovima, do visine od 520 m.

Poznato je kako se tlačenjem fluida mijenja njegovo stanje, tako tlačenjem zrak prelazi iz plinovitog u tekuće stanje, tekućine pod visokim tlakom prelaze u kruto stanje, a kruta tijela pod visokim tlakom prelaze u tekućine [50].

Na slici 3.16 prikazana je duboka podvodna eksplozija.



Slika 3.16 Duboka podvodna eksplozija, u trenutku nastanka raspršene kupole [50]

### 3.9 Vrste podvodne eksplozije s obzirom na ograničenja

Podvodne eksplozije prema ograničenjima mogu se podijeliti na podvodne eksplozije u neograničenoj sredini, podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode, podvodne eksplozije ograničene dnom i podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i dnom.

#### 3.9.1 Podvodne eksplozije u neograničenoj sredini

Iniciranjem eksplozivnog punjenja eksploziv detonira, tijekom detonacije stvaraju se produkti eksplozije, visoki tlak i temperatura, što generira udarni val, a kasnije i plinski mjehur.

Udarni val se širi u neograničenoj sredini u svim smjerovima dok se energija vala ne utroši na savladavanje otpora, a udarni val nije naišao na prepreku.

Podvodna eksplozija u neograničenoj sredini nema utjecaja refleksije udarnog vala od slobodne površine vode i dna pa se udarni val slobodno širi u prostor vode. Empirijski izrazi, koji su prethodno spomenuti, za određivanje parametara podvodne eksplozije mogu se koristiti za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini i sredini ograničenoj slobodnom površinom vode, koje uzimaju u obzir i refleksiju udarnog vala.

### 3.9.2 Podvodna eksplozija ograničena slobodnom površinom vode

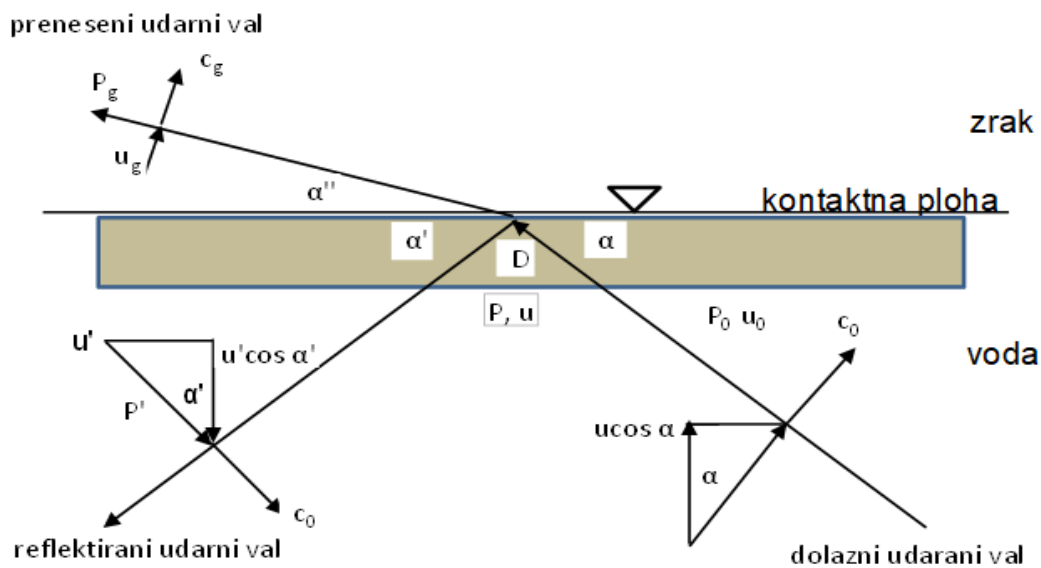
Kao što je navedeno, podvodna eksplozija se može odvijati u neograničenoj i ograničenoj sredini. Jedno od ograničenja podvodne eksplozije može biti slobodna površina vode.

Nakon detonacije, udarni val se radijalno širi u svim smjerovima pa i prema slobodnoj površini vode. Kad udarni val dosegne ograničenje, prepreku tj. slobodnu vodenu površinu, udarni val se reflektira i reflektirani udarni val utječe na promjene parametara u eksplozivnom polju. Udarni val se reflektira od slobodne vodene površine prema Snellovu zakonu:

$$\frac{c_0}{\sin \alpha} = \frac{c_0}{\sin \alpha'} = \frac{c_0}{\sin \alpha''}, \quad (3.88)$$

gdje je  $c$  brzina zvuka u zadanom mediju  $\alpha$ ,  $\alpha'$  i  $\alpha''$  su tri kuta prikazana na slici 3.17.

Na slici 3.17 prikazano je širenje udarnog i reflektiranog vala te Snellov zakon za reflektirani vlačni val od površine vode [20].



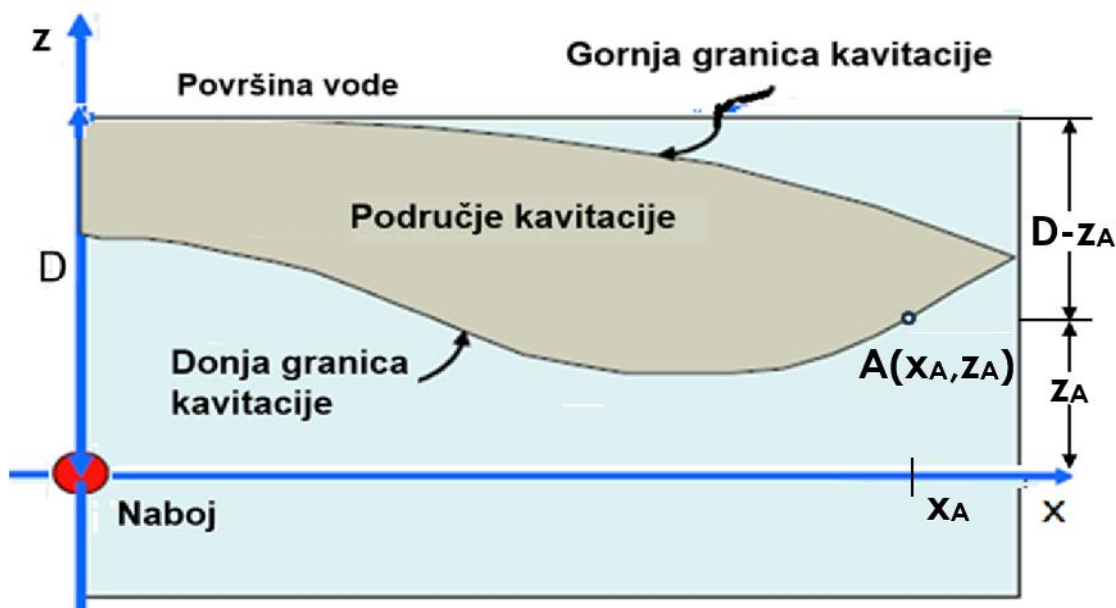
Slika 3.17 Snellov zakon refleksije udarnog tlačnog vala od slobodne površinu vode (Shin 2004.) [20]

Na slobodnoj površini vode, na kontaktu vode i zraka, tlak je jednak atmosferskom tlaku. Izravni tlačni udarni val se reflektira od slobodne površine vode i generira povratni vlačni val. Komponente dolaznog izavnog tlačnog i povratnog reflektiranog vlačnog vala na površini vode se poništavaju, što osigurava uvažavanje zadanih početnih rubnih uvjeta na površini vode [20].

Vlačni val u površinskom sloju vode uzrokuje pojavu apsolutnog negativnog tlaka, tlaka nižeg od tlaka vodenih para, što uzrokuje pojavu kavitacije. Postoje dvije vrste kavitacije: kavitacija područja i lokalna kavitacija, koja se pojavljuje lokalno kod propelera, pumpi i sl. [41] i [17].

Refleksija udarnog tlačnog vala od slobodne površine vode kao vlačnog vala i pojava područja kavitacije, koje akumulira, a potom i oslobađa energiju emitirajući vodni udar, koji uzrokuje značajne razlike u određenim područjima eksplozivnog polja u odnosu na podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini. Tako razlikujemo tri područja eksplozivnog polja: prvo područje kavitacije u kojem je tlak niži od tlaka vodenih para, drugo područje u kojemu imamo djelovanje izravnog tlačnog udarnog vala, a potom i djelovanje vlačnog reflektiranog vala i treće područje, u kojem nema djelovanja reflektiranog udarnog vala ili je ono zanemarivo, naročito na većim udaljenostima od slobodne površine vode [20].

Pretpostavlja se kako voda može izdržati određenu napetost, tako da udarni val uzrokuje cijepanje i razbijanje površinskog sloja vode. Područje između površinskog sloja (ljuske) i temeljne (relativno) mirne vode naziva se područje kavitacije (engl. *bulk cavitation*), a cijeli proces je nazvan kavitacija područja, što je prikazano na slici 3.18 [20] i [17].



Slika 3.18 Prikaz tipičnog područja kavitacije ispod slobodne površine vode [17]

Gornja i donja granica područja kavitacije može se odrediti pomoću određenih empirijskih izraza. Gornja granica je skup točaka, u kojima je zadovoljena jednakost  $F(x,z)=0$ . Točke gornje granice određuju se iz spomenute funkcije u sljedećem matematičkom zapisu [20], [41] i [8]:

$$F(x, z) = K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_1} e^{-\left(\frac{r_2-R}{c\theta}\right)} + P_{atm} + \gamma(D - z) - K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_2} \right]^{A_1} = 0 \quad (3.89)$$

Donja granica područja kavitacije je skup točaka koje zadovoljavaju jednakost  $G(x,z)=0$ , a točke se određuju prema funkciji prikazanoj u sljedećem matematičkom zapisu:

$$G(x, z) = \frac{P_i}{c\theta} \left\{ 1 + \left[ \frac{r_2 2D \left[ \frac{D-z}{r_2} \right]}{R} \right] \left[ \frac{A_2 r_2}{R} - A_2 - 1 \right] \right\} - \frac{A_1 P_i}{r_2} \left[ r_2 - 2D \left( \frac{D-z}{R} \right) \right] + \gamma \left( \frac{D-z}{r_2} \right) + \frac{A_1}{r_2} (P_i + P_{atm} + \gamma(D - z)) = 0 \quad (3.90)$$

$$P_i = K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_1} e^{-\left(\frac{r_2-R}{c\theta}\right)} \quad (3.91)$$

gdje su:

$x$  i  $z$  - koordinate promatrane točke,

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke,

$r_2$  - udaljenost od središta imaginarne eksplozije do promatrane točke,

$c$  - brzina zvuka u vodi,

$D$  - dubina eksplozivnog punjenja,

$\theta$  - koeficijent smanjenja tlaka,

$\gamma$  - specifična težina vode,

$P_{atm}$  - atmosferski tlak,

$W$  - masa eksplozivnog punjenja i

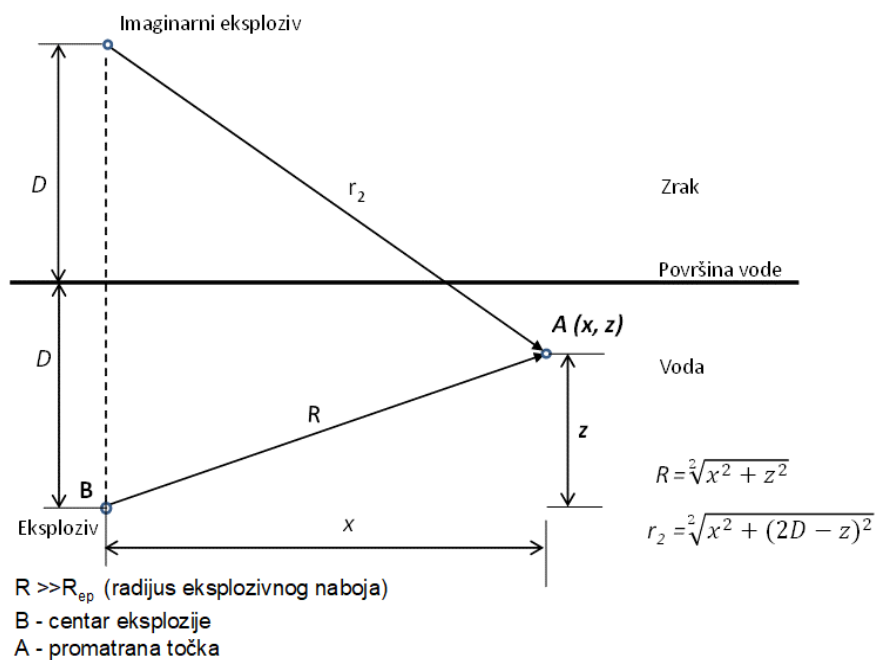
$K_1$  i  $A_1$  - koeficijenti udarnog vala [41].

Na slici 3.19 prikazano je područje kavitacije na površini mora, uslijed djelovanja podvodne eksplozije, gdje je slobodna površina vode ograničenje podvodnoj eksploziji [20].



Slika 3.19 Područje kavitacije podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode [20]

Grafički prikaz refleksije udarnog vala podvodne eksplozije od slobodne površine vode, uz pretpostavku kako nema prolaza energije kroz prepreku koja je inače zanemariva, prikazan je na slici 3.20.



Slika 3.20 Grafički prikaz refleksije udarnog vala podvodne eksplozije od slobodne površine vode [8 ] i [27]

Ukupni tlak u točki A jednak je zbroju tlaka udarnog vala koji dolazi izravno iz centra eksplozije, u točki B, na udaljenosti  $R$ , i reflektiranog vlačnog udarnog vala od slobodne površine (razrijeđenog vala podtlaka) iz imaginarnog eksploziva na udaljenosti  $r_2$ . U ovom slučaju utjecaj slobodne površine zamjenjuje se s imitiranim podtlakom iz točke imaginarnog eksploziva odnosno izvorom podtlaka [51].

U literaturi su dani empirijski matematički izrazi za proračun graničnih ploha područja kavitacije, koje su prethodno navedene i tlaka u eksplozivnom polju, [20] i [41].

Maksimalni tlak za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode se može izračunati pomoću empirijskog izraza za neograničenu sredinu tako da se izračuna maksimalni tlak izravnog udarnog vala, a zatim se izračuna i doda maksimalni negativni tlak od reflektiranog vala. Ova dva udarna vala djeluju u različitim vremenima. Vremenska razlika u djelovanju ( $\tau$ ) izravnog tlačnog i neizravnog reflektiranog vlačnog udarnog vala ovisi o položaju promatrane točke, položaju eksplozivnog naboja, odnosno o razlici udaljenosti  $R$  i  $r_2$ .

Ukupni tlak  $p(t,r)$  u nekoj točki A ograničenog eksplozivnog polja podvodne eksplozije može se izračunati, koristeći sljedeće relacije [27] i [41]:

$$p_{max}(x, z, t) = K_2 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_2} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\theta_1}\right)} \text{ (MPa) ; } t_1 = \frac{R}{c} ; t \geq t_1 \quad (3.92)$$

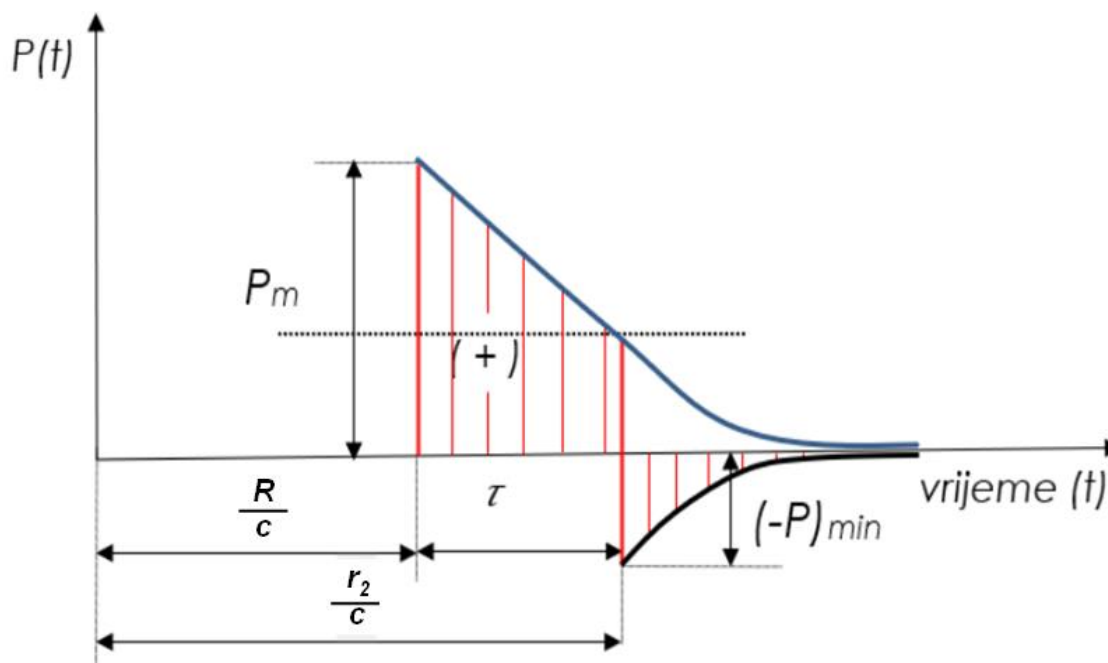
$$p_{min}(x, z, t) = -K_2 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_2} \right]^{A_2} e^{-\left(\frac{t-t_2}{\theta_2}\right)} \text{ (MPa) ; } t_2 = \frac{r_2}{c} ; t \geq t_2 \quad (3.93)$$

$$\theta_1 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_2} \text{ (ms)} \quad (3.94)$$

$$\theta_2 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_2} \right]^{A_2} \text{ (ms)} \quad (3.95)$$

$K_2$  i  $A_2$  – koeficijenti udarnog vala [41].

Na slici 3.21 prikazan je dijagram vremenske promjene tlaka u promatranoj točki.



Slika 3.21 Promjena tlaka podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode [27]

Na slici 3.21 je prikazana promjena tlaka u vremenu, u određenoj točki eksplozivnog polja. Nakon dolaska udarnog vala u promatranoj točki, na udaljenosti  $R$  od središta eksplozije, tlak se naglo povećava na maksimalnu vrijednost  $P_m$ , a zatim s vremenom opada. Nakon toga reflektirani negativni val dolazi do promatrane točke i ukupni tlak se naglo smanjuje i postaje negativan  $-P_{min}$ . Razlika vremena dolaska direktnog i reflektiranog vala ovisi o razlici udaljenosti  $R$  i  $r_2$  do promatrane točke, vidjeti sliku 3.20.

### 3.9.3 Podvodna eksplozija ograničena dnom

Postoje dva različita tipa podvodne eksplozije kod kojih se pojavljuje ograničenje dnom. Prvi tip je kad je eksploziv položen na dno i drugi tip kad je eksploziv postavljen na određenoj udaljenosti od dna, a ograničenje dna utječe na parametre eksplozivnog polja.

Podvodna eksplozija kod koje je eksplozivni naboj položen na dno, ovisno o vrsti dna (kamen, mulj, pijesak) energija eksplozije se pojačava u određenom pravcu zbog odbijanja udarnog vala od dna. Plinski mjehur se oblikuje ovisno o tlakovima okoline i preprekama te se širi u smjeru najmanjeg otpora.



Udarni val kod podvodne eksplozije kad je eksplozivni naboj postavljen na dno se pojačava tj. pojačava se efekt eksplozije. Dodavanjem koeficijenta  $k_0$  koji karakterizira utjecaj dna u izrazu za maksimalni tlak dobije se izraz za maksimalnu vrijednost tlaka na fronti udarnog vala ovisno o udaljenosti od središta eksplozije, za eksploziju kad je eksploziv u kontaktu s dnom (na dnu ležeća mina) [27]:

$$P_m(R) = 53,3 \left( \frac{\sqrt[3]{k_0 W}}{R} \right)^n \quad (\text{MPa}). \quad (3.96)$$

Koeficijent  $k_0$  ovisi o vrsti tla na dnu:

- za mulj i žitku glinu  $k_0 = 1,2$ ,
- za pijesak  $k_0 = 1,3$  i
- za kamenito dno  $k_0 = 1,4$ .

Utjecaj dna se pojavljuje i za podvodne eksplozije kada je centar eksplozije na određenoj udaljenosti od dna. Utjecaj dna na promjene tlaka u eksplozivnom polju ovisi o udaljenosti centra eksplozije od dna i položaja promatrane točke te geometrijskom obliku dna, koje može biti promjenjivo, ravno, koso, udubljeno, izbočeno i sl. kao i od geomehaničkih i drugih karakteristika materijala, kao npr. (čvrsta stjenovita tla, glinovita tla, pjeskovita tla, muljevita tla i sl.).

Reflektirani udarni val podvodne eksplozije ovisi o vrsti dna, udarni val prolazi kroz više refleksija i transmisija, stvarajući interakcije s valnim sustavom [53].

Geometrija dna je značajna zbog upadnog kuta vala i kuta odbijanja kao i fizikalna svojstva tla za određivanje indeksa loma i valnih duljina.

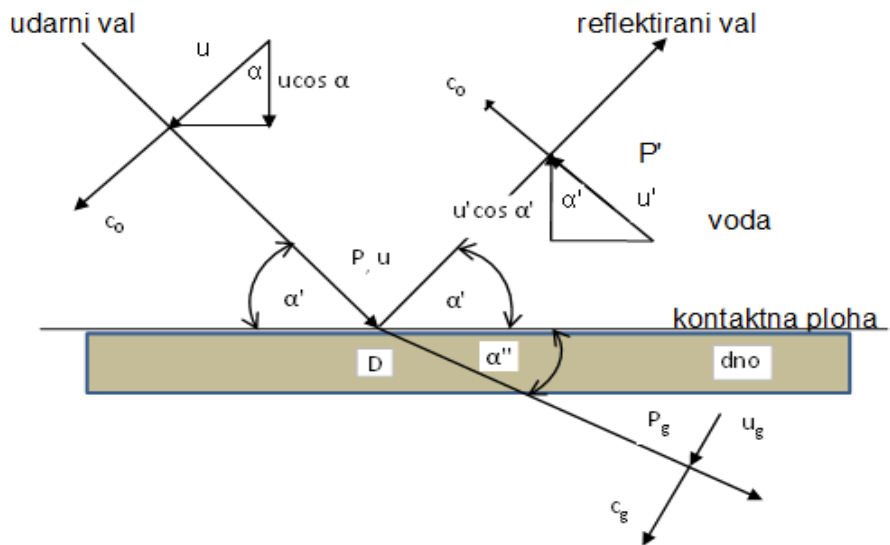
Udarni val koji se širi iz središta eksplozije kad dosegne dno reflektira se kao tlačni udarni val od krutog ravnog dna u prostor vode, prema Snellovu zakonu [20]:

$$\frac{c_0}{\sin \alpha} = \frac{c_0}{\sin \alpha'} = \frac{c_0}{\sin \alpha''} \quad (3.97)$$

gdje je  $c$  brzina zvuka u zadanom mediju  $\alpha$ ,  $\alpha'$  i  $\alpha''$  su tri kuta prikazana na slici 3.22.

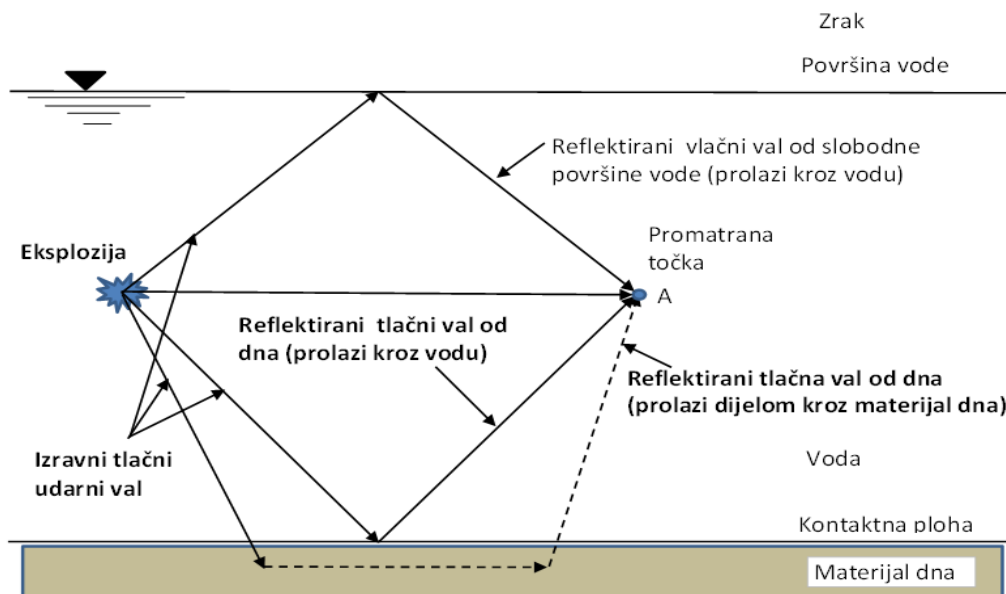
Udarni val podvodne eksplozije djeluje na dno, koje zbija, ovisno o vrsti materijala, stvarajući reflektirani val koji se širi u prostor vode. Dno vode je prepreka različite krutosti i neizbježno će apsorbirati dio energije eksplozije, ovisno o vrsti tla [45].

Na slici 3.22 prikazano je širenje udarnog i reflektiranog vala te Snellov zakon za reflektirani tlačni val od dna [20].



Slika 3.22 Snellov zakon refleksije udarnog tlačnog vala od dna [20]

Pri analizi djelovanja hidrodinamičkog polja na prepreku treba uzeti u obzir djelovanje udarnog vala podvodne eksplozije, uz pojavu refleksije, loma i difrakcije udarnog vala, Wang [53]. Također postoji mogućnost dodatnog tlaka od valova koji se šire kroz tlo i nakon toga se lome prema promatranoj točki, kao što je prikazano na slici 3.23.

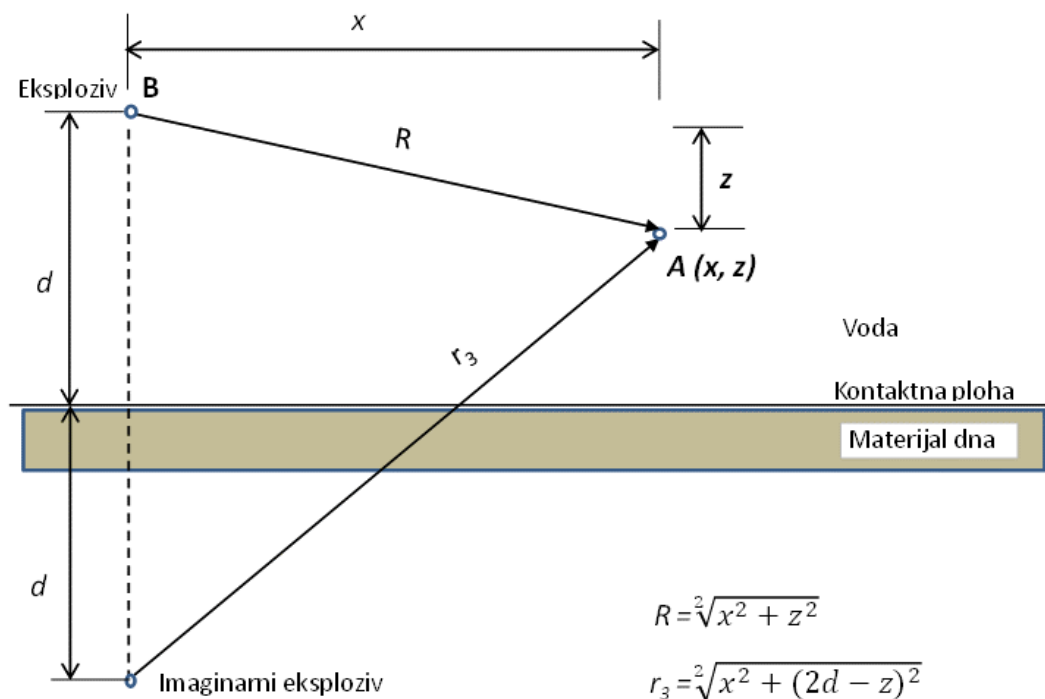


Slika 3.23 Refleksija udarnog vala podvodne eksplozije od slobodne površine vode i dna [15], [20] i [41]

U daljnjoj analizi zbog pojednostavljenja, uzet će se ravno dno i spriječen prolaz energije kroz prepreku (dno) te da je kut upada udarnog vala jednak kutu reflektiranog vala od dna prema analogiji ograničenja slobodnom površinom vode.

### 3.9.4 Empirijske jednadžbe za proračun podvodne eksplozije ograničene dnom

Koristeći spomenutu analogiju refleksije udarnog vala od slobodne površine vode, pripremljen je grafički prikaz i empirijski izrazi za izračun pojedinih parametara podvodne eksplozije [41] i [20], što je prikazano na slici 3.24.



$R \gg R_{ep}$  (radijus eksplozivnog naboja)

B - centar eksplozije

A - promatrana točka

Slika 3.24 Refleksije udarnog vala od dna [20], [41] i [15]

Utjecaj dna se računa prema predloženim empirijskim izrazima za određivanje tlaka loma tlačnog vala na određenoj udaljenosti.

Maksimalni tlak u nekoj točki dobije se superpozicijom tlaka izravnog udarnog vala i reflektiranog vala od dna, u vremenu. U promatranu točku najprije dolazi izravni tlačni

val, nakon što val prijeđe duljinu puta od središta eksplozije do promatrane točke, a potom u promatranoj točki se pojavljuje reflektirani udarni tlačni val od dna, nakon što prijeđe put od središta eksplozije do dna, a nakon toga od dna do promatrane točke.

Ukupni tlak  $p(x, z, t)$  u točki A ograničene podvodne eksplozije dnom može se izračunati, koristeći sljedeće izraze [20] i [15]:

$$p_{max1}(x, z, t) = K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_1} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\theta_1}\right)} \text{ (MPa)} ; \quad t_1 = \frac{R}{c} ; \quad t \geq t_1 \quad (3.98)$$

$$p_{max3}(x, z, t) = K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_3} \right]^{A_1} e^{-\left(\frac{t-t_3}{\theta_3}\right)} \text{ (MPa)} ; \quad t_3 = \frac{r_3}{c} ; \quad t \geq t_3 \quad (3.99)$$

$$\theta_1 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_2} \text{ (ms)}, \quad (3.100)$$

$$\theta_3 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_3} \right]^{A_2} \text{ (ms)}, \quad (3.101)$$

gdje su:

$x$  i  $z$ - koordinate promatrane točke,

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke,

$r_3$  - udaljenost od središta imaginarne eksplozije do promatrane točke,

$c$  – brzina zvuka u vodi,

$D$  – dubina eksplozivnog punjenja,

$\theta$  - koeficijent smanjenja tlaka,

$W$  – masa eksplozivnog punjenja i

$K_1, K_2, A_1$  i  $A_2$  – koeficijenti udarnog vala [20], [53] i [50].

Ukupni tlak u točki A jednak je zbroju tlaka udarnog vala koji dolazi izravno iz centra eksplozije, u točki B, na udaljenosti  $R$ , i tlaka reflektiranog tlačnog udarnog vala od dna iz imaginarnog eksploziva na udaljenosti  $r_3$ . U ovom slučaju utjecaj dna zamjenjuje se s imitiranim tlakom iz točke imaginarnog eksploziva odnosno izvorom tlaka [20].

Maksimalna vrijednost tlaka dobivena na ovaj način je u svakom slučaju veća od maksimalne vrijednosti tlaka koja bi se dobila uzimajući u obzir vrstu tla jer bi se dio tlaka apsorbirao i kut odbijanja bi bio različit od kuta upada zbog neravnina na dnu.

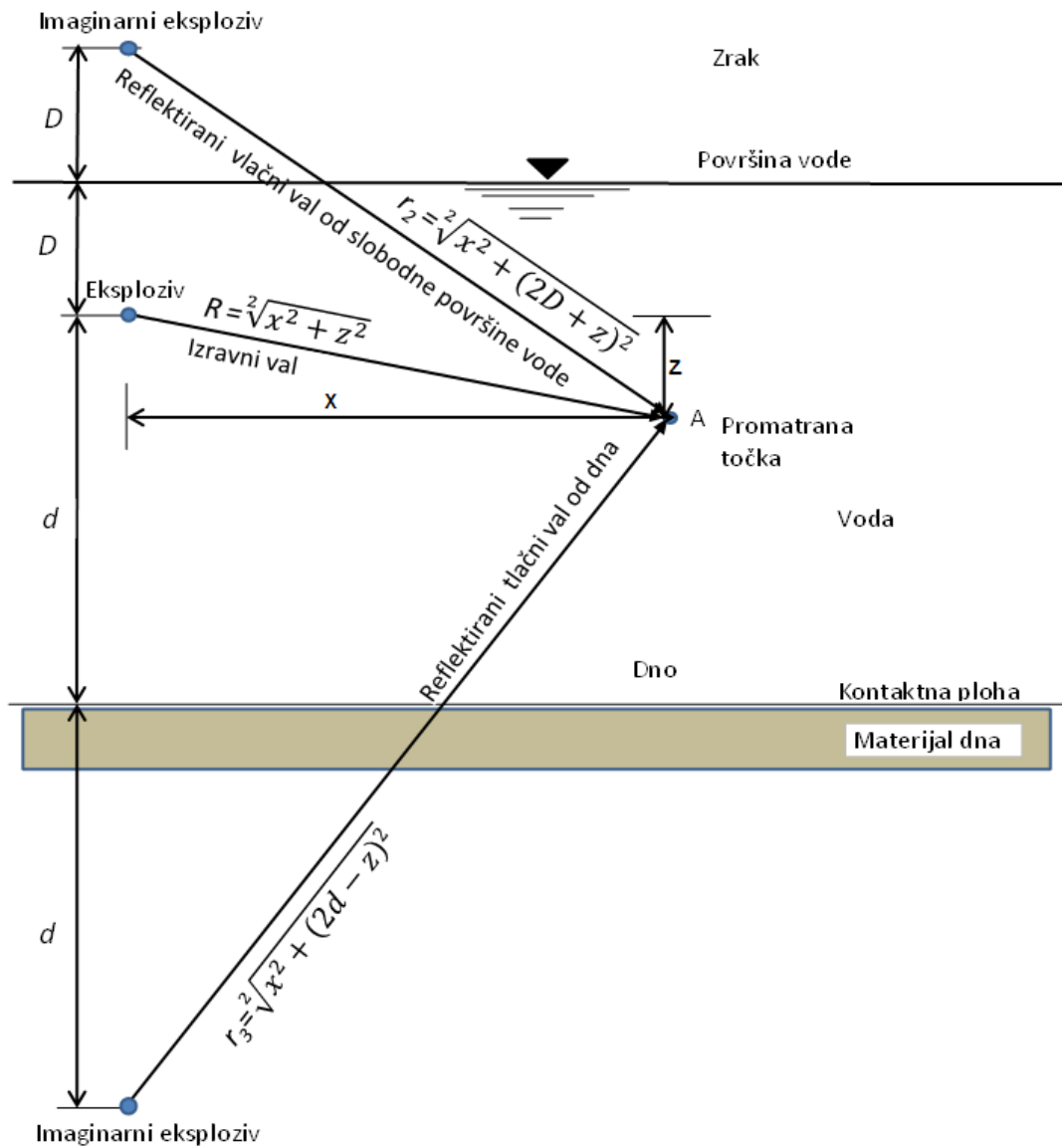
### 3.9.5 Podvodna eksplozija ograničena slobodnom površinom vode i dnom

Nakon detonacije, udarni val se širi kroz vodu i nakon dolaska na dno ili slobodnu površinu vode udarni val se reflektira te putuje kroz vodu i dolazi do promatrane točke. Reflektirani udarni valovi od slobodne površine vode su vlačni, a od dna su tlačni. Na slici 3.23 u prethodnom poglavlju prikazano je djelovanje podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i dnom.

Na slici 3.25 prikazan je eksplozivni naboj, širenje i refleksija udarnog vala udarnih valova od dna i od slobodne površine vode i promatrana točka A [17] i [53]. U promatranu točku A najprije dolazi izravni udarni val, a zatim reflektirani valovi od slobodne površine vode i dna.

U prethodnim poglavljima dani su empirijski izrazi za određivanje pojedinih parametara podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i ograničenoj sredini, posebno za ograničenje slobodnom površinom vode, a posebno za podvodne eksplozije ograničene dnom. Nadalje će se istraživati eksplozija u ograničenoj sredini, gdje ograničenje predstavlja istovremeno slobodna površina vode i dno.

Na slici 3.25 prikazani su geometrijski elementi podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i dnom.



Slika 3.25 Refleksije udarnog vala od slobodne površine vode i dna [17] i [53]

Na slici 3.25 prikazani su geometrijski elementi o kojima ovisi oblik dijagrama vremenske promjene tlaka, a to su: vertikalna udaljenost od slobodne površine vode do središta eksplozivnog naboja ( $D$ ), vertikalna udaljenost između središta eksplozivnog naboja i dna ( $d$ ) i horizontalne i vertikalne udaljenosti od središta eksplozivnog naboja do promatrane točke ( $x$ ,  $z$ ). Na temelju zadanih geometrijskih elemenata ( $D$ ,  $d$ ,  $x$  i  $z$ ) mogu se izračunati  $R$  (udaljenost od središta eksplozije do građevine) i  $r_2$  (udaljenost od središta eksplozije do slobodne površine vode i od slobodne površine vode do promatrane točke) i  $r_3$  (udaljenost od središta eksplozije do dna i od dna do promatrane točke), prema navedenim matematičkim izrazima.

Ukupni tlak u promatranoj točki A eksplozivnog polja, u ravnini, u određenom vremenu,  $p(x, z, t)$  ograničene podvodne eksplozije može se izračunati, koristeći sljedeće empirijske izraze [3] i [20] i [45]:

$$p_{max}(x, z, t) = K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_2} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\theta_1}\right)} \text{ (MPa)} ; t_1 = \frac{R}{c} ; t \geq t_1 \quad (3.102)$$

$$p_{max2}(x, z, t) = -K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_2} \right]^{A_2} e^{-\left(\frac{t-t_2}{\theta_2}\right)} \text{ (MPa)} ; t_2 = \frac{r_2}{c} ; t \geq t_2 \quad (3.103)$$

$$p_{max3}(x, z, t) = K_1 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_3} \right]^{A_2} e^{-\left(\frac{t-t_3}{\theta_3}\right)} \text{ (MPa)} ; t_3 = \frac{r_3}{c} ; t \geq t_3 \quad (3.104)$$

$$\theta_1 = K_1 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_2} \text{ (ms)} \quad (3.105)$$

$$\theta_2 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_2} \right]^{A_2} \text{ (ms)}, \quad (3.106)$$

$$\theta_3 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_3} \right]^{A_2} \text{ (ms)}, \quad (3.107)$$

gdje su:

$x, i z$  - koordinate promatrane točke,

$t$  - vrijeme,

$t_1$  - vrijeme dolaska izravnog fronta udarnog vala u točku A,

$t_2$  - vrijeme dolaska fronte udarnog vala od središta eksploziva do slobodne površine vode i reflektiranog vala od slobodne površine vode u točku A,

$t_3$  - vrijeme dolaska fronte udarnog vala od središta eksplozije do dna i reflektiranog vala od dna u točku A,

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke,

$r_2$  - udaljenosti od središta imaginarne eksplozije iznad slobodne površine vode do promatrane točke,

$r_3$  - udaljenosti od središta imaginarne eksplozije ispod dna do promatrane točke,

$c$  - brzina zvuka u vodi,

$D$  - dubina eksplozivnog punjenja, udaljenost od površine do središta eksplozivnog punjenja,

$d$  - udaljenost od središta eksplozivnog punjenja do dna,

$\theta_i$  - koeficijenti smanjenja tlaka,

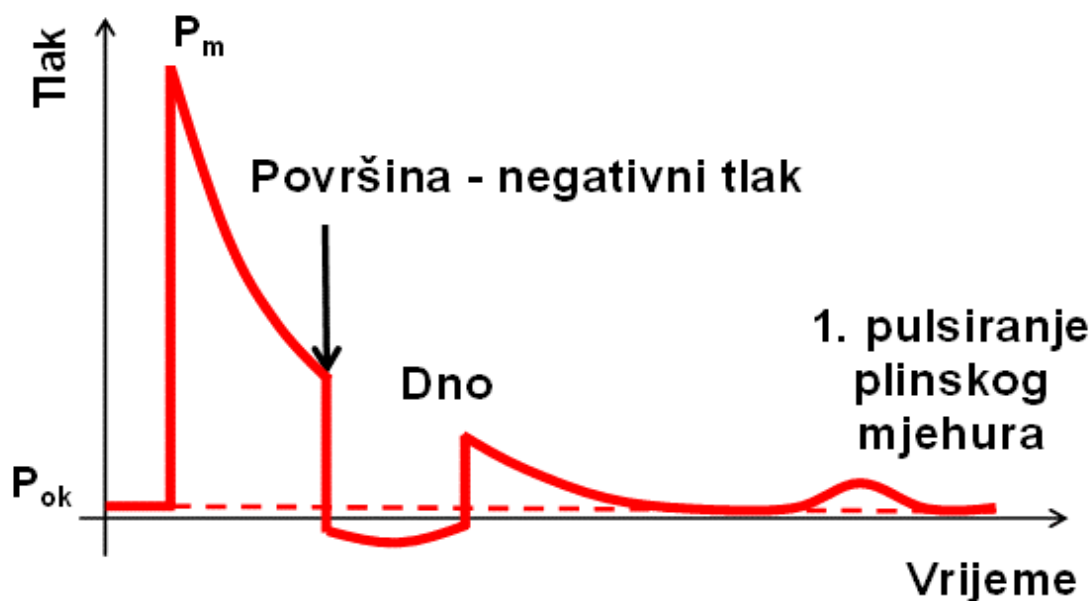
$W$  - masa eksplozivnog punjenja i

$K_1, K_2, A_1$  i  $A_2$  – koeficijenti udarnog vala, koji su dani u literaturi [20] i [41].

Ukupni tlak u točki A jednak je zbroju tlakova od: tlaka udarnog vala koji dolazi izravno iz centra eksplozije, u točki B, na udaljenosti  $R$ , tlaka reflektiranog udarnog vala od slobodne površine vode iz imaginarnog eksplozivnog punjenja, na udaljenosti  $r_2$  i tlaka reflektiranog udarnog vala od dna iz imaginarnog eksplozivnog punjenja, na udaljenosti  $r_3$ . U ovom slučaju utjecaji slobodne površine vode i dna zamjenjuju se s tlakom imitiranim iz imaginarnih eksplozivnih punjenja, odnosno izvorom tlaka na određenoj udaljenosti od slobodne površine vode i dna [17].

Dijagram vremenske promjene tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj sredini ima nagli porast tlaka u trenutku dolaska fronta udarnog vala u promatranu točku i nakon toga tlak opada u vremenu, dok dijagram u ograničenoj sredini nakon toga ima dodatne promjene tlaka, zbog dolaska reflektiranih udarnih valova od slobodne površine vode i od dna.

Na slici 3.26 prikazan je dijagram vremenske promjene tlaka podvodne eksplozije, koja je ograničena slobodnom površinom vode i dnom.



Slika 3.26 Promjena tlaka podvodne eksplozije u ograničenoj sredini [17]

Nakon dolaska izavnog udarnog vala u promatranu točku, tlak se naglo povećava na maksimalnu vrijednost  $P_m$ , a zatim opada. Nakon toga u promatranu točku dolazi reflektirani negativni val od slobodne površine vode (engl. *surface cut - off*) i ukupni tlak se naglo smanjuje i postaje negativan. Zatim u promatranu točku dolazi reflektirani udarni val od dna i tlak naglo raste (engl. *bottom*). Nakon određenog vremena, dolazi do povećanja tlaka uslijed prvog pulsiranja plinskog mjehura (engl. *1<sup>st</sup> Bubble*).



U ovom radu utjecaj slobodne površine vode i dna je određen prema navedenim empirijskim izrazima za određivanje tlaka izravnog vala i reflektiranog vala nakon loma tlačnog vala od slobodne površine vode i dna na određenoj udaljenosti.

Kao što je već spomenuto, ukupni tlak za podvodnu eksploziju ograničenu dnom je dobiven uz sljedeće pretpostavke: dno je horizontalno i ravno, zanemaruju se geometrijske neravnine i nagibi dna te geomehaničke karakteristike dna, uzima se u obzir samo refleksija vala, uz uvjet da nema prolaza vala na kontaktnoj plohi iz vode u tlo, kut upada vala je jednak kutu reflektiranog vala, radi pojednostavljenja proračuna. Na ovaj način se dobiva maksimalna vrijednost tlaka od reflektiranog udarnog vala od dna u promatranoj točki.

Proračun tlaka korištenjem navedenih empirijskih izraza proveden je u programskom paketu Microsoft Office Excel i pripremljeni su dijagrami tlaka, posebno, za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini, podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode, za podvodnu eksploziju ograničenu dnom i za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom. Rezultati su obrađeni i prikazani na dijagramima u poglavlju 6. gdje su uspoređeni s rezultatima dobivenim numeričkim postupkom na odgovarajućim numeričkim modelima.

### 3.10 Plinski mjehur

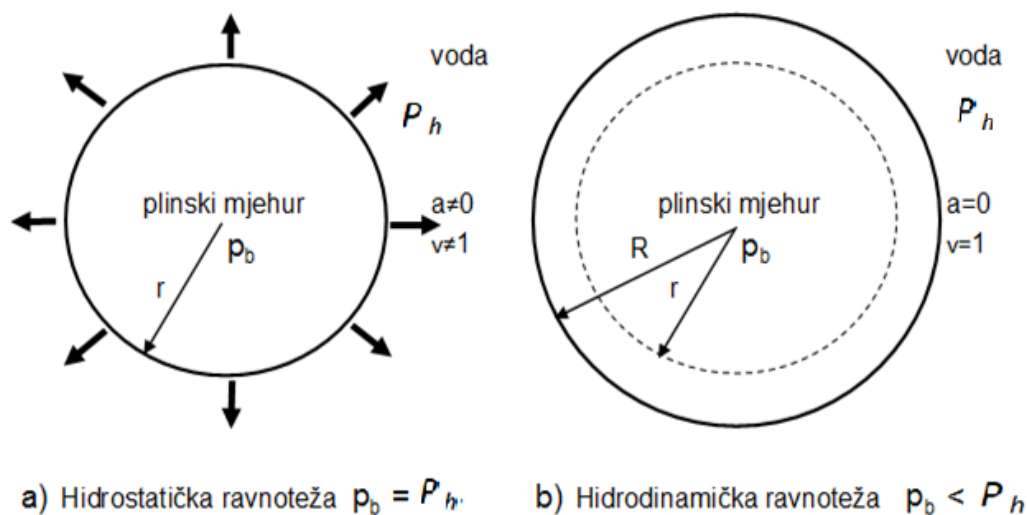
Nakon iniciranja eksploziv detonira, a nakon detonacije nastaju produkti eksplozije visoki tlak i temperatura, što generira udarni val, a kasnije i plinski mjehur. Visoki tlak u prostoru produkata eksplozije djeluje na okolni sloj vode i uzrokuje kompresiju vode i stvaranje kompresijskog sfernog pojasa, koji generira tlačni val koji se naziva udarni val. Vrijeme propagacije udarnog vala odvija se u vremenu reda veličine milisekunde, dok se širenje i skupljanje (pulsiranje) plinskog mjehura odvija kasnije (naknadno) u vremenu reda veličine sekunde. Velika vremenska razlika između pojave udarnog vala i plinskog mjehura i različita priroda fizikalnih pojava zahtijeva dodatne izazove u matematičkom formuliranju i numeričkom modeliranju podvodne eksplozije kao i računalnim programima i tehnicima [32].

Nakon detonacije eksploziva, generira se udarni val, naknadno od produkata detonacije nastaje plinski mjehur koji tlači i gura okolnu vodu te se sferno širi dok tlak u njemu opada. Širenje se nastavlja i nakon trenutka izjednačenja tlakova (u plinskom mjehuru i okolini - vodi) do trenutka kad je tlak u plinskom mjehuru ( $p_b$ ) nešto niži od

tlaka u vodi ( $P_h$ ). Širenje plinskog mjehura se ne može zaustaviti kad su tlakovi izjednačeni, u trenutku hidrostatičke ravnoteže ( $p_b=P_h$ ), zbog inercije gibanja vodene mase. Širenje se nastavlja dok se ne uspostavi hidrodinamička ravnoteža (brzina  $v=0$  i ubrzanje  $a=0$ ), [32] i [7].

Zatim se plinski mjehur počinje skupljati jer je tlak u plinskom mjehuru niži od tlaka u vodi, a tlak se u plinskom mjehuru povećava. Skupljanje plinskog mjehura se nastavlja i nakon izjednačenja tlakova zbog inercije gibanja vodene mase pa tlak u plinskom mjehuru postaje nešto veći od tlaka u vodi. Tlak u plinskom mjehuru stvara tlačnu sfernu ovojnici u vodi i generira novi udarni tlačni val, a zatim se plinski mjehur ponovno širi pa skuplja, što se ponavlja više puta.

Širenje i skupljanje plinskog mjehura naziva se „pulsiranje“ plinskog mjehura pri čemu plinski mjehur generira nove udarne tlačne valove, koji propagiraju u okolinu. Pulsiranje plinskog mjehura u neograničenoj sredini prestaje kad se utroši sva energija. Kad se eksplozija nalazi na maloj dubini onda se događa proces refleksije udarnog vala od površine te nastanak, pulsiranje, migracija i izranjanje (erupcija) plinskog mjehura na površini vode kao rezidualne pojave djelovanja podvodne eksplozije, što je prikazano na slici 3.27, [3] i [7].



Slika 3.27 Grafički prikaz širenje plinskog mjehura

Na gibanje plinskog mjehura utječe sila uzgona, blizina površine vode i morskog dna ili druge granične površine. Te činjenice otežavaju proračun ponašanja plinskog mjehura, iako je, tijekom većeg dijela gibanja, promjena gustoće okolne vode zanemariva i gibanje se može opisati kao nestlačivo tečenje [3].

Također treba napomenuti kako tijekom pulsiranja i pomicanja prema površini vode, na posljednjem skupljanju plinskog mjehura, prije izranjanja na površini, plinski mjehur povlači sloj vode prema svom središtu. Nakon toga se plinski mjehur širi i podiže vodu iznad sebe i izlazi (eruptira) iznad površine vode, u obliku sličnom kugli ili se rasprši, što ovisi o dubini eksplozije te količini i vrsti eksploziva.

Pulsiranje, gibanje (migriranje) plinskog mjehura prema površini vode i izranjanje (erupcija) na površini vode može prouzročiti različite poremećaje na površini vode ovisno o dubini eksplozivnog punjenja te količini i vrsti eksploziva. Ako eksplozija nije na velikoj dubini, na površini vode može se pojaviti veliki oblak vode [7].

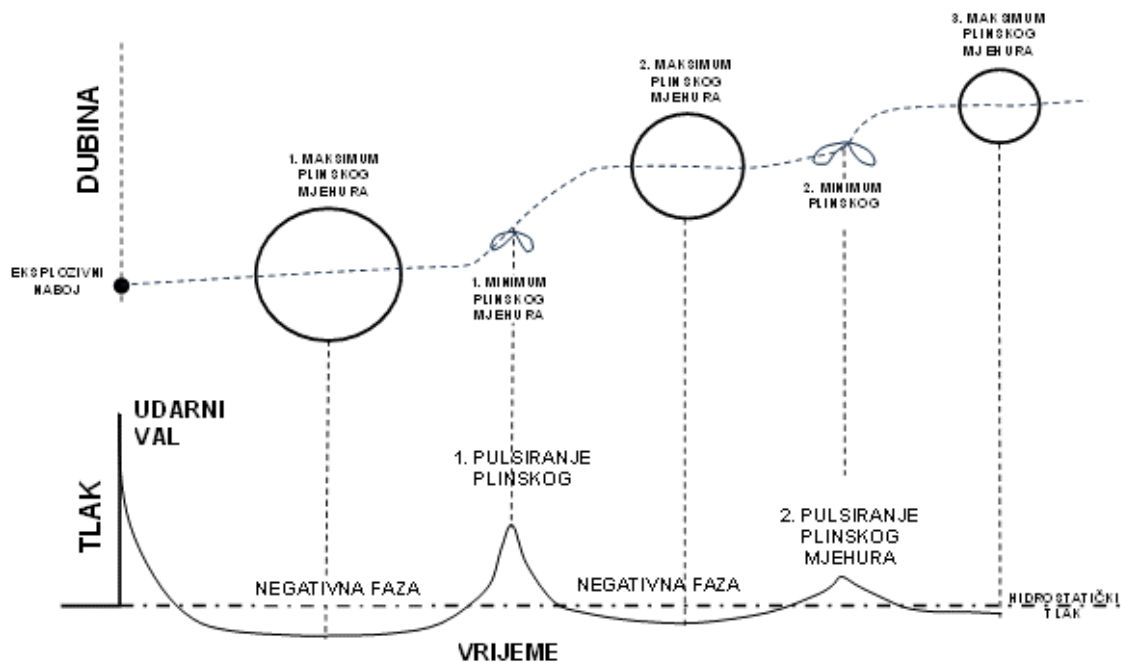
Svaka oscilacija plinskog mjehura generira novi udarni val, u trenutku kad je plinski mjehur najmanje veličine, koji se može modelirati kao novi akustički val. Međutim, pored serije udarnih valova također nastaju udari od inercije gibanja vodene mase, koja se giba zbog razlike tlakova pri pulsiranju i podizanju plinskog mjehura prema površini vode. Treba posebno istaći promjenu frekvencije udarnog djelovanja prvenstveno od inercije gibanja vodene mase koja se giba zbog oscilacije plinskog mjehura.

Temeljem prethodno spomenutog, nakon detonacije eksplozivnog punjenja oblika kugle pod vodom nastaju sljedeće pojave:

- Generiranje udarnog tlačnog vala koji se sferno širi kroz vodu,
- Generiranje plinskog mjehura od produkata eksplozije i njegovo sferno širenje u vodi,
- Vodena masa oko plinskog mjehura se giba velikom brzinom sa širenjem plinskog mjehura,
- Tlak u plinskom mjehuru opada dok inercija vode i dalje povećava plinski mjehur,
- Gibanje vodene mase se zaustavlja kao i širenje plinskog mjehura,
- Tlak u plinskom mjehuru niži od tlaka okoline, plinski mjehur se skuplja, vodena masa tlači plinski mjehur i giba se prema njegovu središtu,

- Tlačenje plinskog mjehura se zaustavlja i gibanje vodene mase se zaustavlja, tlak u plinskom mjehuru veći od tlaka okoline,
- Generira se novi udarni val,
- Proces se ponavlja sve do izlaska plinskog mjehura na površinu vode ili do utroška energije [32].

Ova djelovanja se odnose na podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini. U slučaju ograničenja podvodne eksplozije slobodnom površinom vode i/ili dnom te nekom pregradom pojavljuje se refleksija udarnog vala i plinskog mjehura i njihova interakcija, što utječe na dinamiku tlakova, oblik i gibanje plinskog mjehura i vodene mase, što dodatno usložnjava ovu i ovako vrlo složenu i zahtjevnu fizikalnu pojavu. Na slici 3.28 prikazana su tri pulsiranja plinskog mjehura.



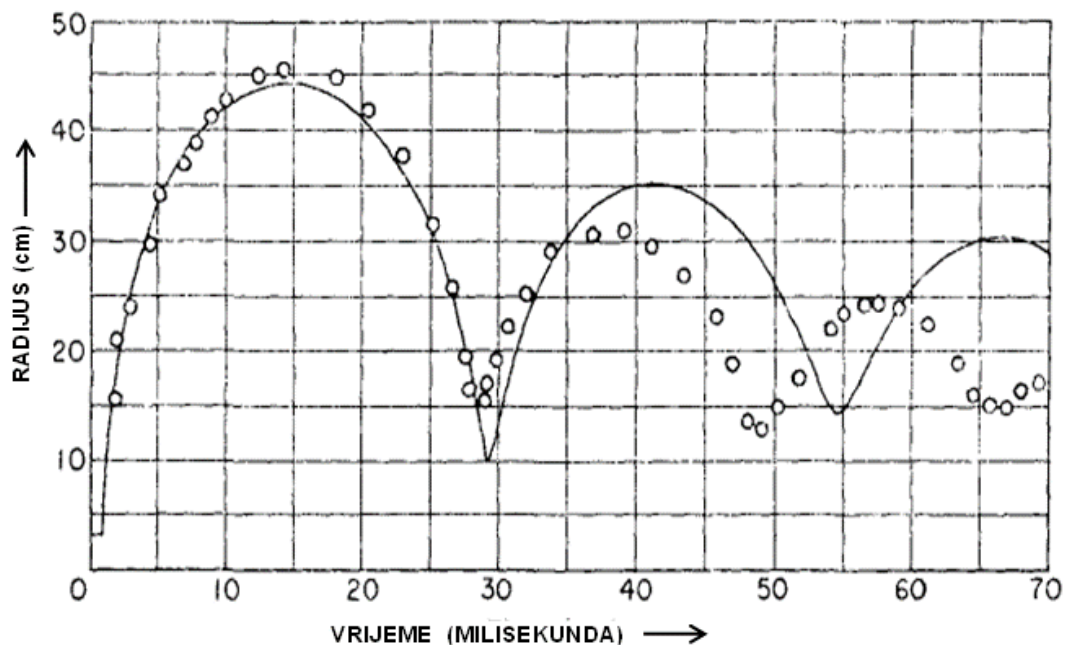
Slika 3.28 Pulsiranje plinskog mjehura, promjene radijusa i tlaka u vremenu [32]

Na slici 3.28, na ordinati je prikazana dubina, promjena radijusa i trajektorija gibanja središta plinskog mjehura, a ispod promjena tlaka dok je na apscisi prikazano vrijeme. Iz trajektorije gibanja se može vidjeti brzina gibanja plinskog mjehura prema površini vode. Vidi se kako je brzina gibanja plinskog mjehura prema površini najveća kad je veličina plinskog mjehura najmanja, a najmanja kad je veličina mjehura najveća. Treba znati da se plinski mjehur ne giba udesno kao što je prikazano na slici ali je tako prikazano radi preglednosti grafičkog prikaza [32].

Maksimalni tlak udarnog vala koji nastaje nakon prvog pulsiranja plinskog mjehura ima vrijednost od 10 % do 20 % maksimalne vrijednosti tlaka udarnog vala, ali je vrijeme trajanja tlaka duže pa njegov impuls može biti i veći od impulsa udarnog vala [37].

Početno djelovanje podvodne eksplozije na konstrukciju pod vodom nastaje uslijed djelovanja udarnog vala. Nakon toga djeluju naknadni udarni impulsi koji nastaju zbog pulsiranja plinskog mjehura, ovi impulsi su pobude manje frekvencije. Udarni valovi koji nastaju uslijed pulsiranja plinskog mjehura imaju manju vrijednost tlaka, ali duže vrijeme trajanja. Ova niskofrekventna pobuda poznata je kao udaranje [54].

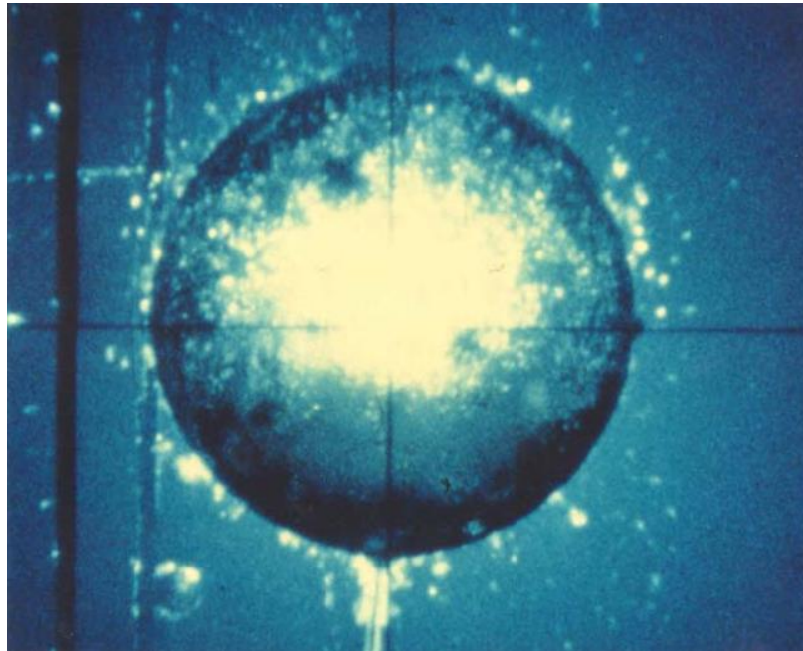
Radijus plinskog mjehura tijekom pulsiranja se stalno mijenja od početne veličine, koja odgovara veličini eksplozivnog punjenja do maksimalne veličine pa se ponovno smanjuje do nove minimalne veličine, što se ponavlja. Na slici 3.29 prikazana je promjena radijusa plinskog mjehura tijekom tri pulsiranja plinskog mjehura.



Slika 3.29 Promjene radijusa plinskog mjehura u vremenu, za 250 g eksploziva, na dubini od 90 m [9]

Na slici 3.29 prikazani su dijagrami promjene radijusa plinskog mjehura tijekom tri pulsiranja, rezultati su dobiveni eksperimentom (kružići) i numeričkim postupkom (puna crta). Na dijagramu se vidi kako se vrijednost radijusa plinskog mjehura postepeno povećava i smanjuje, što se ponavlja, pri čemu se troši energija. Također se vidi prilično dobro slaganje rezultata dobivenih eksperimentalnim i numeričkim postupkom [9].

Na slici 3.30 prikazana je fotografija plinskog mjehura od podvodne eksplozije.

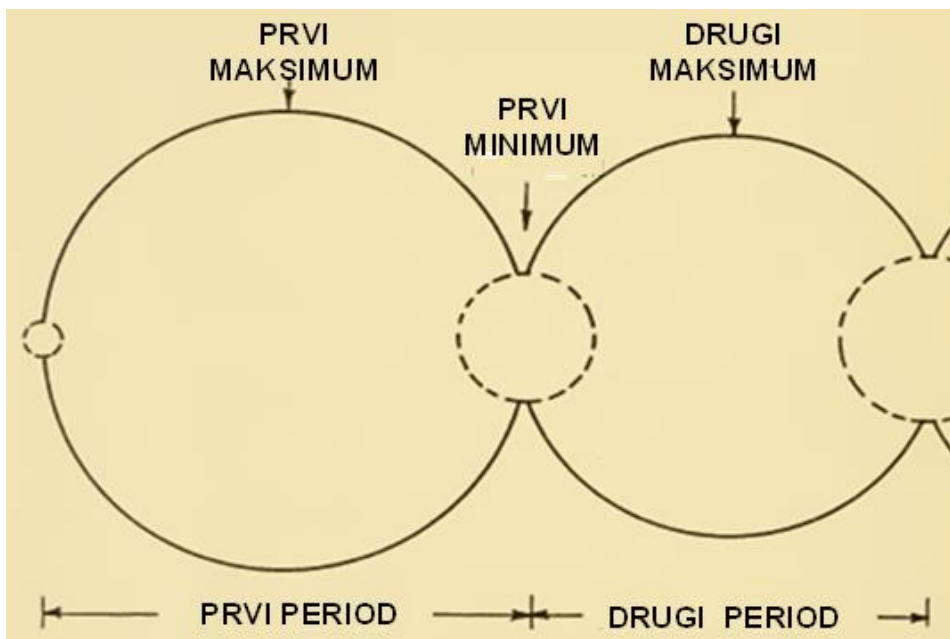


Slika 3.30 Plinski mjehur u trenutku maksimalnog radijusa [32]

Kao što se vidi na slici 3.30 plinski mjehur koji nastaje pri podvodnoj eksploziji je približno sfernog oblika.

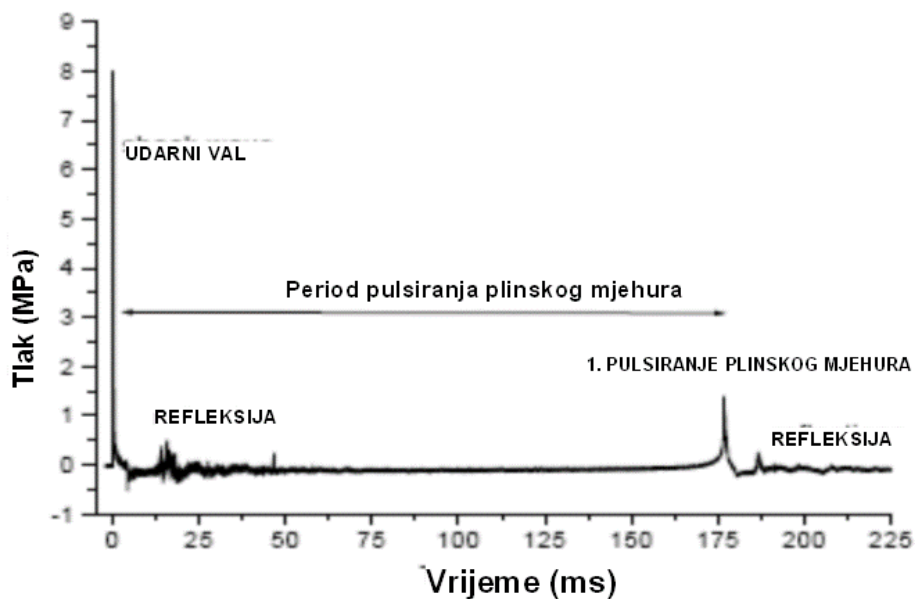
Eksperimentalnim ispitivanjem uočeno je sedam pulsiranja plinskog mjehura. Odnos parametara prvog, drugog i sljedećih plinskih mjehura ovisi o snazi eksplozije i dubini na kojoj je eksploziv aktiviran. Na osnovu brojnih ispitivanja utvrđeno je kako se za prvo pulsiranje utroši 59 %, za drugo 20 %, a za treće 7 % energije. Plinski mjehur je približno kuglastog oblika kod eksplozije u neograničenoj sredini [27].

Na slici 3.31 prikazan je eksplozivni naboj i pulsiranje plinskog mjehura. Pulsiranje je prikazano kroz ekstremne vrijednosti veličine plinskog mjehura, kroz dva pulsiranja. Vidi se kako se vrijednost maksimalne veličine plinskog mjehura smanjuje, a minimalna vrijednost povećava.



Slika 3.31 Pulsiranje plinskog mjehura u vremenu [3]

Na slici 3.32 prikazana je vremenska promjena tlaka podvodne eksplozije i period prvog pulsiranja plinskog mjehura, prikazan je maksimalni tlak udarnog vala samo prvog pulsiranja.



Slika 3.32 Dijagram promjene tlaka na udaljenosti 4,5 m od središta eksplozije, masa eksplozivnog punjenja 0,5 kg [17]

Na slici 3.32 vidi se odnos veličine tlaka udarnog vala i tlaka nakon prvog pulsiranja plinskog mjehura. Veličina tlaka nakon prvog pulsiranja plinskog mjehura je značajno manja od maksimalnog tlaka udarnog vala. Nakon maksimalne vrijednosti tlaka udarnog vala vide se veličine tlakova od reflektiranih udarnih valova od ograničenja. Važno je zapaziti vrijeme između pojave maksimalnog tlaka od udarnog vala i maksimalnog tlaka od prvog pulsiranja plinskog mjehura, koje predstavlja period pobude djelovanja.

Vidi se velika razlika između vremena trajanja maksimalnog tlaka od udarnog vala i vremena trajanja maksimalnog tlaka, od prvog pulsiranja plinskog mjehura, koje predstavlja period pobude djelovanja.

U literaturi [55] (Kolsky i dr. 1949.) proveli su istraživanje izbijanja (erupcije) plinskog mjehura podvodne eksplozije na temelju snimljenih fotografija na visini jedan metar iznad površine vode. Na fotografijama se vidi kako su kupole okružene crnim prstenovima, čija oštrina rubova ovisi o mirnoći vodene površine. Utvrđeno je kako se brzina podizanja kupole iznad površine vode smanjuje ako se povećava dubina eksplozivnog punjenja, a brzina se povećava ako se povećava količina eksplozivnog punjenja [55].

Kao što je već opisano, nakon detonacije nastaju plinoviti produkti eksplozije, u prostoru eksplozivnog punjenja, visoka temperatura i visok tlak koji snažno tlači okolnu vodu i stvara tlačnu zonu, koja se širi kroz vodu, a zatim plinski mjehur gura okolnu vodu i povećava svoj volumen do maksimalne vrijednosti, a zatim se smanjuje do minimalne vrijednosti i generira udarni val i to se ponavlja. U većini literature se obično, zbog pojednostavljenja ove vrlo kompleksne pojave, govori o udarnom valu i plinskom mjehuru kao zasebnim pojavama zbog velike razlike u vremenu i veličini tlaka.

Prema mišljenju autora rada treba se govoriti o podvodnoj eksploziji kao jedinstvenoj pojavi, gdje se nakon detonacije eksploziva pojavljuje plinski mjehur, koji pri prvoj početnoj, inicijalnoj i svakoj sljedećoj minimalnoj veličini generira novi udarni val. Plinski mjehur se višekratno širi i skuplja. Razvojem računalne tehnike, računalnih programa i numeričkih modela u budućnosti ova kompleksna fizikalna pojava će se vjerojatno moći cjelovito numerički modelirati.

Plinski mjehur ima oblik sličan obliku kugle. Za snimanje procesa povećanja i smanjenja plinskog mjehura potrebne su posebne kamere.



Prirast tlaka i brzina detonacije ovisi o vrsti eksploziva, težini eksplozivnog punjenja i udaljenosti od središta eksplozivnog punjenja do promatrane točke.

Temeljem eksperimentalnih istraživanja podvodne eksplozije i proučavanja dobivenih rezultata pripremljeni su empirijski izrazi za izračun parametra plinskog mjehura.

Empirijski izrazi za period i radijus plinskog mjehura:

Period plinskog mjehura:

$$T = K_5 \frac{W^{\frac{1}{3}}}{(D+9,8)^{\frac{5}{6}}} \text{ (s)}. \quad (3.108)$$

Radijus plinskog mjehura:

$$R = K_6 W^{\frac{1}{2}} \text{ (m)}, \quad (3.109)$$

gdje su:

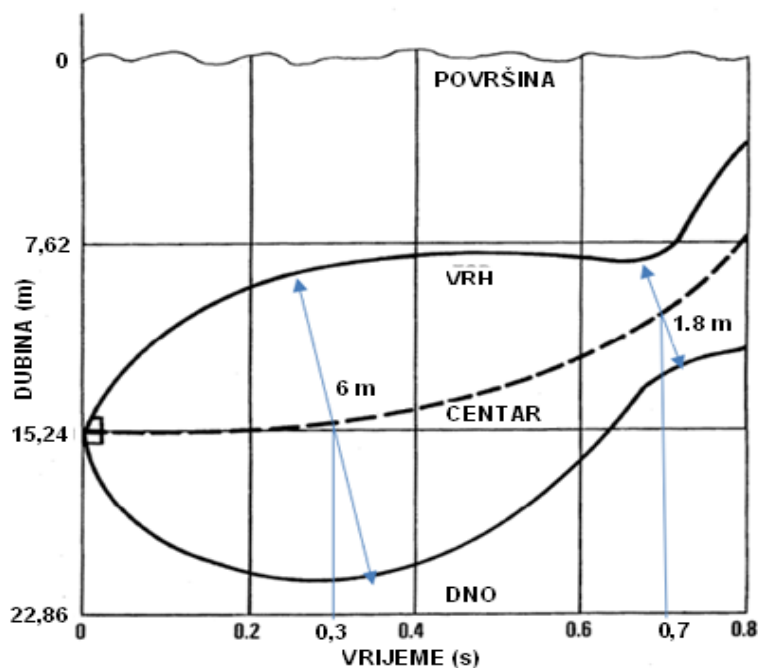
$K_5$  i  $K_6$  - koeficijenti koji ovisi o vrsti eksploziva,

$W$  - masa eksplozivnog punjenja u kilogramima,

$R$  - udaljenost promatrane točke od središta eksplozije u metrima i

$D$  - dubina eksplozivnog naboja u metrima.

Na slici 3.33 prikazan je vertikalni presjek gornje i donje plohe plinskog mjehura te trajektorija gibanja centra plinskog mjehura [3].



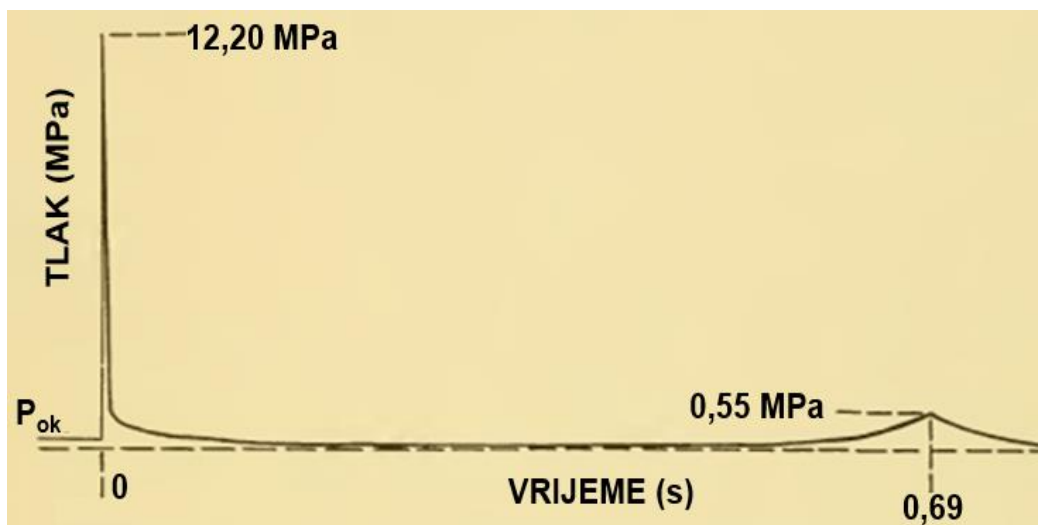
Slika 3.33 Plinski mjehur od TNT mase 136,08 kg, na dubini 15,24 m [32]

Na slici 3.33 je prikazano gibanje plinskog mjehura od eksplozivnog punjenja TNT-a, mase 136,08 kg, na dubini od 15,24 m. Treba napomenuti da je prikaz na slici pripremljen radi prikaza općih karakteristika gibanja plinskog mjehura. Plinski mjehur postiže maksimalnu vrijednost radijusa u vremenu oko 0,3 s, a minimalnu vrijednost radijusa u trenutku oko 0,7 s. Maksimalna vrijednost radijusa plinskog mjehura je oko 6 m, a minimalna oko 1,8 m.

Iz trajektorije gibanja središta plinskog mjehura je vidljivo kako je brzina gibanja plinskog mjehura prema površini vode najveća kada je plinski mjehur najmanjeg volumena. Tada su ispunjena dva uvjeta iz teorije nestlačivih fluida kad je voda pod velikim tlakom i kad je maksimalna kontrakcija plinskog mjehura. U ovom području voda je pod velikim tlakom, a tlakovi su značajni samo u malom vremenskom intervalu kad je maksimalna kontrakcija plinskog mjehura. Ako se pretpostavi da je gibanje vode oko plinskog mjehura nestlačivo, može se pokazati da bi tlak u vodi trebao ovisiti o kvadratu brzine širenja ili skupljanja plinskog mjehura [3].

Plinski mjehur pri svakom pulsiranju emitira novi udarni tlačni val u trenutku kad je volumen plinskog mjehura minimalne veličine. Oblik pulsiranja plinskog mjehura za određeni eksplozivni naboj značajno ovisi o dubini vode i blizini graničnih površina, što utječe na širenje plinskog mjehura [3]. U trenutku kad je plinski mjehur minimalne veličine, generira tlačnu sfernu zonu u vodi oko sebe i tako neutralizira dio vanjskog tlaka vode (razmiče vodu i oslobađa prostor) te osigurava maksimalnu vertikalnu rezultantu sile uzgona i vanjskog tlaka. Tada je brzina gibanja (migriranja) plinskog mjehura, prema površini vode, najveća.

Na slici 3.34 prikazana je promjena tlaka podvodne eksplozije u vremenu [3].



Slika 3.34 Tlak eksplozije eksploziva TNT mase 136,08 kg, na dubini 15,24 m [3]

Na slici 3.34 prikazana je promjena tlaka podvodne eksplozije, za prethodno analizirani primjer podvodne eksplozije (eksplozivni naboj TNT 136,08 kg, dubina 15,24 m). Na slici se ističu dvije ekstremne vrijednosti tlaka, prvo se vidi maksimalni tlak udarnog vala, odmah nakon eksplozije, a zatim, u trenutku  $t=0,69$  s, maksimalni tlak udarnog tlačnog vala prvog pulsiranja plinskog mjehura u trenutku 0,69 s.

Maksimalni tlak prvog tlačnog udarnog vala pulsiranja plinskog mjehura nije veći od deset do dvadeset posto od tlaka udarnog vala, ali je vrijeme djelovanja tlaka prvog tlačnog vala pulsiranja plinskog mjehura značajno duže. Za razliku od odnosa tlakova, površine ispod krivulje tlaka udarnog vala i udarnog vala prve oscilacije plinskog mjehura nemaju velike razlike, površine se ne razlikuju značajno kao tlakovi [3].

Za ovaj primjer podvodne eksplozije proveden je izračun perioda i maksimalnog radijusa prema empirijskim izrazima (3.108) i (3.109). Dobivena vrijednost za period plinskog mjehura, je  $T=0,73$  s, a rezultat eksperimenta je 0,69 s, a za radijus plinskog mjehura je  $R=6,15$  m, rezultat eksperimenta je 6,0 m. Odstupanja spomenutih eksperimentalnih rezultata i rezultata dobivenih empirijskim izrazima su neznatna.

Djelovanje udarnog vala i plinskog mjehura ima vrlo razorne učinke na obalne građevine i plovila te na ronioce. Istraživanja djelovanja podvodne eksplozije na ronioce su usmjerena na potencijalne smrtonosne učinke i procjenu sigurne udaljenosti ronjenja od središta podvodne eksplozije. Modeli podvodne eksplozije temelje se na fizičkoj akustici udarnog vala i bio učincima na ronioce, što je opisano u literaturi [56].

### 3.11 Mjerni sustavi za mjerenje parametara eksploziva i podvodne eksplozije

#### 3.11.1 Mjerni sustav podvodne eksplozije UWB 10

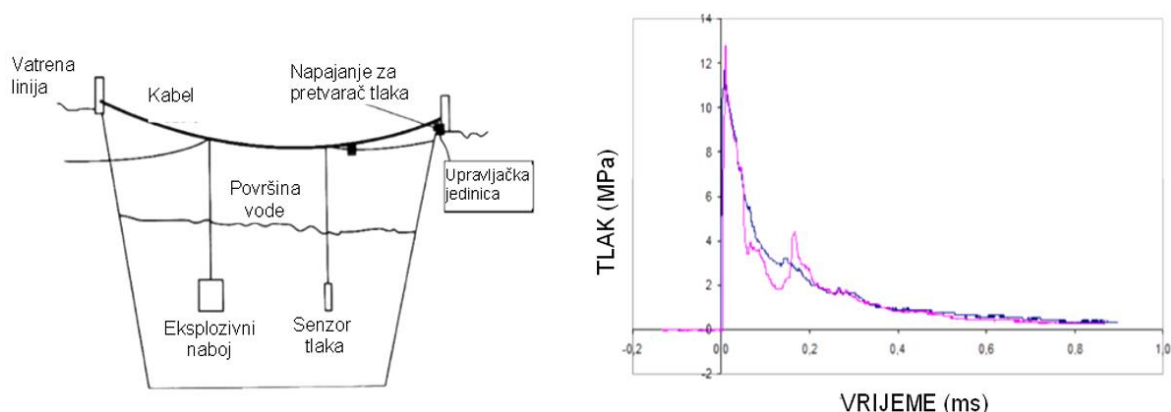
Sustav je u širokoj upotrebi za mjerenje tlaka udarnog vala pri Ispitivanju podvodne eksplozije. UWB test temelji se na procjeni parametara tlačnog vala generiranog podvodnom detonacijom. To je jedna od rijetkih metoda za određivanje energije eksploziva velikog kritičnog promjera [57].

UWB mjerni sustav, vidjeti sliku 3.35, omogućava određivanje parametara tlačnog vala generiranog podvodnom eksplozijom. Instrument je posebno dizajniran za procjenu radne sposobnosti eksploziva kada se ne mogu koristiti Trauzl blok testovi i metode balističkog minobacača, u slučaju industrijskih eksploziva. Test podvodne eksplozije daje pouzdanije rezultate u usporedbi s drugim metodama za određivanje sposobnosti obavljanja mehaničkog rada eksploziva i omogućuje korisniku izračun vrijednosti apsolutne energije eksploziva.

Sustav se sastoji od tri dijela:

- 1) Vodootporni senzor tlaka i vodeći kabeli,
- 2) Jedinica za kondicioniranje signala i prikupljanje podataka i
- 3) Jedinica i softver za evaluaciju podataka.

Eksplozivni naboj i jedan ili dva posebno dizajnirana senzora tlaka postavljaju se u vodi, na određenoj udaljenosti i dubini.



Slika 3.35 Položaj mjernog sustava (UWB 10) i dijagram tlaka [57]

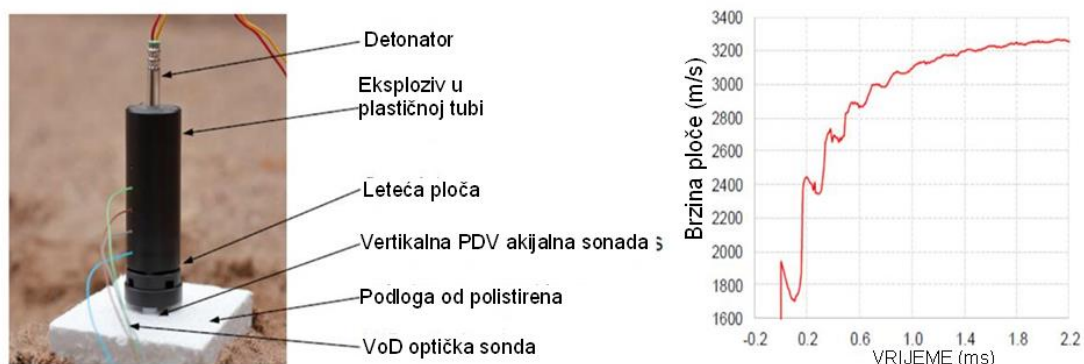
Signal sa senzora tlaka obrađuje se pomoću preciznog sustava za prikupljanje podataka velike brzine nakon eksplozije. Parametri eksplozije se procjenjuju iz snimljene promjene tlaka u vremenu.

Mjerni sustav je kalibriran detonacijom standardnih eksploziva s poznatim parametrima kao što su TNT, PETN i sl. [57].

### 3.11.2 Fotonski Doppler brzinomjer (VELOREX PDV)

OPTIMEX PDV Photonic Dopplerov brzinomjer, prikazan je na slici 3.36, je alat za mjerenje profila brzine i vremena pokretnih objekata korištenjem fotonskog Dopplerova brzinomjera. Može se koristiti za određivanje različitih detonacijskih svojstava eksploziva kao i za sva druga ispitivanja gdje je potrebna velika preciznost mjerenja brzine ili pomaka s ekstremnom vremenskom rezolucijom. Fotonsko Dopplerovo mjerenje brzine je metoda mjerenja brzine koja se temelji na Dopplerovom efektu i laserskom svjetlu. Stvarna vrijednost maksimalne brzine koja se može izmjeriti obično se kreće u rasponu od desetak do nekoliko tisuća metara u sekundi, ovisno o parametrima odabranog sustava za prikupljanje podataka. Minimalna brzina nije ograničena. Vremenska rezolucija povijesti brzine može biti visoka i do nekoliko nano sekundi. Mjerenje je jednostavno i robusno bez gotovo ikakvih ograničenja u pogledu kvalitete ciljne površine [57].

Kada se priprema uzorak novog eksploziva ili eksplozivne smjese, obično je potrebno opisati njegova detonacijska svojstva kako bi se osiguralo usklađenje s preliminarnim proračunima ili vrijednostima iz referentne literature. Mjerenje brzine eksplozivno ubrzanih materijala i izrada dijagrama vremenske promjene brzine može se koristiti za određivanje ključnih svojstava novih eksplozivnih tvari.



Slika 3.36 Mjerni sustava (VELOREX PDV) i dijagram brzine [57]

Za razliku od tradicionalnih, zastarjelih Hess ili Kast testova, koji se koriste za relativno određivanje brizantnosti. PDV uređaj omogućuje izravno mjerenje bez potrebe neposredne usporedbe sa standardnim uzorcima. U usporedbi s instrumentima

piezoelektrične igle ili brze profesionalne kamere, OPTIMEX PDV nudi iznimno povećanu rezoluciju mjerenja. Korištenje OPTIMEX PDV sustava nije ograničeno na eksplozive, već uključuje fiziku velike energije, balistiku, konstrukciju i inženjering.

Prednost i značajke:

- Do 4 aktivna mjerna kanala,
- Jednostavan i pouzdan instrument,
- Mjerenje brzine u rasponu od 0 do 10 km/s (prema korištenom DAQ sustavu) s ekstremnom vremenskom rezolucijom,
- Sigurnost za oči zahvaljujući dizajnu svih optičkih vlakana,
- Uključen softver za procjenu podataka i
- Dodatna robusna torbica za upotrebu na terenu [57].

### 3.11.3 Optički analizator procesa eksplozije (OPTIMEX 8)

Optički analizator procesa eksplozije OPTIMEX 8 je višenamjenski uređaj koji koristi niz optičkih senzora za snimanje signala intenziteta svjetlosti koje generiraju eksplozivi. Njegova primarna upotreba je mjerenje brzine detonacije u svim vrstama energetskih materijala. OPTIMEX 8 predstavlja noviju generaciju VOD-815 uređaja s redizajniranim optoelektroničkim sustavom prikupljanja i potpuno naprednim značajkama, za procjenu podataka na temelju opsežnog istraživanja izlazne svjetlosti eksploziva. Optički senzori uglavnom pružaju punu otpornost na ravnomjerne struje i elektromagnetske smetnje [57].

OPTIMEX 8 prvenstveno je dizajniran za mjerenje brzine detonacije energetskih materijala u industrijskim, obrazovnim ili inženjerskim primjenama. OPTIMEX 8 bilježi pune profile intenziteta svjetlosti i vremena na određenim mjestima unutar eksplozivnog punjenja. Analiza profila emisije svjetlosti čini procjenu takvih signala robusnom i pouzdanom za sve postojeće uzorke uključujući i lošije eksplozive.

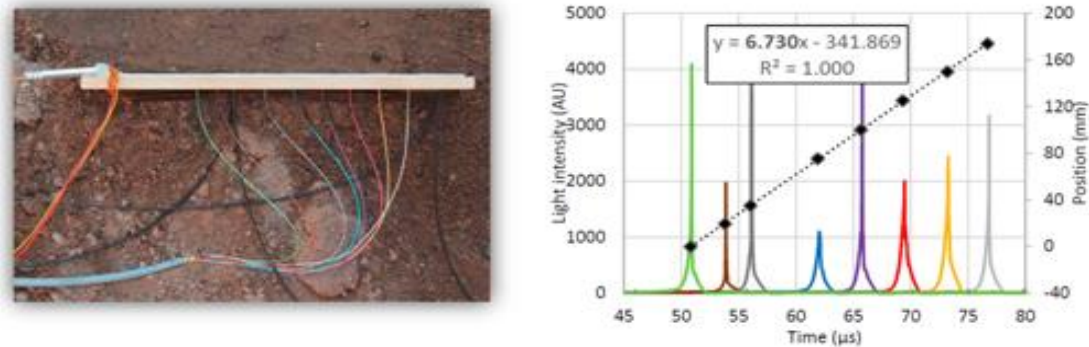
Optička prozirnost eksploziva, niska emitivnost svjetla i naknadno sagorijevanje ne utječu na točnost rezultata mjerenja. OPTIMEX 8 se također može koristiti za mjerenje zakrivljenosti detonacijskog vala i brzine nereaktivnog udara.

Prednost i značajke:

- 8 optičkih sondi odabranih prema zahtjevu kupca (plastična ili staklena vlakna),
- Dostupni su puni profili intenziteta svjetla i vremena,
- Automatska procjena podataka s ograničenim ručnim ispravicima,

- Instrument napunjen baterijama opremljen je internom memorijom,
- LCD zaslon je osjetljiv na dodir i
- Dodatna bežična kontrola.

Usklađenost s EN 13631-14 Eksplozivi za civilnu uporabu – Snažni eksplozivi, 14. dio: Određivanje brzine detonacije [57].



Slika 3.37 Optički analizator procesa eksplozije (OPTIMEX 8) i dijagrami [57]

#### 3.11.4 Detonacijski kalorimetar (DCA 25)

Detonacijski kalorimetar, vidjeti sliku 3.38, općenito mjeri toplinu koja se oslobađa pri detonaciji energetskih materijala. OZM Research DCA serija koristi konstantan volumen u otpornoj ispitnoj posudi [57].

Tipična primjena DCA 25 i DCA 100 je u istraživanju, razvoju i osiguranju kontrole kvalitete u civilnim i vojnim institucijama kao što su sveučilišta, akademije, istraživački laboratoriji, proizvodne tvrtke i drugi. Ispitne posude su volumena 5,3 i 32,0 litre i pružaju izvrsnu mogućnost za istraživanje svih energetskih materijala osim materijala koji mogu oštetiti posudu od nehrđajućeg čelika nakon iniciranja (legura aluminija sa željezom itd.).

Osobine:

- Vrhunska razlučivost termometra, od čak 0,00001 K,
- Izvrsna ponovljivost kalorimetrijskih rezultata, od samo 0,1%,
- Ugrađeni dinamički senzori tlaka, prema zahtjevu kupaca,
- Detonacijska komora od nehrđajućeg čelika je visoke čvrstoće, za ispitivanje u vakuumu, zraku, dušiku, argonu, kisiku itd.,
- Potpuno automatizirano prikuplja podatke i evaluira rezultate i

- Ugrađen je manipulator za posude i odvojiva kolica za jednostavno pozicioniranje [57].



Slika 3.38 Detonacijski kalorimetar (CCA 25) [58]

### 3.11.5 Koenen test (KT300)

Dizajniran je za određivanje toplinske osjetljivosti čvrstih i tekućih tvari.

Koenenov test se koristi za određivanje osjetljivosti krutih i tekućih tvari na učinak velike topline u većim dijelom zatvorenom prostoru. Uzorci ispitivanog materijala zatvoreni su u čeličnu cijev opremljenu pločom s otvorom na gornjem dijelu.

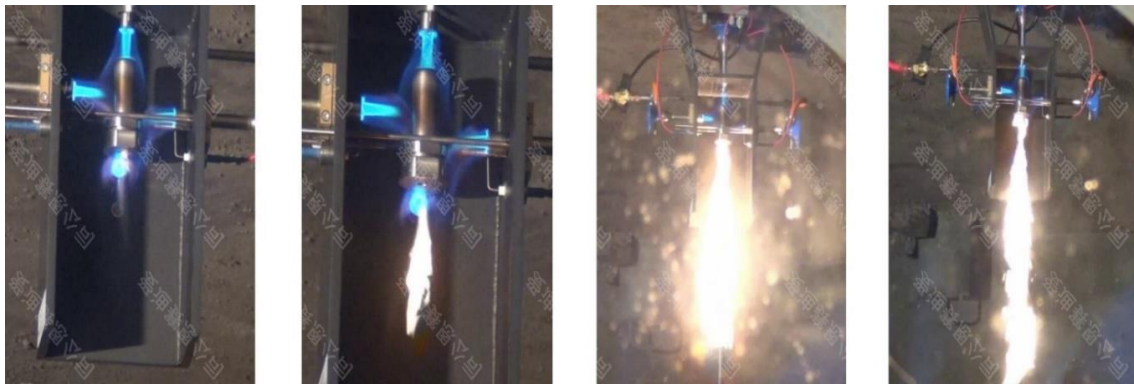
Podaci dobiveni Koenenovim testom mogu se koristiti za određivanje klasifikacije tvari za prijevoz i procjenu stupnja ventilacije potrebne za izbjegavanje eksplozije tijekom procesa obrade.

Prednosti i značajke:

- Izdržljiv dizajn – zavareno tijelo zaštitne posude izrađeno je od nehrđajućeg čelika,
- Daljinski upravljano,
- Osiguran kompletan set pribora i potrošnog materijala,
- Usklađenost,
- Preporuke UN-a o prijevozu opasnih tvari, Priručnik testova i kriterija, 2010. - Test 1 (b),
- Direktiva Europske komisije 92/69/EEC, Metoda A i
- Eksplozivna svojstva i daljnja usklađivanja sa standardima na zahtjev [57].

Uređaj Koenenova testa u radu prikazan je na slici 3.39.





Slika 3.39 Koenenov uređaj [57]

### 3.11.6 Najmanja laboratorijska detonacijska komora (LDC25)

Detonacijska komora LDC 25, vidjeti sliku 3.40, je najmanja laboratorijska detonacijska komora; to je posuda od nehrđajućeg čelika zatvorena poklopcem na navoj (eksplozivno punjenje visi u poklopcu komore), maksimalni kapacitet je 25 g TNT. Ispitivanje je dopušteno pri početnom tlaku plina do 30 bari.

LDC 100 je veća posuda od nehrđajućeg čelika istog dizajna kao LDC 25, maksimalnog kapaciteta 100 g TNT. Zbog svoje težine (cca 300 kg), posuda se može ugraditi u posebno radno postolje s električnim kranom za manipulaciju, rotirajućim uređajem za lakše čišćenje i policom za alate i pribor

KV 250M4 je teška čelična detonacijska komora s maksimalnim kapacitetom od 250 g TNT, opremljena lako dostupnim radnim stolom za pozicioniranje eksplozivnog punjenja, ručnom bravom za brzo zatvaranje i otvaranje poklopca, ulaznim i izlaznim ventilima, brojnim priključcima za optičke ili električne mjerne kabele, kao i s dva optička prozora za ugradnju drugih senzora ili kamera za brzo snimanje [57].



Slika 3.40 Detonacijska komora [59]

## 4 DJELOVANJE PODVODNE EKSPLOZIJE

### 4.1 Općenito o djelovanju podvodne eksplozije

Podvodna eksplozija izaziva snažan udar i šok u okolini, koji se preko vode prenosi na konstrukciju, što može prouzročiti elastične i plastične deformacije, nestabilnosti te pukotine, lom, fragmentaciju i odbacivanje dijelova konstrukcije, veća oštećenja, otkazivanje i kolaps konstrukcije. Stoga istraživanje djelovanja podvodne eksplozije na konstrukcije zaslužuje poseban značaj.

Statička i dinamička opterećenja su uglavnom određena intenzitetom, mjestom djelovanja, učestalosti, a dok kod podvodne eksplozije je jako teško odrediti intenzitet, mjesto i vjerojatnost djelovanja te učestalost [49].

Djelovanje podvodne eksplozije spada u udarna opterećenja (engl. *impact*), koja se odlikuju naglim prirastom, od početka djelovanja do maksimalne vrijednosti, u vrlo kratkom vremenu (odjednom). Takva vrsta opterećenja izaziva poseban odgovor i ponašanje konstrukcije kao i materijala, koji se značajno razlikuje od ponašanja konstrukcije i materijala izloženih statičkim i uobičajenim dinamičkim opterećenjima. Naime pri djelovanju udarnog opterećenja uočen je porast čvrstoće materijala, koja pored ostalih parametara značajno ovisi o brzini nastupanja opterećenja [38].

Rušilačko djelovanje podvodne eksplozije ovisi o vrsti i količini eksploziva, dubini eksplozije, udaljenosti od cilja, utjecaju ograničenja (slobodne površine vode i dna i ostalih prepreka), vrsti cilja i sl.

Kao prva zadaća, analizira se udarno djelovanje neke optimalne količine eksploziva za podvodnu eksploziju kojom se postiže rušenje i onesposobljavanje određene podvodne građevine. Kao druga zadaća, analizira se i određuje koje je zaštitne mjere potrebno poduzeti za zaštitu podvodne građevine, kako bi bila mala vjerojatnost djelovanja, minimalno oštećenje i brz način popravka.

Učinak podvodne eksplozije ne ovisi samo o energiji koju eksplozija oslobodi nego i o načinu prijenosa energije na podvodnu građevinu koja je cilj djelovanja podvodne eksplozije [27].

## 4.2 Načini djelovanja podvodne eksplozije

Učinak podvodne eksplozije na građevinu, za određenu količinu eksploziva, ako zanemarimo ograničenja, primarno ovisi o udaljenosti centra eksplozije do cilja (podvodna građevina) kao i njihovu međusobnom položaju. S obzirom na udaljenost centra eksplozije do cilja razlikujemo tri različita slučaja [27].

1. Eksplozivni naboj se nalazi neposredno uz podvodni cilj eksplozije. U ovom slučaju dolazi do oštećenja cilja u ovisnosti o čvrstoći, pri čemu se razaranje postiže snažnim tlakom eksplozivnih plinova, a voda kao dobar prijenosnik energije djeluje sekundarno.
2. Eksplozivni naboj se nalazi na nekoj udaljenosti od cilja. Udarni val ima glavnu ulogu zbog svoje velike energije i može oštetiti cilj podvodne eksplozije, odnosno podvodnu građevinu, a vodena masa koja struji za njim može dovršiti razaranje već oštećene građevine. Kod ovog slučaja je važno mjesto pogotka i pravac udara.
3. Eksplozivni naboj punjenje detonira na nekoj većoj udaljenosti od cilja. Ovo djelovanje nastupa na daljini s pojavom rezonance. U ovom slučaju djeluju zajedno udarni val i plinski mjehur, kao usisni ili udarni tlak, pri čemu podvodna eksplozija, u većini slučajeva lomi konstrukciju. Za svaku količinu eksplozivnog punjenja, ovisno o dubini postoji najpovoljnija udaljenost. Mjesto i pravac udara i u ovom slučaju igraju vrlo bitnu ulogu [27].

Uslijed djelovanja tlaka udarnog vala konstrukcija počinje vibrirati, pri čemu naprezanje od savijanja ovisi od odnosa valne dužine eksplozije prema dužini konstrukcije. Između ovih vibracija je niski tlak pulsirajućeg plinskog mjehura pa može nastupiti sisajuće djelovanje (podtlak). Ako se period osciliranja savijanja konstrukcije (tlak – vlak) podudara s periodom osciliranja plinskog mjehura, pa ako uz ovo djelovanje djeluje još i sekundarni val, dolazi do rezonance kod koje se postiže maksimalno razorno djelovanje koje dovodi do sloma i kolapsa konstrukcije [27].

## 4.3 Parametri djelovanja podvodne eksplozije

Rušilačko djelovanje podvodne eksplozije bit će veće, ako je veći tlak eksplozije i duže vrijeme djelovanja tlaka na konstrukciju. Fizikalna veličina koja obuhvaća ova dva parametra je impuls tlaka. Vrijednost impulsa u nekoj točki eksplozivnog polja može se odrediti sljedećom relacijom:

$$I(t, R) = \int_0^t p(t, R) dt \quad (4.1)$$

$p(t, R)$  – promjena tlaka udarnog vala u vremenu ( $t$ ) za promatranu točku, koja se nalazi na udaljenosti ( $R$ ) od centra eksplozije [27].

Maksimalni tlak na fronti udarnog vala, za eksploziju u neograničenoj sredini, može se odrediti pomoću jednadžbe i to:

$$P_m(R) = 53,39 \left( \frac{\sqrt[3]{kW}}{R} \right)^n \quad (MPa), \quad (4.2)$$

$k$  - koeficijent karakteristike eksploziva, za TNT  $k=1$ ,

$W$  – masa eksploziva u kg,

$R$  - udaljenost od centra eksplozije do promatrane točke u m i

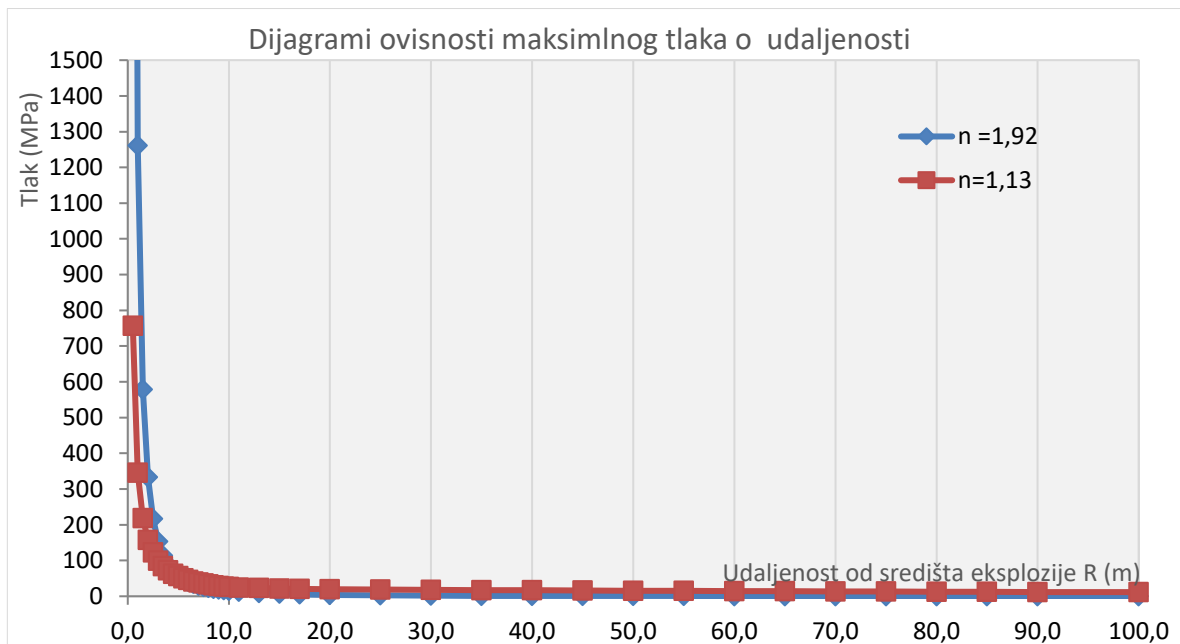
$R_{ep}$  – radijus eksplozivnog naboja u m.

Na temelju ispitivanja utvrđeno je [27]:

$$n=1,13 \quad \text{za} \quad 7 < \frac{R}{R_{ep}} < 1000 \quad \text{i}$$

$$n=1,92 \quad \text{za} \quad 1 < \frac{R}{R_{ep}} < 5.$$

Ovdje su navedena samo dva izraza, od jednadžbi navedenih u cjelini 3.8.2, prva za impuls u općem obliku (3.27), a druga za tlak udarnog vala (3.54), kako bi opisali djelovanje podvodne eksplozije.



Slika 4.1 Dijagram ovisnosti maksimalnog tlaka na fronti udarnog vala o udaljenosti od središta eksplozije

Na slici 4.1 može se primijetiti kako imamo dva različita područja. U prvom području od 0,5 do 5,5 m dijagram za vrijednost  $n=1,92$  daje veće vrijednosti tlaka od dijagrama za vrijednost  $n=1,13$ , razlika je značajno veća za manje vrijednosti udaljenosti od središta eksplozije. Za vrijednosti udaljenosti od oko 5,5 m tlakovi su približno jednaki za obje vrijednosti.

U drugom području od 5,5 m do 100 m dijagram za vrijednost  $n=1,13$  daje neznatno veće vrijednosti tlaka od dijagrama za vrijednost eksponenta  $n=1,92$ , a razlika se s povećanjem udaljenosti postepeno smanjuje.

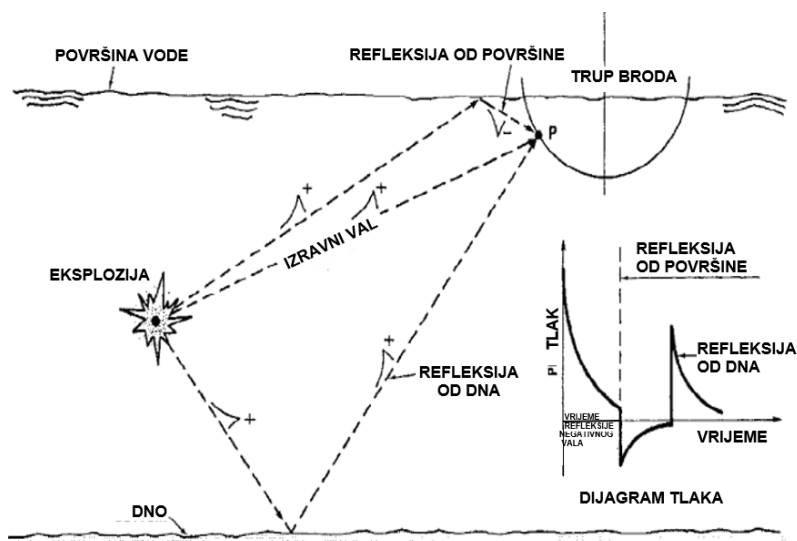
Na slici 3.12 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka za tri različita para vrijednosti ( $K$  i  $A$ ) empirijskog izraza za izračun tlaka na frontu udarnog vala, a na slici 4.1 prikazani su dijagrami vremenske ovisnosti tlaka pomoću empirijskog izraza (4.2) za različite vrijednosti eksponenta  $n$  za udaljenosti od 0,5 do 100 m.

#### 4.4 Djelovanje podvodne eksplozije u ograničenoj sredini

Pored djelovanja podvodne eksplozije u neograničenoj sredini djelovanje se može odvijati i u ograničenoj sredini. Obično su ograničenja slobodna površina vode i dno čiji utjecaj je izravan na dijagram tlaka kao i djelovanje plinskog mjehura.

Pored spomenutih prirodnih ograničenja djelovanju podvodne eksplozije (slobodna površina vode i dno) i cilj djelovanja podvodne eksplozije (podvodna građevina, podmornica, brod, i sl.) predstavlja posebnu vrstu ograničenja. Na sva ograničenja tj. prepreke djeluju izravni i reflektirani udarni valovi i naknadni valovi koje generira plinski mjehur te njihovi reflektirani valovi od slobodne vodene površine i dna. Također na prepreku djeluju i valovi, koji putuju kroz tlo na dnu, vidjeti sliku 3.23. Važno je istaći kako se promjene tlaka pojavljuju dinamički, u promatranom vremenu.

Na slici 4.2 prikazana su djelovanja podvodne eksplozije na cilj (brod).



Slika 4.2 Vremenski prikaz promjene tlaka od udarnog i reflektiranih valova [6]

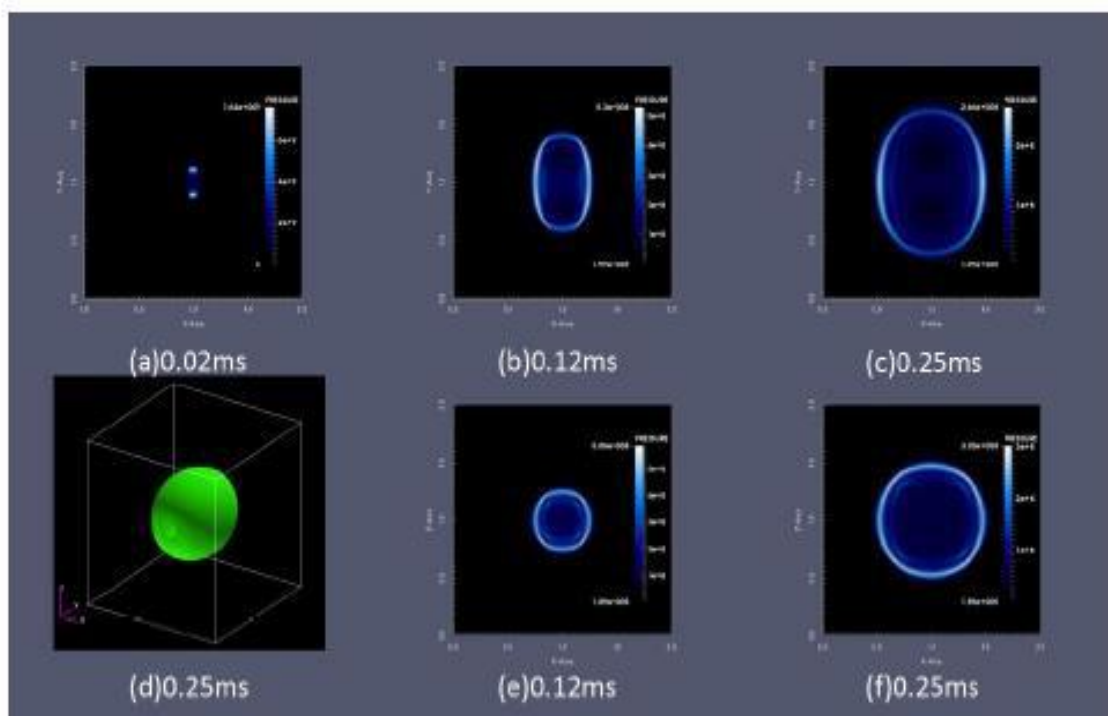
Na slici 4.2 prikazana je podvodna eksplozija koja udarnim valom djeluje izravno na brod (tlak) kao i djelovanje reflektiranih valova od površine vode (vlak) i morskog dna (tlak), djelovanja su slična i na podvodnu građevinu. Na dijagramu tlaka na brod prikazana je vremenska promjena tlaka od djelovanja tlačnog vala izravno i od reflektiranih valova od površine vode i od morskog dna. Iz dijagrama je vidljiv maksimalni tlak, vrijednost maksimalnog podtlaka i ponovno drugi ekstremni tlak, u vremenu.

Na dijagramu nisu uzeti u obzir izravni valovi od pulsiranja plinskog mjehura i njihove refleksije (od dna i slobodne površine vode) kao i apsorbirani valovi u dno koji putuju kroz tlo i reflektiraju o tlo i dolaze do cilja. Svakako je za određivanje odgovora obalne građevine pored maksimalne vrijednosti tlaka i podtlaka značajna i vremenska promjena tlaka, jer se radi o posebnoj vrsti udarnog opterećenja.

Udarni val se širi kroz vodu i reflektira od dna ili površine vode te udara u cilj (obalnu građevinu, brod ili podmornicu). Udarni valovi odbijeni od dna prvenstveno ostaju kompresivni i reflektiraju se prema Snellovim zakonu. Poseban izazov za daljnja znanstvena istraživanja predstavlja rješavanje ove kompleksne zadaće tj. određivanje sumarnog dijagrama tlaka svih djelovanja podvodne eksplozije na građevinu, tijekom ukupnog vremena djelovanja podvodne eksplozije.

## 4.5 Oblik udarnog vala

Na slikama 4.3, 4.4 i 4.5 prikazani su rezultati numeričke analize podvodne eksplozije koja je nastala detonacijom eksplozivnog naboja TNT cilindričnog oblika. Eksploziv je postavljen na dubini od 10 m, ispod površine vode i na udaljenosti od 2 m od krute pregrade - zida, koji se nalazi na lijevom rubu slike. Dužina cilindričnog eksplozivnog punjenja je 0,5 m, masa eksplozivnog punjenja je 4 kg, a gustoća eksploziva je 1580 kg/m<sup>3</sup>. Na slici 4.3 prikazano je generiranje, širenje i oblikovanje udarnog vala nakon eksplozije [39].



Slika 4.3 a) – (c) horizontalni presjeci udarnog vala kroz horizontalnu os eksploziva, (d) 3D prikaz udarnog vala i (e) – (f) vertikalni presjeci udarnog vala [39]

Na slici 4.3 prikazano je širenje i promjena oblika udarnog vala, nakon eksplozije. Fronta udarnog vala u ranoj fazi je elipsoidnog oblika. Oblik elipsoida, duljina uzdužne i poprečne osi elipsoida, ovise o dužini i promjeru cilindričnog eksplozivnog punjenja. Brzina propagacije udarnog vala smanjuje se s padom tlaka. Smanjenje brzine propagacije je veće na krajevima cilindra nego u drugim smjerovima, što rezultira stvaranjem konačnog sfernog oblika fronta udarnog vala. Udarni val se može smatrati približno sfernim za veće udaljenost od središta eksplozije [39].

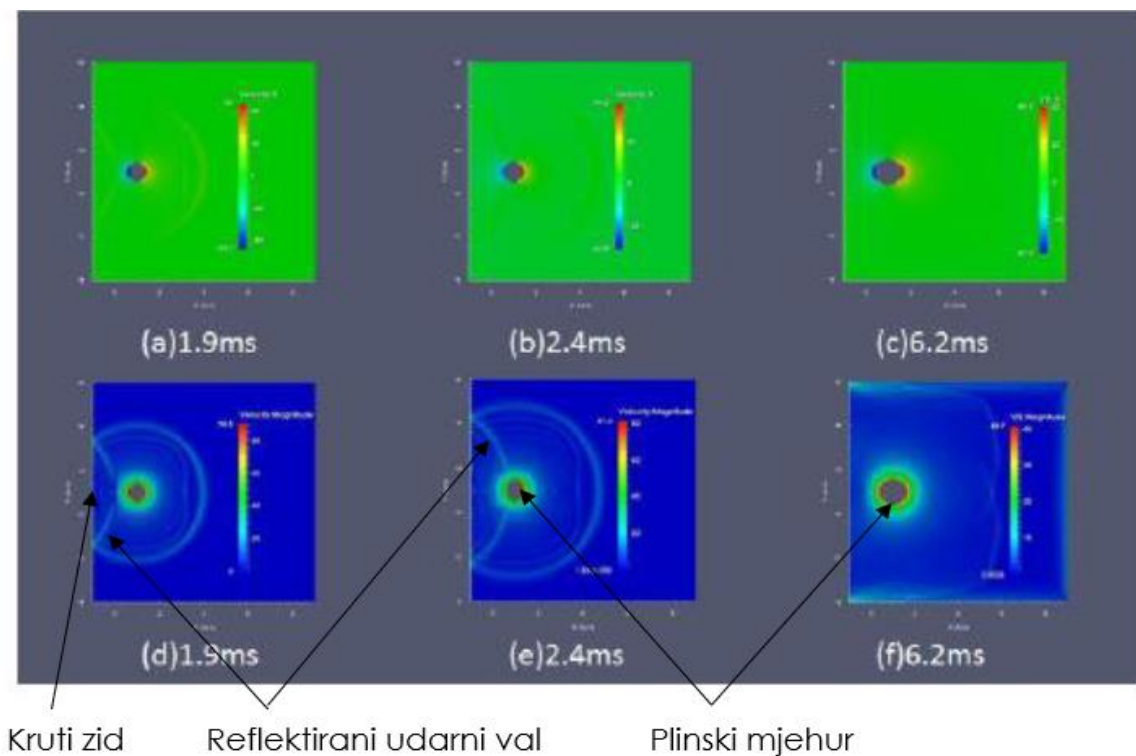
Prethodno istraženo svojstvo formiranja i propagacije te naknadnog oblikovanja udarnog vala u sferni oblik je značajno pri analizi djelovanja podvodne eksplozije na obalne građevine. Obično su eksplozivna punjenja oblika valjka, što usložnjava procese numeričkog modeliranja eksplozivnog punjenja i numeričkog postupka.

Zahvaljujući prethodno spomenutom zapažanju naknadnom sfernom oblikovanju fronta udarnog vala za numeričku analizu djelovanja eksplozije može se uzeti eksplozivno punjenje sfernog oblika, umjesto oblika valjka ako se promatra djelovanje podvodne eksplozije na određenoj udaljenosti od centra eksplozije.

U ovom radu, poradi pojednostavljenja numeričkih modela i proračuna korišteno je eksplozivno punjenje u obliku kugle.

#### 4.6 Djelovanje udarnog vala i plinskog mjehura

Nadalje je analizirana refleksija udarnog vala od zida i interakcija reflektiranog udarnog vala i plinskog mjehura, vidjeti sliku 4.4.



Slika 4.4 Interakcija reflektiranog udarnog vala i plinskog mjehura (horizontalni presjeci) (a)– (c) komponenta brzine x i (d) – (f) apsolutne brzine [39]



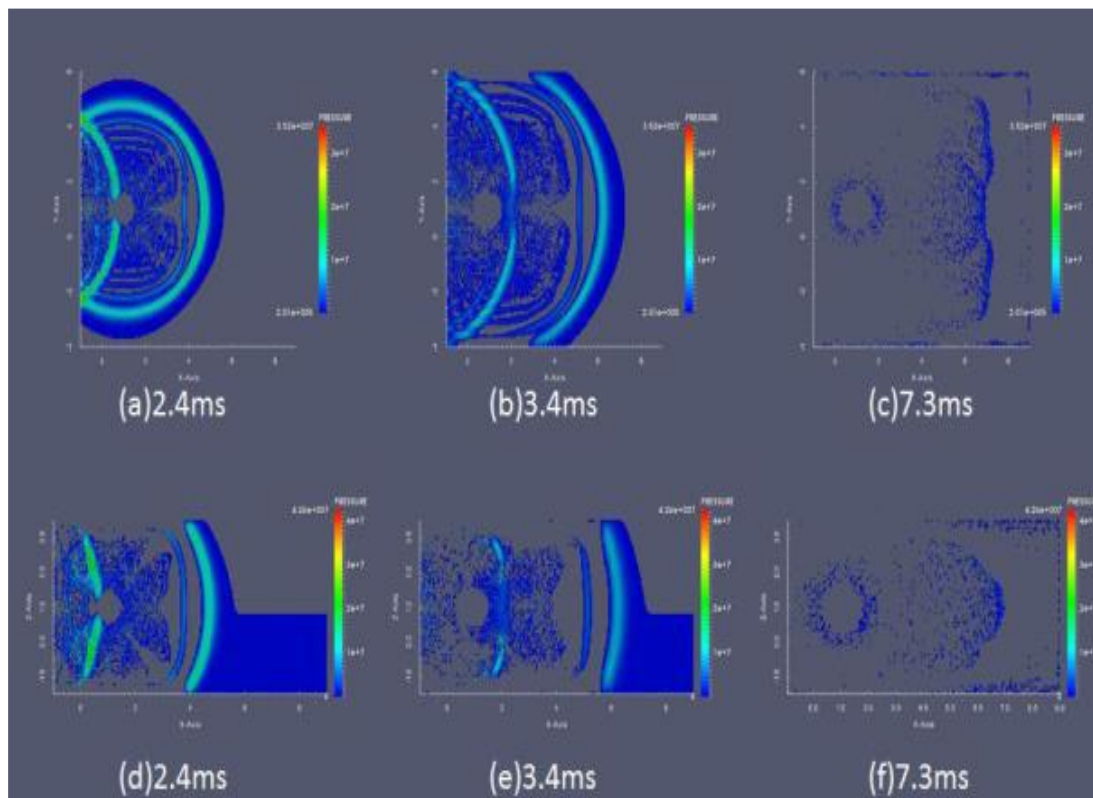
Na slici 4.4 (d) i 4.4 (e) prikazano je oblikovanje reflektiranog udarnog vala, nakon što udarni val udari u kruti zid. Prije nego što se reflektirani udarni val sudari s plinskim mjehurom, brzina širenja plohe plinskog mjehura je oko 90 m/s, kao što je prikazano na slici 4.4 (a).

Nakon približno 2,4 milisekunde, od trenutka detonacije, reflektirani udarni val se sudara s plinskim mjehurom. Zbog toga brzina širenja prednje i stražnje plohe plinskog mjehura postaju različite, što podrazumijeva kompresiju plinskog mjehura. Maksimalna razlika u brzini širenja može biti do 16 m/s, kao što je prikazano na slici 4.4 (b), a razlika se smanjuje u vremenu od 3 do 4 milisekunde.

Plinski mjehur utječe na širenje reflektiranog udarnog vala. Komprimirani ili ekspanzijski val se teorijski može odbiti kad udari u plinski mjehur, što utječe na širenje ili skupljanje (pulsiranje) plinskog mjehura [39]. Temeljem analize interakcije (sudara) reflektiranog udarnog vala od zida i plinskog mjehura koji se širi dolazi do deformacije plinskog mjehura (jednostranog usporavanja širenja) i asimetrične promjene gibanja stijenki kao i promjene gibanja plinova u samom plinskom mjehuru. Reflektirani udarni val ima određene promjene uslijed sudara s plinskim mjehurom, dijelom se reflektira, a dijelom ogiba oko njega i nastavlja širenje.

Nakon prolaza fronta udarnog vala, pojavljuje se dugo trajanje niskog tlaka, što je prikazano na slici 4.5, koje odgovara usisnom djelovanju podvodne eksplozije.

U drugom ciklusu plinski mjehur se širi, do 80 % veličine iz prvog ciklusa, što uzrokuje duže trajanje usisnog tlaka. Polje tlaka na zid postaje složenije nakon interakcije između dolaznog plinskog mjehura i reflektiranog udarnog vala, zbog njihove snažne interakcije, u blizini zida [39].



Slika 4.5 Polje tlaka podvodne eksplozije (a) – (c) horizontalni presjeci kroz horizontalnu os eksploziva i (d) – (f) vertikalni presjeci [39]

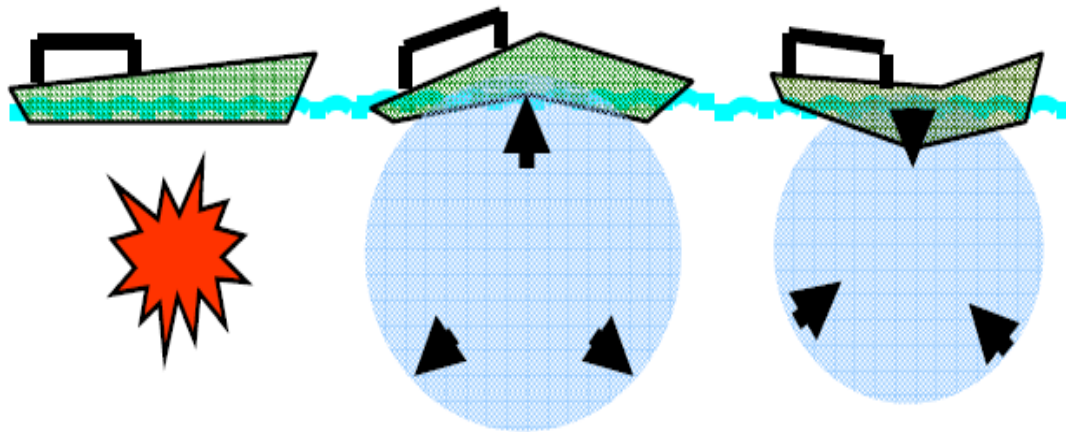
Djelovanje podvodne eksplozije na brodove i podmornice predstavlja značajan segment ratovanja na moru. Podvodna eksplozija ispod broda ili podmornice, na određenoj udaljenosti ispod trupa, djeluje udarnim valom, a zatim djeluje plinski mjehur. Plinski mjehur u svakom pulsiranju emitira udarni val i naizmjenično više puta, podiže trup broda, gore – tlak i povlači trup broda dolje – vlak, uglavnom na istom dijelu trupa, što lomi kobilicu broda. Istraživanja su provedena na više različitih modela kobilica broda eksperimentalno i numeričkim postupkom. S obzirom na značaj djelovanja podvode eksplozije na borbene brodove i podmornice, ova istraživanja su provedena na velikom broju uzoraka, uz potporu više država.

#### 4.7 Djelovanje plinskog mjehura

Kao što je već spomenuto, tlak prvog udarnog tlačnog vala pulsiranja plinskog mjehura je 10-20 % od maksimalnog tlaka udarnog vala, ali duže traje i daje možda i veći impuls nego što je impuls udarnog vala.

Frekvencija pulsiranja plinskog mjehura je blizu prve ili druge vlastite frekvencije broda. Pulsiranje tlaka plinskog mjehura uzrokuje oscilaciju broda i rezonancu, što nanosi ozbiljne štete na opremi i konstrukciji broda, nižeg i višeg stupnja oštećenja uključujući povrede i gubitke posade. Nakon toga brod ili podmornica može izgubiti operativnu raspoloživost (izvan uporabe) ili potonuti [37].

Na slici 4.6 prikazano je djelovanje podvodne eksplozije (udarni val i plinski mjehur) na brod [17] i [60].



Slika 4.6 Podvodna eksplozija ispod trupa broda, djelovanje plinskog mjehura na kobilicu broda [17]

Na slici 4.6 podvodna eksplozija je ispod broda, na brod djeluje udarni val, a zatim plinski mjehur, koji se širi i podiže trup broda te opterećuje i savija kobilicu broda. Nakon toga, plinski mjehur se skuplja i povlači trup broda prema dolje i tako ponovno savija kobilicu, što se više puta ponavlja. Naizmjenično opterećenje (savijanje) kobilice (tlak – vlak) ponavlja se više puta, što može dovesti do rezonance, zamora materijala i loma kobilice.

U literaturi (Menon, 1993.) istraživao je dinamiku plinskog mjehura, koji nastaje tijekom podvodne eksplozije, korištenjem metode ALE (Arbitrary Lagrange-Euler) i 3D konačnih elemenata. Provedena su paralelno eksperimentalna i istraživanja na numeričkim modelima. Eksperimentalni i numerički rezultati pokazuju dobro kvalitativno i kvantitativno slaganje. Provedena su istraživanja interakcije plinskog mjehura i plinskog

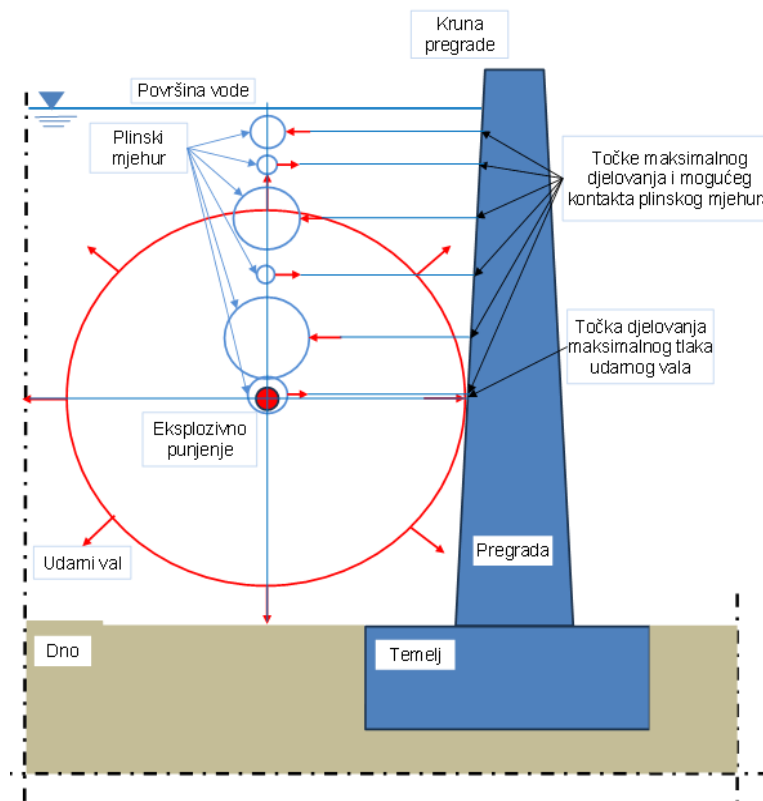
mjhura, koji su rezultat detonacije dvaju eksplozivnih naboja, pod vodom. Također su provedena istraživanja interakcije plinskog mjehura i zida (kruta pregrada).

Kod interakcije plinskog mjehura i plinskog mjehura primijećen je nastanak vodenog mlaza kad jedan plinski mjehur nestaje u interakciji s drugim. Kod interakcije plinskog mjehura i zida nakon kolapsa plinskog mjehura u blizini krutog zida nastaje povratni mlaz vode velike brzine [14].

Obalne i hidrotehničke građevine, koje su potencijalne mete djelovanja podvodne eksplozije, obično su vertikalne ili blago nagnute. Djelovanje plinskog mjehura na obalnu i hidrotehničku građevinu je bočno dok je kod brodova i podmornica djelovanje ispod trupa. Plinski mjehur s podvodnom građevinom može imati isključivo bočni kontakt. Kontakt plinskog mjehura s podvodnom građevinom može biti izravan ako je maksimalni radijus plinskog mjehura veći od udaljenosti središta eksplozije i podvodne građevine. Kontaktna površina može biti od minimalne veličine („točka“) do maksimalne veličine (krug), čiji je radijus jednak radijusu plinskog mjehura. Plinski mjehur i podvodna građevina mogu biti bez kontakta, ako je udaljenosti između središta eksplozije i podvodne građevine veća od maksimalne veličine radijusa plinskog mjehura.

Plinski mjehur djeluje na građevinu sa značajnim zakašnjenjem u odnosu na djelovanje izravnog udarnog vala. Plinski mjehur se širi i skuplja (pulsira) emitira udarne valove i pomiče se prema površini vode. Stoga ne postoji mogućnost djelovanja udarnog vala i plinskog mjehura u istoj točki, u horizontalnoj ravnini.

Shematski prikaz djelovanja podvodne eksplozije na podvodnu građevinu – pregradu, prikazana je na slici 4.7.



Slika 4.7 Podvodna eksplozija ispred podvodne građevine, djelovanje udarnog vala i plinskog mjehura na građevinu

Na slici 4.7 prikazano je djelovanje podvodne eksplozije na podvodnu građevinu. Prikazana je prva točka kontakta udarnog vala i građevine (maksimalni tlak), nakon udara u građevinu udarni val se reflektira. Zbog djelovanja sile uzgona i migriranja plinskog mjehura prema površini, naročito kad je plinski mjehur malen, točka prvog kontakta i maksimalnog tlaka je iznad točke naznačene na slici.

Nakon toga sa zakašnjenjem, na građevinu djeluje plinski mjehur kroz udarne valove i tlak vode koja se giba, pri svakom pulsiranju, ovisno o udaljenosti eksplozivnog punjenja i pregrade. Točka kontakta djelovanja udarnog tlaka i tlak vode koja se giba pri svakom narednom pulsiranju plinskog mjehura pomiče se prema površini vode tj. kruni pregrade pa djelovanja plinskog mjehura i naknadnih udarnih valova uvijek pomiče prema površini vode. Tako ukupno djelovanje u bilo kojoj kontaktnoj točki obalne građevine je značajno manje od točke djelovanja udarnog vala jer je maksimalni tlak od prvog pulsiranja 10 % do 20 % vrijednosti maksimalnog udarnog tlaka.

Djelovanje plinskog mjehura na obalne i hidrotehničke građevine uglavnom nema intenzitet djelovanja kao udarni val, ali njegovo naknadno višekratno djelovanje može dovesti do povećanja oštećenja ili kolapsa već oštećene konstrukcije. U ovom radu je, pri numeričkom modeliranju i simulaciji podvodne eksplozije, analizirano djelovanje plinskog mjehura i utvrđeno kako ga nije moguće simulirati u korištenom računalnom programu pa je zanemareno.

Rezultati istraživanja djelovanja bliske (engl. *near-field*) podvodne eksplozije na betonsku gravitacijsku branu pokazuju pojavu vlačnog loma uslijed savijanja. Odgovori brane uglavnom su pripisani udarnom valu, a učinci povezani s udarima plinskog mjehura (engl. *bubble puls*) nisu uočeni. Usporedba dobivenih numeričkih rezultata s eksperimentalnim rezultatima nije bila moguća zbog nedostatka eksperimentalnih rezultata [61].

Prema mišljenju autora ovog rada, može se zaključiti kako je uglavnom djelovanje udarnog vala od presudnog značaja za podvodne građevine, a djelovanje plinskog mjehura ima manji značaj, za razliku od djelovanja plinskog mjehura na brodove i podmornice. Toj činjenici doprinosi specifičan položaj cilja u odnosu na središte podvodne eksplozije. Podmornice i brodovi plove, a eksplozivni naboj se aktivira u trenutku kad se oni nalaze iznad eksplozivnog naboja - mine, a podvodne građevine su nepomične.

## 4.8 Matematičke formulacije i numerički model djelovanja eksplozije na hidrotehničke građevine (brane)

### 4.8.1 Matematičke formulacije i numerički model djelovanja eksplozije

Analiza djelovanja podvodne eksplozije na podvodnu građevinu zahtijeva pripremu numeričkog modela. Pri analizi djelovanja podvodne eksplozije na gravitacijsku armiranobetonsku branu, u ovom radu, pri numeričkom modeliranju, uzeta su u obzir ograničenja slobodnom površinom vode i dnom.

U literaturi [3], Cole je 1948. godine, istraživao jednostavni tip konstrukcije koja je cilj podvodne eksplozije i navodi istraživanje Goransona, koji je analizirao djelovanje eksplozivnog punjenja na čelične ploče raznih dimenzija.

U literaturi [59] je prikazano djelovanje podvodne eksplozije na branu. Podvodna eksplozija generira udarni val koji sferno propagira od središta eksplozije do uzvodnog lica brane, skoro kao ravni val ako je centar podvodne eksplozije dovoljno daleko od brane.

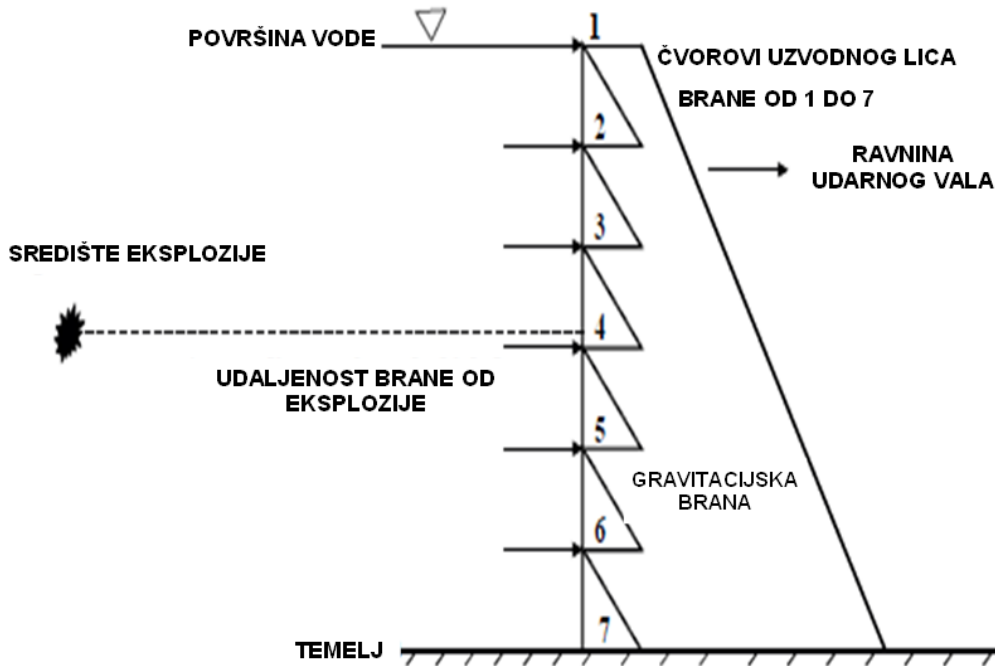
Promjena tlaka u vremenu računa se pomoću Cole-ovog empirijskog izraza, a predložen je novi algoritam analitičkog rješenja, koji ne zahtijeva vremensku integraciju. U usporedbi s algoritmom koji koristi vremensku integraciju, predloženi algoritam zahtijeva relativno manje računanja i izbjegava oscilacije visokih frekvencija.

Nadalje, opisan je proračun i analiza za dvije brane i to: za branu s vertikalnim uzvodnim licem i branu manje visine s nagnutim uzvodnim licem. Rezultati istraživanja pokazuju kako se predloženo analitičko rješenje može primijeniti na branu s vertikalnim uzvodnim licem i nagnute brane manje visine [59].

Wang i suradnici, na temelju numeričke studije, tvrde kako podvodna eksplozija može prouzročiti znatno veće štete na brani nego ista masa eksploziva pri eksploziji u zraku. Rezultati pokazuju kako podvodna eksplozija, koja postiže tlak do 4,0 MPa, uzvodno od krune brane, djeluje na gravitacijsku betonsku branu visoku 150 m i uzrokuje lom krune brane. Wang i suradnici su također numeričkim postupkom simulirali pojavu oštećenja gravitacijske brane Koyna uslijed djelovanja potresa uz primjenu elastoplastičnog modela za analizu nastanka pukotina i loma lučne brane. Kod rješavanja zadaće posebna pažnja je posvećena analizi udarnog vala podvodne eksplozije i odgovoru brane [59].

Istraživanje djelovanja eksplozije uključuje dinamičku analizu, koja se značajno razlikuje od istraživanja dinamičkog odgovora brane na seizmičko djelovanje. Prvo, djelovanje jakog udarnog vala od podvodne eksplozije je vrlo kratko, obično se mjeri u mikrosekundama, a trajanje potresa je mnogo duže. Drugo, tlak od udarnog vala podvodne eksplozije može se dogoditi izravno na uzvodnom licu brane, dok seizmički val dolazi iz temeljnog tla, a pomak tijela brane uzrokuje hidrodinamički tlak [59].

Algoritam analitičkog rješenja, koji ne koristi vremensku integraciju i izbjegava oscilacije visokih frekvencija koristi empirijski izraz [4.4], koji je negativna eksponencijalna funkcija, koja opisuje ovisnost tlaka o vremenu [59].



Slika 4.8 Uzvodno vertikalno lice gravitacijske brane izloženo snažnom djelovanju udarnog vala [62]

Na slici 4.8 prikazano je vertikalno uzvodno lice gravitacijske brane izložene jakom udarnom valu podvodne eksplozije.

Nakon prostorne diskretizacije gravitacijske brane konačnim elementima, jednačba gibanja u matičnom zapisu ima sljedeći oblik:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C_d] \{\dot{u}\} + [K_d] \{u\} = \{R_w\} p_d(t), \quad (4.3)$$

gdje je  $[M]$  matrica masa,  $[C_d]$  matrica prigušenija i  $[K_d]$  matrica krutosti,  $\{\ddot{u}\}$ ,  $\{\dot{u}\}$  i  $\{u\}$  su vektori ubrzanja, brzine i pomaka čvorova, odnosno  $\{R_w\}$  je vektorska funkcija raspodjele udarnog vala, a  $p_d(t)$  je tlak na prednju plohu brane. Tlak udarnog vala, koji je u funkciji vremena, u određenoj točki vode  $p_w(t)$  se naglo (odjednom) povećava do vrijednosti  $(P_w)_{max}$  nakon eksplozije u vremenu manjem od  $10^{-7}$  s, nakon čega slijedi eksponencijalno smanjenje tlaka prema Coleovom empirijskom izrazu:

$$P = P_m e^{-\theta t}, \quad (4.4)$$

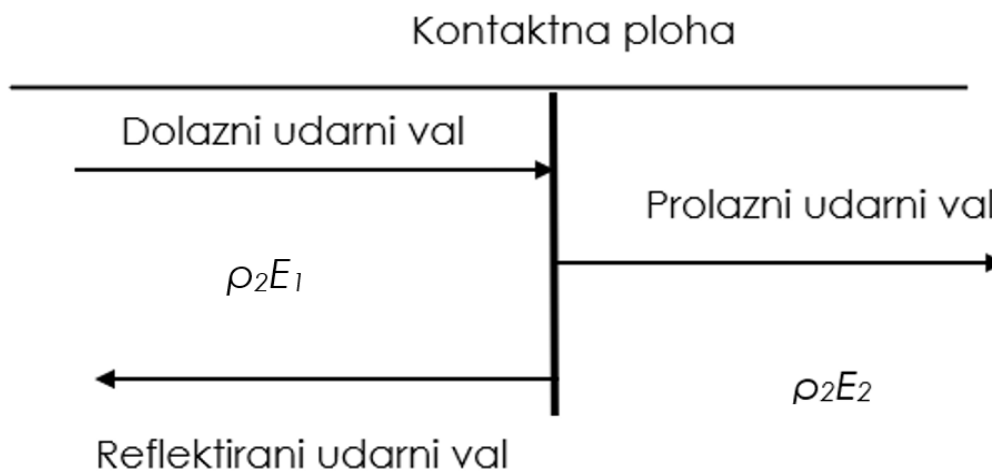
gdje je  $P_{max}$  maksimalni tlak na frontu udarnog vala,  $\theta$  je vremenski koeficijent, a  $t$  vrijeme putovanja udarnog vala od središta eksplozije do brane. Veza između  $P_{max}$  i  $\theta$  je:



$$P_m = K_1 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{A_1} \quad (MPa), \quad (4.5)$$

$$\theta = \frac{1}{K_2 W^{\frac{1}{3}}} \left( \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{A_2} \times 10^4 \quad (1/s), \quad (4.6)$$

gdje je  $R$  udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (u metrima),  $W$  je masa eksploziva (u kg) i koeficijenti  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $K_1$  i  $K_2$ , (vidjeti tablice 3.4 i 3.5). Treba istaći kako su razni autori u svojim radovima primjenjivali različite vrijednosti koeficijenata. Kad udarni val udari u uzvodno lice brane, dio energije vala se reflektira, a dio se prenosi u tijelo brane, vidjeti sliku 4.9.



Slika 4.9 Grafički prikaz prolaza i refleksije udarnog vala na uzvodnom vertikalnom licu gravitacijske brane [62]

Smith i Hetherington su riješili jednadžbe ravnoteže i kompatibilnosti na kontaktnoj plohi između dva različita materijala, gdje je  $E$  Youngovi moduli elastičnosti materijala i  $\rho$  gustoća materijala.

Izraz za određivanje kontaktnih naprezanja može se prikazati relacijom [62]:

$$\sigma_b = 2 \left( \frac{\sqrt{E_2 \rho_2}}{\sqrt{E_1 \rho_1} + \sqrt{E_2 \rho_2}} \right) \sigma_a = 2 \left( \frac{\rho_2 \sqrt{E_2}}{\rho_1 \sqrt{E_1} + \rho_2 \sqrt{E_2}} \right) \sigma_a, \quad (4.7)$$

gdje jednadžba (4.7) opisuje odnos između udarnog vala iz materijala **1** ( $\sigma_a$ ) i vala koji je prešao kroz graničnu plohu u materijal **2** ( $\sigma_b$ ).

Na slici 4.9 prikazana je granica materijala, dolazni, prolazni i reflektirani udarni val [62]. Za primjer djelovanja podvodne eksplozije na uzvodno lice gravitacijske betonske brane, materijal **2** je beton, modul elastičnosti je  $E_2 \approx 2,2 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>, (22 GPa) (engl.

Young's modulus), a gustoća  $\rho_2=2400 \text{ kg/m}^3$ , kako je navedeno u literaturi (62). Materijal **1** je voda, brzina vala u vodi  $c \approx 1400 \text{ m/s}$ , izraz za izračun brzine vala u vodi je:

$$c = \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}}. \quad (4.8)$$

Uvrštavanjem vrijednosti u jednadžbu (4.7), dobiva se odnos tlaka udarnog vala i tlaka koji se prenosi u tijelo betonske brane  $\sigma_b = 1,76 \sigma_a$ . Iz odnosa ovih tlakova vidljivo je kako, bez obzira na tlak koji nastaje podvodnom eksplozijom, tlak koji se prenosi na betonsku branu je skoro dvostruko veći od tlaka udarnog vala koji djeluje na uzvodno lice brane i to [62]:

$$(P_d)_{\max} = 2P_m \quad (4.9)$$

$$p_d(t) = 2 p_w(t). \quad (4.10)$$

Kako je  $p_d(t)$  negativna eksponencijalna funkcija, dobivaju se sljedeće relacije:

$$\begin{cases} \{u(t)\} = \{u\}e^{-\theta t}, \\ \{\dot{u}(t)\} = \theta\{u\}e^{-\theta t}, \\ \{\ddot{u}(t)\} = \theta^2\{u\}e^{-\theta t}, \end{cases} \quad (4.11)$$

gdje je  $\{u\}$  vektor bez vremenske varijable  $t$ . Uvrštavanjem jednadžbe (4.10) i (4.4) u jednadžbu (4.3) dobiva se:

$$(\theta^2[M] - \theta[C_d])\{u\} = \{R\}2P_{\max}. \quad (4.12)$$

Prema Rayleighovom prigušenju, matrica prigušenja je zadana izrazom:

$$[C_d] \propto \alpha_1 [M] + \alpha_2 [K_d] \quad (4.13)$$

gdje su  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  izraženi kao:

$$\alpha_1 = \frac{2\xi_1\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (4.14)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\xi_2}{\omega_1 + \omega_2}. \quad (4.15)$$

Gdje su  $\omega_1$  i  $\omega_2$  dominantne vlastite frekvencije konstrukcije. Vrijednosti  $\xi_1$  i  $\xi_2$  su karakteristike viskoznog prigušenja za vlastite frekvencije  $\omega_1$  i  $\omega_2$ ; uzima se  $\xi_1 = \xi_2 = 0,05$ .

Zamjenom jednadžbe (4.13) u jednadžbu (4.12) dobiva se [62]:

$$\{(\theta^2 - \alpha_1\theta)[M] + (1 - \theta\alpha_2)[K_d]\}\{u\} = \{R\}2P_m. \quad (4.16)$$

Tlak udarnog vala  $p_d(t)$  djeluje samo na uzvodne čvorove brane,  $R$  je  $N$  dimenzioniran vektor i može se podijeliti u dva pod-vektora, kao što je prikazano:

$$\begin{cases} \{R_1\}_i = \{1\} \\ \{R_2\}_{N-i} = \{0\}, \end{cases} \quad (4.17)$$

gdje indeksi  $i$  i  $N - i$  označavaju dimenziju vektora ili matrice.

$$[W] = (\theta^2 - \alpha_1 \theta)[M] + (1 - \theta \alpha_2)[K_d]. \quad (4.18)$$

Jednadžba (4.16) može biti preformulirana pa se može prikazati u obliku:

$$[W\{u\}] = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{Bmatrix} 2P_m \quad (4.19)$$

$[W]$  i  $[u]$  upućuju na  $[R]$  oblik i ispisuju se u obliku bloka kako slijedi:

$$[W] = \begin{bmatrix} (W_{11})_{ixi} & (W_{12})_{ix(N-i)} \\ (W_{12})_{(N-i)xi} & (W_{22})_{(N-i)x(N-i)} \end{bmatrix}, \quad (4.20)$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} (u_1)_i \\ (u_2)_{N-1} \end{Bmatrix}.$$

Jednadžba (4.19) može se ponovno napisati na sljedeći način:

$$\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} 2P_m. \quad (4.21)$$

Sređivanjem gornjih jednadžbi dobiva se:

$$\begin{aligned} [W_{11}]_{ixi} \{u\} + [W_{12}]_{ix(N-i)} \{u\}_i &= \{1\}_i 2P_m \quad (4.22) \\ [W_{21}]_{(N-i)xi} \{u\}_{N-i} + [W_{22}]_{(N-i)x(N-i)} \{u\}_{N-i} &= \{0\}_{N-i}. \end{aligned}$$

Prema drugoj jednadžbi, u jednadžbama (4.22), jednadžba (4.23) može se prikazati u obliku:

$$\{u_2\} = -[W_2]^{-1}[W_1]\{u_1\}. \quad (4.23)$$

Zamjenom jednadžbe (4.23) u prvu jednadžbu jednadžbi (4.22),

$$[W_{11}] \{u_1\} - [W_{12}][W_{22}]^{-1}[W_{21}] = \{1\} 2P_m. \quad (4.24)$$

Kombiniranjem gornje jednadžbe može se dobiti izraz:

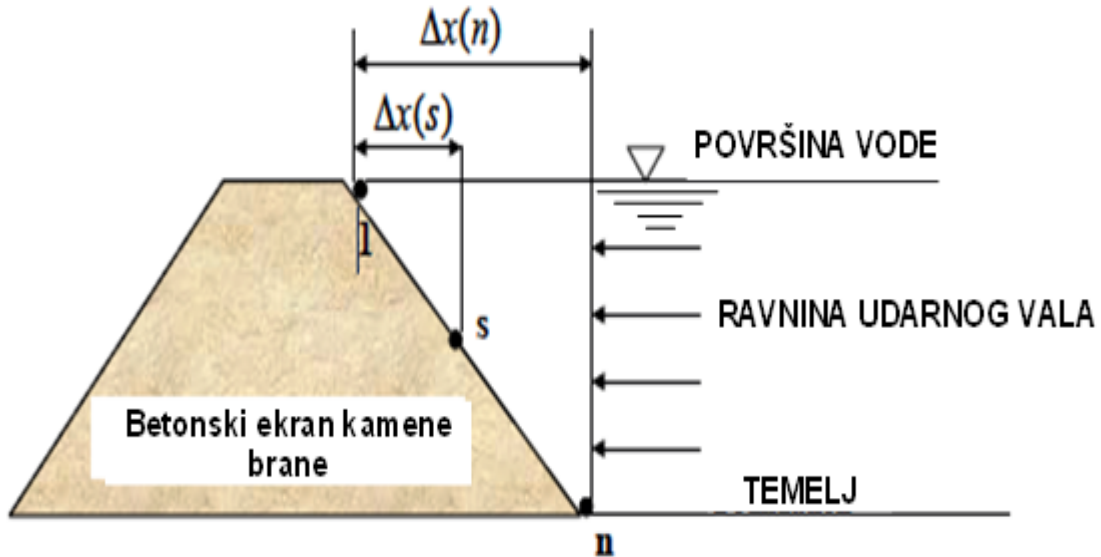
$$([W_{11}]_{ixi} - [W_{12}]_{ix(N-1)} [W_{22}]_{(N-i)x(N-i)}^{-1} [W_{21}]_{(N-1)xi}) \{u_1\}_i = \{1\}_i 2P_m. \quad (4.25)$$

Rješavanje algebarske jednadžbe (4.25) dobivaju se vrijednosti  $\{u_1\}_i$ , jer nije velik broj čvorova na uzvodnom licu brane, sve dok manje dimenzionalna algebarska jednadžba može dati analitičko rješenje  $\{u_1\}_i$ . Dalje, jednakost (4.23) se koristi za dobivanje  $\{u_2\}_{N-i}$ .

Jednadžba (4.11) može se koristiti za izračun promjene pomaka, brzina i ubrzanja u vremenu. Rješavanje  $[W_{22}]^{-1}$  predstavlja najveći dio računalnog procesa, što je vrlo malo opterećenje računala u odnosu na metodu vremenske integracije.

#### 4.8.2 Numerički model djelovanja eksplozije na nasute brane

Nadalje, analizirana je nasuta brana s nagnutim uzvodnim ekranom od betonskih ploča, udarni val propagira do uzvodnog lica brane, kao što je prikazano na slici 4.10, [62].



Slika 4.10 Presjek gravitacijske nasute brane s nagnutim ekranom (uzvodno lice) od betonskih ploča izloženo djelovanju snažnog udarnog vala [59]

Kada udarni val dosegne čvor  $n$ , drugi čvorovi na brani nisu izloženi udarnom valu.

Kad udarni val dosegne čvor 1, u trenutku ( $t = 0$ ), tada je tlak u čvoru 1  $p_{(1)} = 2P_{max1}e^{-\theta t}$ .

Zamjenom vrijednosti (4.5) i (4.6) u  $p_{(1)} = 2P_{max1}e^{-\theta t}$  dobiva se:

$$p(1) = 2k_1 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{k_2} e^{-\left( \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{k_4} (K_3 \sqrt[3]{W})^{-1} x t} \quad (4.26)$$

Vrijednost tlaka u čvoru  $S$  može se izraziti relacijom:

$$p(S) = 2k_1 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R + \Delta x(s)} \right)^{k_2} e^{-\left( \frac{R + \Delta x(s)}{\sqrt[3]{W}} \right)^{k_4} (K_3 \sqrt[3]{W})^{-1} x \left( t + \frac{\Delta x(s)}{c} \right)} \quad (4.27)$$

gdje je  $c$  brzina zvuka u vodi,  $\Delta x(s)$  je horizontalna udaljenost između čvora  $S$  i čvora 1,  $\frac{\Delta x(s)}{c}$  je vremenska razlika između trenutka dolaska udarnog vala u čvor  $S$  i čvor 1.

Kada je uzvodno lice brane nagnuto, predloženo analitičko rješenje vremena se ne može primijeniti već se mora koristiti vremenska integracija.

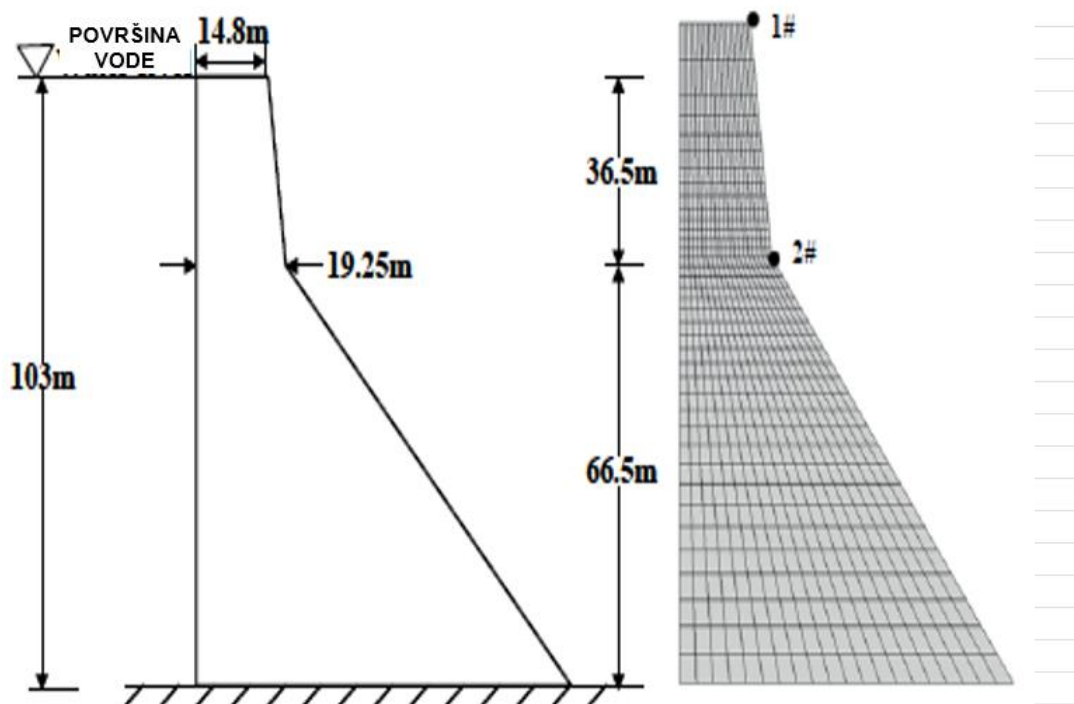
Međutim, uz pretpostavke: brana nije visoka i vrijednost  $c$  je velika, pa se početno vrijeme može zanemariti ( $t = 0$ ) i vrijednosti se dobivaju analitički, a funkcija distribucije  $\{R\}$  ima oblik [62]:

Nije  $\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$ , nego se može napisati kao  $e^{\begin{Bmatrix} 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\Delta x(i)}{c} \\ - \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}}$ .

#### 4.8.3 Numerički model djelovanja eksplozije na betonsku branu

Nadalje je prikazan konkretan numerički primjer, analizirana je brana Koyna kao primjer gravitacijske brane s vertikalnim uzvodnim licem, koja se nalazi na jugozapadu Indije u pokrajini Karnataka. Presjek monolitne brane Koyna, izvan preljevnog praga, prikazan je na slici 4.11.

Tijelo monolitne brane visoko je 103 metra i široko 71 m, u podnožju. Pretpostavlja se da je uzvodno lice brane ravno i vertikalno, što je mala razlika od stvarne geometrije. Dubina akumulacije, u ovom istraživanju, je 103 m. Pri analizi se koriste rezultati istraživanja drugih istraživača, usvojena je ravninska dvodimenzionalna analiza uz uvjete ravninskog stanja naprezanja. Prostorna diskretna mreža i promatrane točke: 1 # i 2 # prikazane su na slici 4.11.

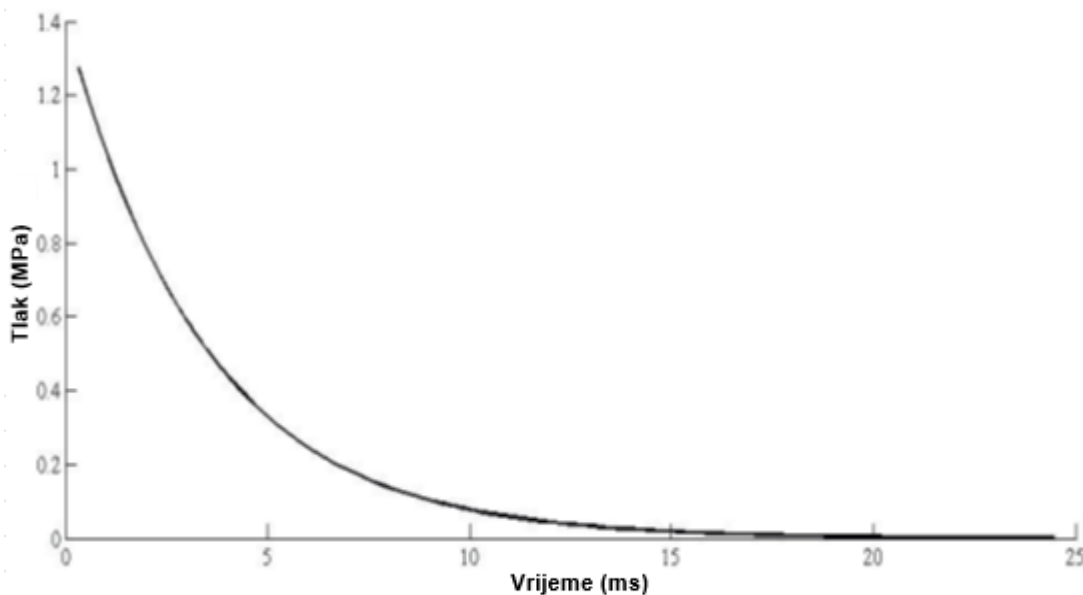


Slika 4.11 Presjek betonske brane s prikazom dimenzija i mreže konačnih elemenata [59]

Mehaničko ponašanje betona modelirano je linearnim elastičnim modelom. Prema dostupnim informacijama iz projekta, u analizi su korištene sljedeće mehaničke karakteristike materijala: gustoća betona =  $2643 \text{ kg/m}^3$ , modul elastičnosti  $E = 31027 \text{ MPa}$  i Poissonov koeficijent =  $0,15$ . Za dinamičku analizu usvojen je koeficijent prigušenja betonske brane  $5 \%$ , a prva vlastita frekvencija  $\omega_1 = 18,861 \text{ rad/s}$ , a druga  $\omega_2 = 49,973 \text{ rad/s}$ . Korištene su jednačbe (4.14) i (4.15) za izračun  $a_1 = 0,8216$  i  $a_2 = -8,7166 \times 10^{-4}$ .

Prije djelovanja eksplozije, brana je opterećena statičkim opterećenjem, uključujući vlastitu težinu i hidrostatički tlak, što se pretpostavlja kao početno stanje. Za analizu je upotrijebljen eksplozivni naboj  $10000 \text{ kg TNT}$ . Usvojene su vrijednosti koeficijenata  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $K_1$  i  $K_2$  za podvodnu eksploziju TNT-a,  $A_1 = 1,180$ ,  $A_2 = -0,185$ ,  $K_1 = 52,12$  i  $K_2 = 0,0895$ . Udaljenost od središta eksplozije do uzvodnog lica brane je  $R = 500 \text{ m}$ .

Maksimalni tlak udarnog vala, prema Coleovom empirijskom izrazu, je  $P_m = 12751 \text{ MPa}$ , vrijeme trajanja je  $24,1489$  milisekundi, dijagram je prikazan na slici 4.12 [62].



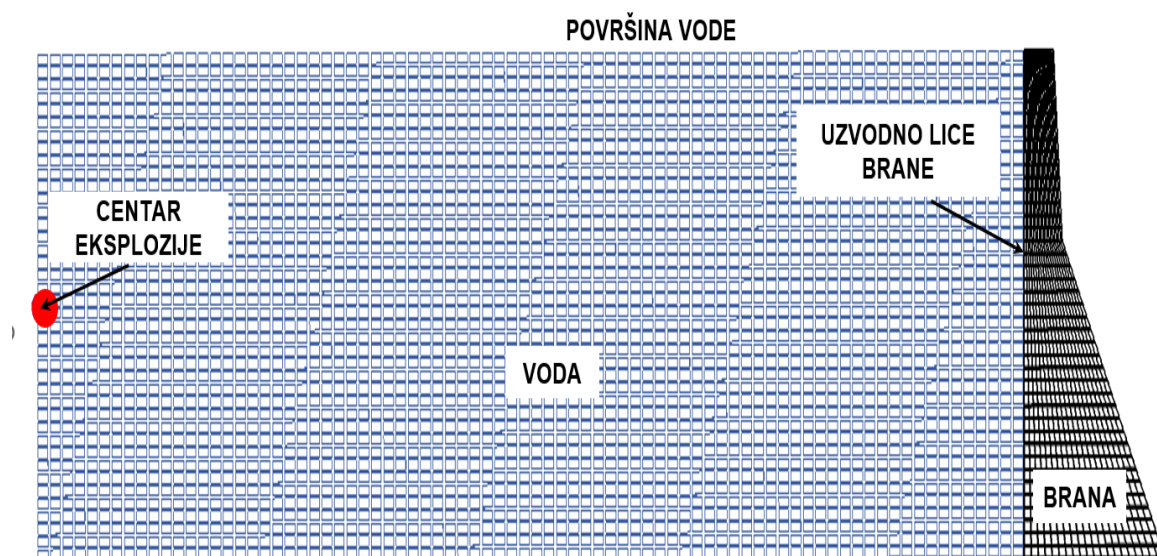
Slika 4.12 Grafički prikaz promjene tlaka udarnog vala u vremenu [59]

Rezultati dobiveni pomoću vremenski ovisnog algoritma su: maksimalni tlak udarnog vala je  $P_m = 12751 \text{ MPa}$ ; (jednačba 4.5), maksimalno udarno opterećenje koje djeluje na uzvodno lice brane je  $(Pd)_m = 25502 \text{ MPa}$ , horizontalni pomak, po osi x: točke 1 #  $0,243063 \text{ m}$  i točke 2 #  $0,0886145 \text{ m}$ . Pomoću prve jednačbe 4.11 može se dobiti promjena pomaka u funkciji vremena [62].

Jin i Ding su pokazali kako se računalni program Abaqus/Explicit može koristiti za predviđanje odziva konstrukcije, koja je izložena djelovanju udarnog vala, uslijed djelovanja podvodne eksplozije (UNDEX).

Kada je ponašanje tekućine linearno (tj. nema kavitacije), ukupni tlak unutar fluida sastoji se od izravnog udarnog vala i komponente raspršenog vala. Tekućina ispred brane u akumulaciji je diskretizirana s tetraedarskim elementima. Gustoća vode je  $10 \text{ kN/m}^3$ , modul volumena je  $2140 \text{ MPa}$  i brzina zvuka u vodi je  $1400 \text{ m/s}$ . Interakcija udarnog vala diskretizirane tekućine i konstrukcije brane, pomaci u zajedničkim točkama na uzvodnom licu brane (namočeno lice brane), izvršena je pomoću opcije ograničenja u programu Abaqus.

Na slici 4.13 prikazan je dvodimenzionalni model konačnih elemenata brane [62].

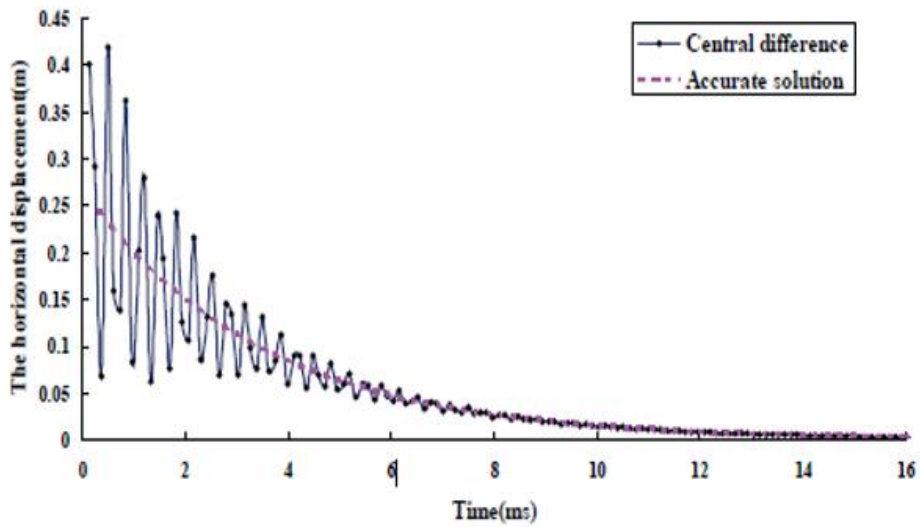


Slika 4.13 Mreža konačnih elemenata brane i vode te položaj centara eksplozije [59]

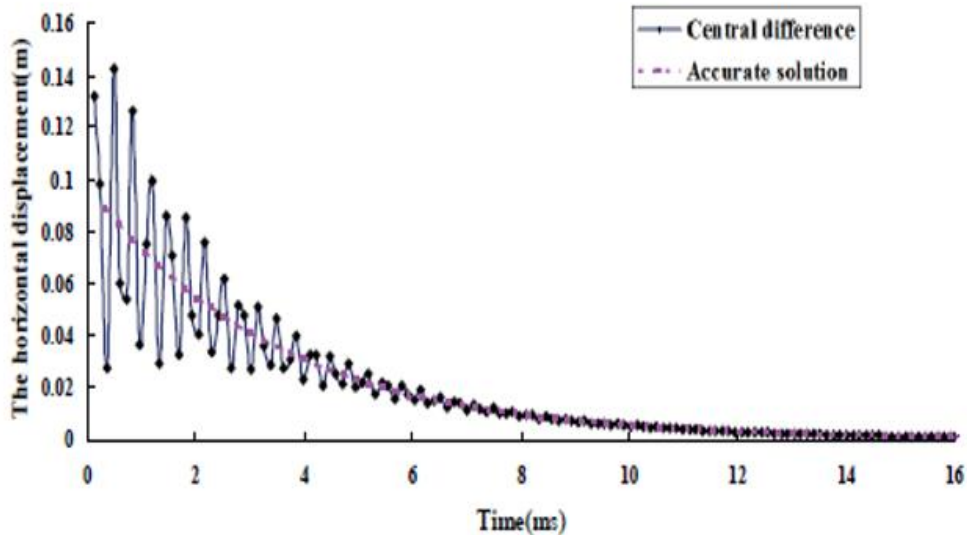
Na slici 4.13 prikazana je mreža konačnih elemenata presjeka brane, središte eksplozije i diskretizirani promatrani volumen vodene mase.

Rezultati horizontalnog pomaka u čvorovima brane 1 i 2 u vremenu, dobiveni usporedno pomoću dvije različite metode, prikazani su na slici 4.14 [62].

a) čvor 1



b) čvor 2



Slika 4.14 Vremenska promjena horizontalnog pomak čvora 1 i čvora 2 [59]

Na slici 4.14 prikazan je dijagram vremenske promjene horizontalnog pomaka promatranih čvorova 1 i 2 na uzvodnom licu brane, koji su izravno izloženi udarnom valu podvodne eksplozije. Rješenje horizontalnog pomaka čvorova dobiveno je metodom konačnih diferencija imaju simetrična odstupanje u odnosu na rješenja dobivena primjenom vremenski ovisnog algoritma. Što znači da bi se iz rješenja dobivenih jednostavnim postupkom, bez vremenske iteracije, moglo u određenom trenutku dobiti korigirano rješenje kao aritmetička sredina dobivenih susjednih rezultata.



Jednadžbe gibanja tijela brane, u ovoj analizi, su integrirane pomoću eksplicitne sheme središnjih razlika.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u}_{i+2}^N = \dot{u}_{i-\frac{1}{2}}^N + \frac{\Delta t_{i+1} + \Delta t_i}{2} \ddot{u}_i^N \\ u_{i+1}^N = u_i^N + \Delta t_{i+1} \dot{u}_{i+\frac{1}{2}}^N \end{array} \right\}, \quad (4.28)$$

gdje je  $N$  broj stupnjeva slobode  $\ddot{u}$ ,  $\dot{u}$  i  $u$  su ubrzanje, brzina i pomak. Indeks  $i$  se odnosi na broj inkrementa u eksplicitnom dinamičkom koraku  $i - \frac{1}{2}$ ,  $i + \frac{1}{2}$ , a odnosi se na srednju vrijednost između inkremenata. Operator centralne razlike je eksplicitan budući da se kinematičko stanje može unaprijediti korištenjem poznatih vrijednosti od  $\dot{u}_{i-\frac{1}{2}}^N$  i  $\dot{u}_i^N$  iz prethodnog koraka.

Ključ računske učinkovitosti eksplicitnog postupka je korištenje dijagonalne matrice masa elemenata jer su ubrzanja na početku inkrementa. Eksplicitno pravilo vremenske integracije temelji se na velikom broju malih vremenskih koraka.

Operator središnjih razlika je uvjetno stabilan i granica operatora je dana u smislu najveće svojstvene vrijednosti u sustavu. U računalnom programu Abaqus/Explicit, mala vrijednost prigušenja uvodi se za kontrolu visokofrekventnih oscilacija. Stabilni vremenski korak za oscilacije s prigušenjem, određuje se pomoću relacije [62]:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} (\sqrt{1 + \xi_{max}} - \xi_{max}), \quad (4.29)$$

gdje je  $\xi_{max}$  dio kritičnog prigušenja, kod najviši tonova spektra (engl. *highest mode*). Suprotno uobičajenoj inženjerskoj intuiciji, uvođenje prigušenja u rješenje smanjuje stabilnost vremenskog koraka. Shema temeljena na vremenskom inkrementu u programu Abaqusu/Explicitu je potpuno automatizirana i ne zahtijeva korisničku intervenciju. Maksimalna frekvencija modela povezana je s mnogim čimbenicima. Program Abaqus/Explicit inicijalno koristi procjenu po svakom elementu.

Korak se nastavlja kad algoritam odredi prihvatljivost točnosti globalne procjene, a granica stabilnosti se određuje iz globalne procjene. Dakle, fenomen visokofrekventnih oscilacija je teško izbjeći u numeričkoj analizi visoke brane izložene jakim udarnim valovima uzrokovanim podvodnom eksplozijom, kod eksplicitne integracije metodom središnjih razlika. Visokofrekventna oscilacija može uzrokovati ozbiljno izobličenje. Osim toga, dobro poznata Wilsonova  $\theta$  metoda integracije je bezuvjetno stabilne konvergencije, ali smanjuje točnost izračuna [62].

Daljnja istraživanja trebaju omogućiti razvoj kvalitetnog modela koji će omogućiti pouzdan, ekonomičan i jednostavan proračun stanja naprezanja i deformacija u podvodnim građevinama uz minimalna odstupanja. Razvoj računalne tehnike, numeričkih modela i računalnih programa treba omogućiti rješavanje zadaće podvodne eksplozije kao jedinstvene pojave (udarni val, plinski mjehur, refleksija udarnog vala od slobodne vodene površine i dna) te interakcije plinskog mjehura s izravnim i reflektiranim udarnim valovima s obalnim i hidrotehničkim građevinama).

#### 4.9 Procjena rizika djelovanja eksplozije na podvodne građevine

Interakcija podvodne eksplozije (udarni val i plinski mjehur) i podvodne građevine je vrlo kompleksna fizikalna pojava, a njeno matematičko (numeričko) modeliranje vrlo složeno. Prikazani primjeri iz literature pokazuju dobro slaganje numeričkih i eksperimentalnih rezultata, ali za konkretne ograničene laboratorijske primjere.

Upravljanje rizikom od mogućih djelovanja podvodne eksplozije je vrlo značajno za zaštitu građevina, koje su potencijalni ciljevi terorističkih napada. Intenzitet udarnog opterećenja ovisi o količini i vrsti eksploziva te udaljenosti od središta eksplozije do cilja (građevine) i sl. Količina eksploziva ovisi o mogućem načinu transporta eksploziva do blizine mjesta eksplozije, na kopnu i daljnjeg transporta do mjesta eksplozije na vodi i pod vodu. Eksploziv se može transportirati pomoću vozila, broda, podmornice, drona, splavi, i sl., koje mogu prići mjestu eksplozije. U svakom slučaju količina eksploziva ovisi o transportnom sredstvu u slučajevima kad eksploziv do mjesta eksplozije, prenosi ljudi (ronioci) količine eksploziva su manje.

Načini transporta eksploziva do mjesta eksplozije su određeni mogućnostima prilaza prijevoznog sredstva (plovila, vozila, čovjeka, drona, broda i sl.) do potencijalne mete. Temeljem analize raspoloživih plovnih, kolnih i pješačkih prilaza, mogu se odrediti prilazni putevi i mjesta do kojih se može dopremiti i postaviti određena količina eksploziva. Također se mogu odrediti i rizici transporta eksploziva do mjesta potencijalne eksplozije. Na taj način je određena i udaljenost od mjesta eksplozije do cilja tj. podvodne građevine.

## 4.10 Zaštita podvodne građevine od djelovanja eksplozije

Svakako se postavlja pitanje zaštite i otpornosti podvodnih građevina od djelovanja podvodne eksplozije. Određene mjere zaštite se mogu predvidjeti pri prostornom planiranju, projektiranju i građenju kao i planiranjem mjera tehničke zaštite i opremanjem građevina potrebnim sustavima i opremom za tehničku zaštitu.

Pored spomenutog je potrebno također sagledavati i druge aktivne mjere zaštite u smislu izvedbe zaštitnih slojeva ili barijera od materijala koji prihvaćaju manje vrijednosti udarnih valova i njihove apsorpcije, te zračnih mjehurića, slojeva i zavjesa.

Pri prostornom planiranju, kod nekih podvodnih građevina koje su potencijalna meta napada, je moguće odabirom povoljne lokacije i korištenjem prirodnih terenskih uvjeta osigurati određenu razinu zaštite kao i otežani pristup (pješački, kolni i zračni). Također se može osigurati lakša obrana građevine te nadzor i kontrola šireg prostora, u slučaju napada.

Tijekom projektiranja podvodne građevine od posebnog značaja, koje su potencijalne mete napada, svakako treba posebnu pažnju posvetiti projektiranju kolnih i pješačkih komunikacija, do građevine ili vodenog prostora gdje se očekuje potencijalni napad podvodnom eksplozijom. Osmišljavanjem i projektiranjem barijera i komunikacija te njihovih elemenata može se značajno otežati pristup potencijalnom mjestu podvodne eksplozije i smanjiti količina eksploziva, koju je moguće transportirati.

Svakako je potrebno, pri projektiranju prometnih rješenja, cesta, ulica, šetnica, plovnih kanala, podvodnih prolaza za ronioce i ostalih komunikacija kao i uređenja okoliša, zelenih površina, ograda, pregrada, rešetki, stubišta, denivelacija i sl. voditi računa o sprječavanju ili smanjenju mogućnosti transporta eksploziva do podvodne građevine.

Analizom izmjera i drugih tehničkih elemenata, kapaciteta i zaštite pristupnih komunikacija građevini ili vodenom prostoru iz kojeg se očekuje napad može se odrediti način transporta eksploziva odnosno količina eksploziva, a zatim i položaj podvodne eksplozije.

Odabirom najnepovoljnije kombinacije mase eksploziva i položaja naboja može se dobiti mjerodavno opterećenje građevine izložene djelovanju podvodne eksplozije. Povoljnim odabirom spomenutih elemenata može se postići odvratanje od eventualnih napada zbog potrebe angažiranja većih snaga uz velik rizik što dovodi do neisplativosti cilja za napadača, a potencijalni napad može imati značajne učinke. Ove mjere svrstavaju se u mjere pasivne obrane i mogu biti vrlo učinkovite i provedive uz manja ulaganja tijekom gradnje, ali zahtijevaju određena znanja.

Svakako također treba dodati, pored ostalih elemenata i vizualni nadzor potencijalnih točaka i komunikacija iz prostora građevine gdje se operativno kontinuirano radi i češće boravi. Spomenute mjere ne uzimaju u obzir mjere i sustave tehničke i fizičke zaštite, koje dodatno mogu otkriti eventualne transporte eksploziva. Prilazne komunikacije građevini projektom određuju projektanti građevina i uređenja okoliša te bi svakako trebali voditi računa o sigurnosti podvodnih građevina, a za definiranje interesa obrane koristiti mišljenja stručnjaka iz područja obrane i nacionalne sigurnosti.

Ovdje su navedene neke mjere za zaštitu podvodne građevine od terorističkih i ratnih djelovanja. Međutim kod ovakvih kapitalnih podvodnih građevina od posebnog značaja svakako treba sagledati i mogućnost jednostavnog oštećenja i onesposobljavanja u cilju presijecanja linija komunikacija protivnika za njegovo zaustavljanje ili usporavanje napredovanja u napadu te onemogućavanje korištenja zauzetih resursa. Ovo se može postići poduzimanjem određenih mjera tijekom projektiranja i građenja građevina, kao što su određivanje mjesta za oštećenje građevine i izvedba određenih niša i ležišta eksploziva za planirano oštećenje i onesposobljavanje odnosno rušenje građevine.

Također pored spomenutog, treba sagledati mogućnost brze sanacije oštećenja, popravak građevine i stavljanje u operativni rad, nakon završetka napadnih djelovanja. Tako se npr. tijekom građenja mogu izraditi određeni pričuvni elementi konstrukcije, koji se planiraju uništiti, tijekom borbenih operacija, u cilju onesposobljavanja građevine, kako bi spriječio prijelaz protivničkih snaga i njihovo napadno napredovanje. Nakon završetka ratne opasnosti, planski pripremljeni pričuvni elementi, omogućavaju brz popravak i stavljanje građevine u operativni rad.

Ukupno oštećenje građevine podvodnom eksplozijom može se podijeliti na dva dijela: direktno oštećenje (direktni učinak podvodne eksplozije) i indirektno oštećenje (posljedični učinak). Učinci direktnog eksplozivnog udara uzrokovani su intenzivnim tlakovima vodene mase uslijed djelovanja podvodne eksplozije, a to su lokalni lomovi u podvodnoj konstrukciji i rušenje konstrukcije.

Posljedice indirektnih udara mogu prouzročiti daljnju nestabilnost i dodatna opterećenja na neoštećene dijelove preraspodjelom opterećenja vlastite težine, hidrodinamičkim tlakovima, udarnim opterećenjem uslijed urušavanja, širenjem elastičnih valova kroz tekućinu i konstrukciju, što dovodi do djelomičnog ili potpunog urušavanja podvodne konstrukcije [38].

Udarni valovi koji nastaju pri podvodnom miniranju su značajno veći od onih koji nastaju pri površinskom miniranju. Udarni valovi eksplozije mogu izazvati štetne posljedice ne samo na građevinama, branama, otvorima za vodu, već i na brodovima i ljudima u vodi. Tlak tih valova znatno je veći ako eksploziv detonira slobodno u vodi, nego ako se nalazi u minskim bušotinama.

Nadalje će biti, ukratko, opisan pojam minske bušotine, kod nekih minerskih radova širokog iskopa u stijeni za potrebe građenja. Iskop u stijenskoj masi izvodi se korištenjem eksploziva, koji se postavlja u izbušene bušotine, koje su obično promjera oko 32 mm ili oko 64 mm, što ovisi o vrsti pneumatskog alata ili stroja za bušenje.

Nakon bušenja bušotine se otprašuju, a u bušotine se postavlja eksploziv i sredstva za iniciranje eksploziva, koja imaju sposobnost dovesti do detonacije, prema projektu miniranja. Nakon punjenja minske bušotine, gornji dio minske bušotine ispunjava se inertnim materijalom, koji se nalazi na licu mjesta ili se mora dovesti. Stupanj iskorištenja eksplozivnog naboja u minskoj bušotini ovisi o kvaliteti čepa [28].

Dubina, međusobni razmak, razmak redova, nagib, visina podbušenja i drugi elementi bušotina, određuju se proračunom miniranja, a ovise o čvrstoći i drugim karakteristikama stijenske mase, zadanoj granulaciji izminiranog materijala i dr.

Minske konturne bušotine koriste se za konturno ili „prespliting“ miniranje, koje je u funkciji odvajanja stijenske mase koja se planira iskopati od ostatka stijene, koja mora ostati kompaktna bez oštećenja i zadane geometrije jer se na nju oslanja građevina i sl. Razmak konturnih minskih bušotina određuje se proračunom. Prema nekim praktičnim iskustvima, za određene mehaničke karakteristike stijenske mase, vrstu eksploziva i dr. može biti oko 50 cm, a pune se s oko 0,11 kg eksploziva po m<sup>1</sup> bušotine.

Bušotine, koje se koriste za cijepanje, razbijanje i drobljenje stijenske mase, koje se obično zovu bušotine „odvale“, su u funkciji iskopa stijenske mase za građenje. Prema nekim praktičnim iskustvima, za određene mehaničke karakteristike stijenske mase, vrstu eksploziva, granulaciju izminiranog materijala i dr. obično je međusobni razmak i razmak redova bušotina oko 1,5 m, a količina eksploziva je oko 0,36 kg/m<sup>3</sup> zdrave stijenske mase.

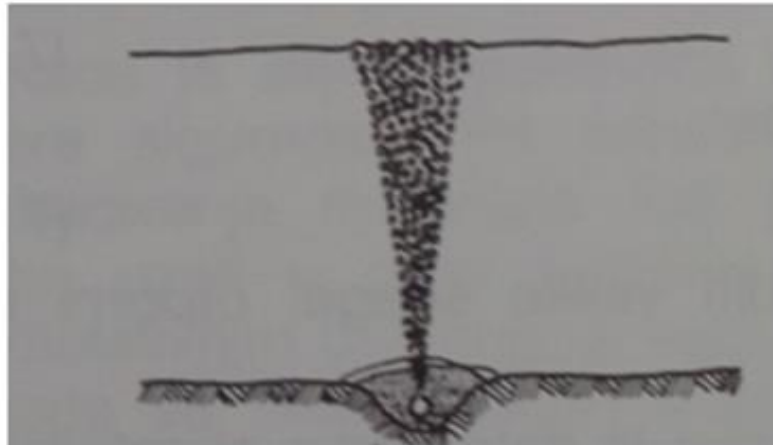
Koliko je miniranje kompleksno ukazuje i sljedeća činjenica, kako kod lošijih i nekompaktnih materijala (šupljikav lapor (tupina)) i sl.) količina eksploziva od oko 2,5 kg/m<sup>3</sup> stijenske mase, daje nedovoljne učinke.

Postoje i druge vrste minskih bušotina pri iskopu tunela (zalomne mine), vertikalnog i kosog okna, kanala, rušenja građevina i dugih vrsta minerskih radova te specijalnih miniranja.

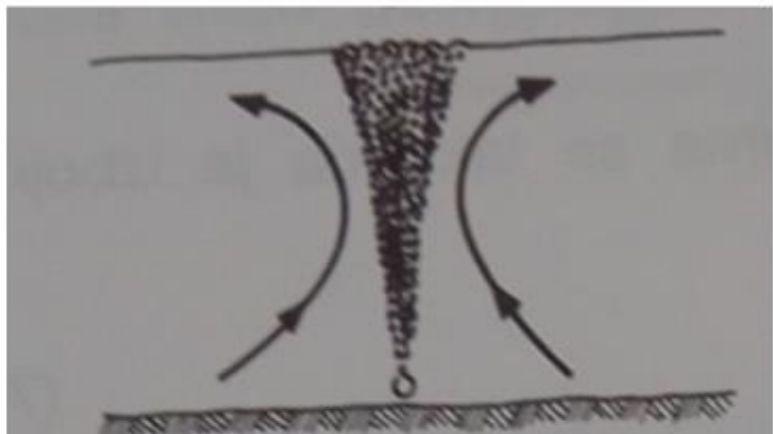
Zaštita podvodnih građevina od podvodnih miniranja postiže se zavjesama od zračnih mjehurića. Kroz perforirane cijevi, postavljene na dno, ispušta se zrak pod tlakom, na perforacijama duž cijevi pa kroz perforacije na površinu izlaze mjehurići, koji formiraju zavjesu, što je prikazano na slici 4.15.

Kad udarni val eksplozije stigne do zavjese jedan njegov dio apsorbiraju mjehurići zraka. Oni se komprimiraju u djeliću milisekunde te emitiraju u svim smjerovima valove nižih vrijednosti. Dio vala koji prođe između mjehurića poprima reduciranu vrijednost i brže nestaje od neometanog (slika 4.15 b).

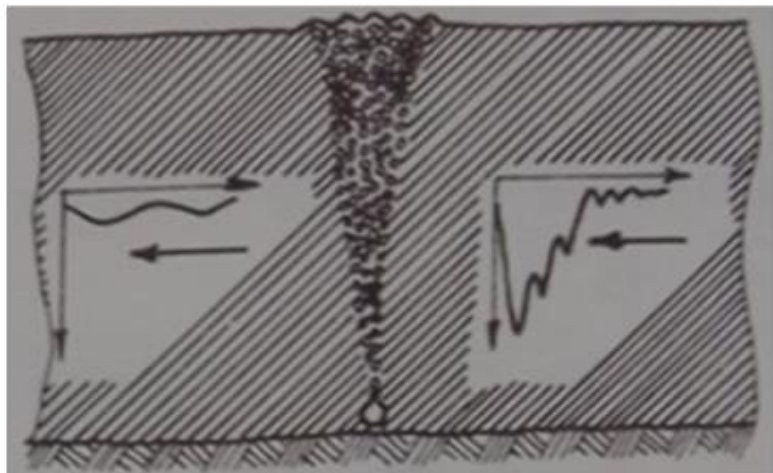
Zavjesa od mjehurića zraka reducira najviši tlak vala, ali ne pogađa bitno sam udar vala, vidjeti sliku 4.15 [28].



a) Izlazak mjehurića zraka kroz perforaciju na cijevi ukopanoj u dno



b) Izlazak mjehurića zraka kroz perforaciju na cijevi položenoj na dno



c) Redukcija tlaka udarnog vala na zavjesi od mjehurićima zraka

Slika 4.15 Zaštita podvodne građevine od djelovanja podvodnog miniranja sa zavjesom od mjehurića zraka [28]

## 5 OSNOVE MODELIRANJA PODVODNE EKSPLOZIJE

### 5.1 Općenito

Rješavanje matematičkih diferencijalnih jednadžbi koje opisuju fizikalnu pojavu podvodne eksplozije je vrlo složeno pa se rješenja traže raznim numeričkim približnim postupcima, što je dijelom omogućeno razvojem matematičkih i numeričkih formulacija te računalne tehnike i raznih programskih aplikacija, koje se stalno razvijaju i usavršavaju. Njihova primjena omogućava rješavanje inženjerskih zadataka te istraživanje vrlo složenih i kompleksnih fizikalnih pojava koje nastaju pri djelovanju podvodne eksplozije.

Svjedoci smo razvoja i primjene vrlo velikog broja različitih numeričkih metoda i algoritama u numeričkom modeliranju inženjerskih zadataka. Već sama činjenica kako se za zadatke istog ili srodnog tipa primjenjuju različite metode, govori kako ne postoji sveobuhvatna i najbolja metoda [63].

Izborom numeričke metode i rješavanjem zadatke numeričkim postupkom govorimo o približavanju odnosno aproksimaciji rješenja realne inženjerske zadatke s određenom točnošću, koje može zadovoljiti postavljene zahtjeve odstupanja od već ranije poznatih rezultata eksperimentalnih istraživanja.

Ovakva istraživanja numeričkim postupcima vrlo složenih i vremenski vrlo kratkih pojava mogu dijelom zamijeniti vrlo skupa eksperimentalna istraživanja, koja zahtijevaju složene pripreme, skupu tehniku i opremu i angažiranje specijaliziranog osoblja kao i određene moguće nepredviđene potencijalne povrede ljudi i materijalne štete.

Numeričko rješavanje mnogih matematičkih zadataka, osobito zadataka raznovrsnih tehničkih primjena, upotrebljavaju razne iterativne metode.



Naročito je važna primjena iteracije za rješavanje nelinearnih jednadžbi. Algoritam se definira kao proces koji počinje od odabranog inicijalnog rješenja i formira niz sve boljih aproksimacija točnog rješenja. Teorijski gledano postupak je beskonačan, a u realizaciji se prekida nakon konačnog broja koraka iteracije kad je po nekim kriterijima već dostignuta prihvatljiva točnost [64].

## 5.2 Matematička formulacija podvodne eksplozije

Fizikalni zakoni koji opisuju ponašanje fluida mogu se prikazati pomoću tri hidrodinamičke jednadžbe, koje opisuju gibanje fluida i mogu se koristiti pri opisu podvodne eksplozije. Sve pojave pri gibanju tekućine tijekom podvodne eksplozije opisane su s tim jednadžbama.

Prva jednadžba predstavlja održanje mase, što znači kako se masa u promatranom volumenu ne može povećati ili smanjiti u vremenu, osim u slučaju promjene gustoće unutar promatranog volumena,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0, \quad (5.1)$$

gdje je  $\rho$  gustoća,  $t$  je vrijeme i  $V$  je vektor brzine.

Druga jednadžba predstavlja održanje količine gibanja i temelji se na drugom Newtonovom zakonu. Ova jednadžba opisuje razliku tlaka u dva susjedna elementa kao silu koja utječe na promjenu volumena,

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho(V \cdot \text{grad})V = -\text{grad}P, \quad (5.2)$$

gdje je  $P$  tlak.

Treća jednadžba opisuje održanje energije, što u osnovi znači kako je ukupna energija unutar promatranog volumena konstantna,

$$\rho \frac{\partial E_u}{\partial t} = \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt}. \quad (5.3)$$

Empirijske izrazi za izračun tlaka udarnog vala, konstanta smanjenja tlaka, impuls udarnog vala, kavitacija, refleksija udarnog vala od slobodne površine vode i dna te radijus i period plinskog mjehura, prikazane su posebno, Sjostrand [62].

### 5.3 Računalni programi za numeričke simulacije podvodne eksplozije

Komercijalno dostupni paketi računalnih programa za analizu i rješavanje podvodne eksplozije u interakciji s brodom su: ABAQUS, ANSYS, MSC-Dytran i LSLS Dyna i dr. Računalni programi koriste metodu konačnih elemenata, za analizu dinamičkog odgovora broda na djelovanje podvodne eksplozije [17].

Računalni programi su prvenstveno ranije pripremani za rješavanje zadaće djelovanja podvodne eksplozije na brod ili podmornicu. U posljednje vrijeme sve se više istražuje djelovanje podvodne eksplozije na podvodne građevine pa se postojeći računalni programi primjenjuju uz potrebne modifikacije i razvoj modela konstrukcija, materijala i dr.

Računalni program LS Dyna koristi Lagrange Eulerovu metodu, koju primjenjuje za više različitih materijala (engl. *Multi - Material Arbitrary Lagrangian Euler - MMALE*) i metodu graničnih elemenata (engl. *Boundary element method - BEM*). Većina metoda za modeliranje podvodne eksplozije (engl. *UNDEX*) koriste metodu konačnih elemenata (engl. *Finite element method - FEM*) u cijelosti ili djelomično. U slučajevima kada se za modeliranje podvodne eksplozije koristi metoda konačnih elemenata koristi se hidrokod (engl. *hydrocod*) softver [62].

Hidrokod (engl. *hydrocod*) se dijeli u dvije grupe i to: Euler i Lagrangove. Hidrokod softver se koristi za numeričke simulacije odziva tekućina i krutih tijela u vrlo dinamičkim uvjetima, gdje je dominantno širenje udarnog vala pa i kad je uključeno više različitih materijala [63].

### 5.4 Softver LS Dyna i USA

Spajanje računalnih softvera LS Dyna i USA je moguće u zadaći podvodne eksplozije kad se središte eksplozije nalazi na određenoj udaljenosti od konstrukcije. USA je metoda graničnih elemenata (engl. *boundary element method code*) koju je razvio istraživački laboratorij Lockheed Palo Alto. Konačne elemente LS Dyna koristi za modeliranje manjeg unutarnjeg dijela prostora fluida gdje dolazi do kavitacije

pomoću metode kavitirajućeg akustičnog konačnog elementa (engl. *CAFE*). LS Dyna se također koristi za analizu reakcije konstrukcije broda na udarno opterećenje uslijed djelovanja podvodne eksplozije. Dok se USA sotver koristi u vanjskom područja fluida za modeliranje djelovanja podvodne eksplozije na granici unutarnjeg područja fluida. Koristeći ove dvije metode zajedno omogućeno je modeliranje cijelog prostora fluida, kad se središte podvodne eksplozije nalazi na određenoj udaljenosti od konstrukcije (engl. *far field explosion*), kao problem granične vrijednosti s kraćim vremenom računanja, jer elementi nisu potrebni za modeliranje cijelog područja.

## 5.5 Software LS Dyna

LS Dyna 970 je novija verzija računalnog programa za rješavanje nelinearnih, dinamičkih, trodimenzionalnih zadataka. Računalni program je kreirala tvrtka „Livermore Software Technology Corporation“, 1989. godine. To je u biti modificirana verzija starijeg trodimenzionalnog programa konačnih elemenata DYNA3D, nastao 1979. godine, u gradu Livermore, država Lawrence SAD.

Opći model LS Dyna podvodne eksplozije (UNDEX) konačnih elemenata kako su ga koristili Shin i Wood, sastoji se od područja fluida koji je modeliran čvrstim nepomičnim elementima i konstrukcije modelirane pomičnim elementima [63].

Softver je strukturiran u tri odvojena modula, od kojih se svaki odnosi na tipičnu fazu rada koristeći metodu konačnih elemenata:

- Predprocesor (za definiranje modela),
- Solver (za rješavanje zadatka) i
- Postprocesor (za analizu rezultata) [31].

## 5.6 Metoda spektralnih elemenata

Metoda spektralnih elemenata kombinacija CASA (engl. *Centre for Advanced Structural Analysis*) je tradicionalna spektralna metoda koja je općenito vrlo točna, a konačni elementi su geometrijski fleksibilniji. Sprague i Geers su primijenili metodu spektralnih elemenata (SEM) za podvodnu eksploziju na većoj udaljenosti. Zadaća podvodne eksplozije se rješava primjenom CAFE (engl. *Cellular Automaton Finite Element*) pri modeliranju domene fluida. Ovaj pristup se zove metoda kavitirajućih akustičnih spektralnih elemenata (CASE).

Sprague i Geers su primijenili CASE metodu na podvodnu eksploziju na velikoj udaljenosti na trodimenzionalni brod poput teglenice. Usporedbom dobivenih rezultata rješenja zadatke dobivenih pomoću CASE i CAFE metode pokazalo se kako CASE metoda daje točnije rezultate, uz manje računalne zahtjeve od tradicionalne CAFE metode [63].

## 5.7 Lagrange Eulerova metoda (ALE)

Hidrokodovi su alati za numeričku simulaciju multimaterijalne, kompresibilne, tranzijentne mehanike kontinuuma. Postoje četiri glavne metode hidrokoda; Lagrangeov, Eulerov, spregnuti Euler - Lagrangeov (CEL) i Lagrange Eulerov (engl. Arbitrary Lagrange Euler - ALE). Računska mreža konačnih elemenata Lagrangovog modela je pomična na dijelu materijala i obično se koriste samo za simulaciju deformacije konstrukcije. Rješenje dinamike fluida podvodne eksplozije i interakcije tekućina/konstrukcija nije moguće korištenjem isključivo Lagrangove metode zbog velike deformacije mreže fluida uzrokovane udarnim valom. Zato se za proračun tekućine obično koristi čista Eulerova metoda [44].

Softver koji udružuje Eulerovu i Lagrangeovu metodu koristi Eulerovu metodu za modeliranje područja fluida, a Lagrangeovu mrežu za područje konstrukcije. Postupak spajanja metoda provodi se na kontaktu između tekućine i konstrukcije kako bi se izračunala njihova interakcija. Schittke i dr. koristili su hidrokod DYSMAS/ELC za modeliranje interakcije podvodne eksplozije i konstrukcije [63].

U modelu spajanja konstrukcije i tekućine definira se vremenski promjenjiva granica kroz koju se odvija izmjena mase i energije. Hidrodinamička opterećenja konstrukcije, koja nastaju dolaskom udarnog vala, transformiraju se u sile tlaka na konstrukciju. Odgovor konstrukcije na djelovanje tekućine izračunava se pomoću promjene impulsa u fluidu zbog pomaka konstrukcije [63].

Schittke i dr. navode kako model dobro opisuje prijenos udarnog opterećenja na konstrukciju i učinke kavitacije, uz pretpostavku djelovanja udarnog vala kao ravnog vala, što eksperimentalno nije potvrđeno.

Zaključeno je kako model interakcije nije sposoban u potpunosti prenijeti maksimalni tlak udarnog vala, ali je sposoban dobro prenijeti impuls udarnog vala iz fluida u konstrukciju [63].

### 5.7.1 Hidrokod

Hidrokod je numerički alat za modeliranje strujanja fluida pri različitim brzinama, ali uz prilagodbu koristi se i za opis ponašanja konstrukcija. Hidrokod pokazuje dobre rezultate pri modeliranju nelinearnih nestacionarnih zadataka.

Modeli su prihvatljivi ako se dobro ponašaju odnosno daju rezultate i pokazuju dobro slaganje u odnosu na eksperimentalne rezultate u fazi validacije. Svakako treba istaknuti kako je veličina konačnih elemenata najvažniji parametar u točnosti modela.

U usporedbi s drugim standardnim računalnim programima dinamike fluida (engl. *Computational Fluid Dynamics - CFD*), hidrokodovi rješavaju osnovne jednadžbe mehanike fluida. Rješavanjem jednadžbi, hidrokodovi zahtijevaju manje pretpostavki od standardnih CDF (engl. *Computable Document Format*) računalnih programa [63].

U zadaći podvodne eksplozije (*UNDEX*), hidrokodovi se koriste za simulaciju detonacije, širenja udarnih valova i interakciju fluida i konstrukcije. Hidrokodovi se mogu podijeliti u dvije grupe i to: Eulerov i Lagrangeov [63].

Hidrokod je alat računalne mehanike koji simulira interakciju čvrstog tijela i fluida u vrlo dinamičkim uvjetima (npr. detonacija i udar), gdje je dominantna značajka širenje udarnog vala.

Hidrokod daje numeričke rezultate s najmanjim odstupanjima od eksperimentalnih rezultata od bilo koje druge metode računalne dinamike fluida (engl. *Computational Fluid Dynamics - CFD*) ili računalne mehanike čvrstog tijela (engl. *Computational Solid Mechanics - CSM*) [44].

### 5.7.2 Eulerovi hidrokodovi

Eulerovi hidrokodovi za diskretizaciju analiziranog područja koriste fiksnu mrežu kroz koju se omogućava prolaz mase. Nakon svakog vremenskog koraka promjena oblika fluida uzrokuje tok (flux) fluida u fiksnoj mreži. Korištenjem fiksne mreže izbjegavaju se problemi koji nastaju zbog krivljenja mreže, no informacije su manje detaljne i dostupne za svaki element u mreži. Ovo proizlazi iz nedostatka povijesti i točnosti informacija dok se masa kreće kroz fiksnu Eulerovu mrežu.

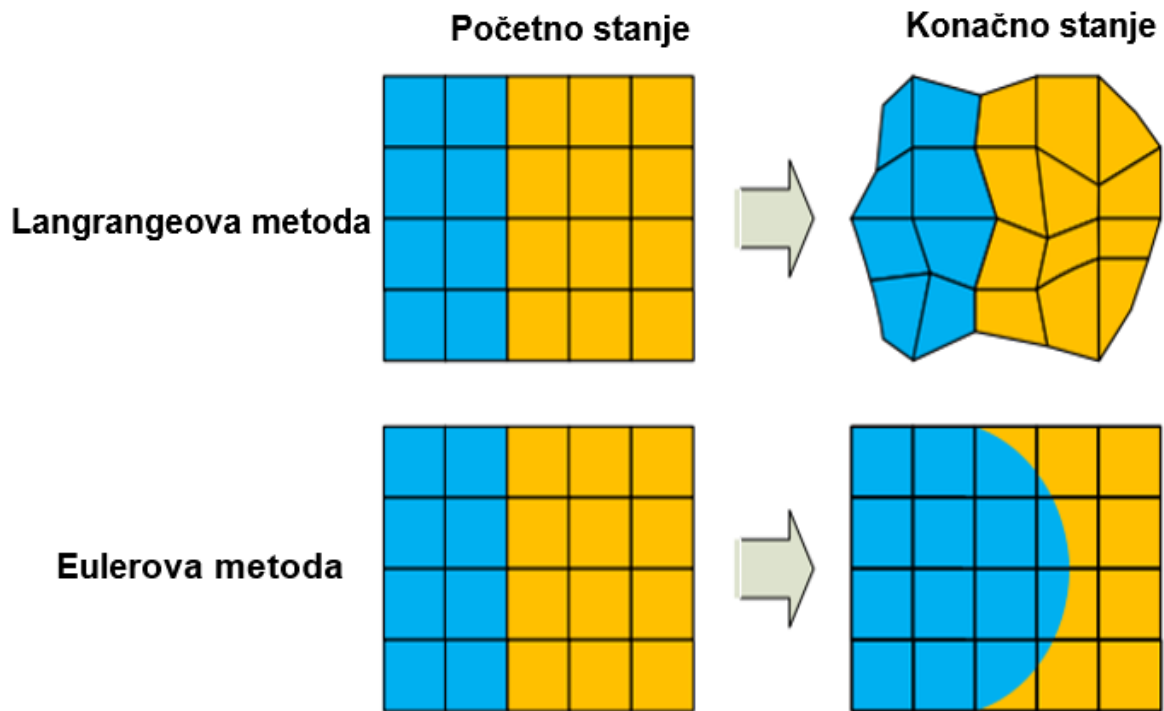
Odstupanje u Eulerovoj mreži također može uzrokovati dobivanje niže vrijednosti maksimalnog tlaka od stvarne vrijednosti. Eulerova metoda je računski zahtjevnija od ostalih metoda hidrokoda jer se zbog toka mase kroz svaki element mora izračunati protok u svakom vremenskom koraku.

Pangilinan i dr. koristili su Eulerov hidrokod za modeliranje dijagrama tlak - vrijeme za detonaciju eksploziva PETN-a u vodi. Chisum je koristio Eulerovu mrežu u MSC-DYTRAN-u za više različitih materijala pri modeliranju duboke podvodne eksplozije TNT, na dubini vode od 178,6 m [63].

### 5.7.3 Lagrangeov hidrokod

U Lagrangeovom hidrokodu mreža nije fiksna ona je vezana za materijal, što omogućuje deformiranje mreže zajedno s materijalom. Metoda Lagrangeove mreže brža je od metode Eulerove mreže jer nije potrebna faza protoka, što može izazvati poteškoće povezane s velikim deformacijama mreže. Kada izobličenja mreže postanu prevelika metoda nije pouzdana.

Mair i dr. koristili su čisto Lagrangeov pristup u hidrokodu DYNA3D za modeliranje eksplozije u blizini zakrivljene ploče i otkrili kako se mreža na kraju raspala, što potvrđuje glavno ograničenje Lagrangianove metode [63].

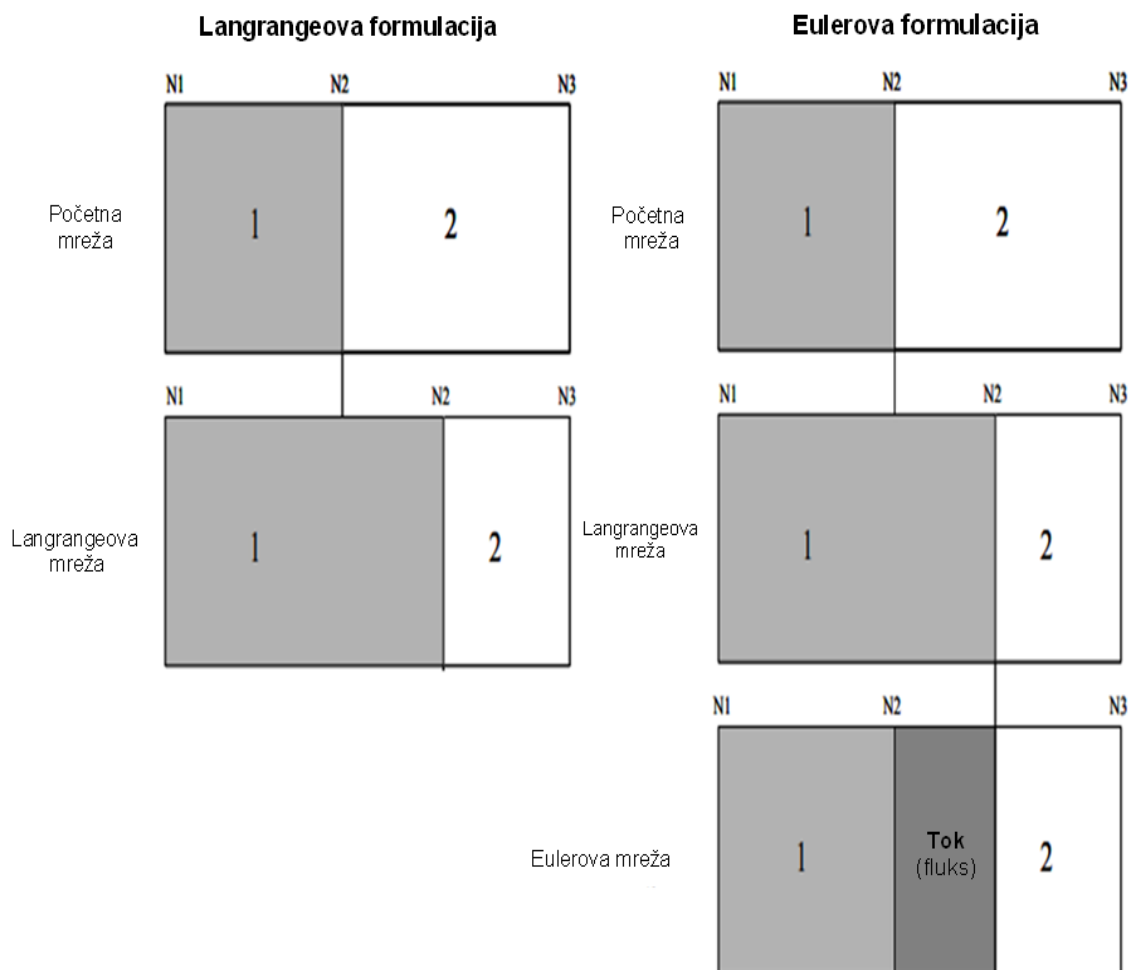


Slika 5.1 Prikaz mreže Lagrangeove i Eulerove metode [64]

Na slici 5.1 prikazana je mreža i kontinuum u Langrage i Eulerovoj metodi u početnom stanju i nakon odgovora na djelovanje udarnog vala.

Kao što je prethodno opisano fluid se giba odnosno teče kroz fiksnu mrežu, dok se konstrukcija deformira zajedno s mrežom.

Na slici 5.2 prikazana je Lagrangeova i Eulerova metoda na 1D elementima.



Slika 5.2 Prikaz 1-D Lagrangeove i 1-D Eulerove formulacije [44]

## 5.8 Dvostruka asimptotska aproksimacija (DAA)

Drugi pristup rješavanju problema podvodne eksplozije (*UNDEX*) je pomoću metode graničnog elementa. Dvostruka asimptotska aproksimacija (engl. *Doubly Asymptotic Approximation* - DAA) je metoda graničnih elemenata, koja se koristi u programu za rješavanje podvodne eksplozije (engl. *Underwater Shock Analysis SAD*).

Značajna prednost u odnosu na metodu DAA je što se jednadžbe interakcije fluid - konstrukcija odnose samo na varijable tzv. mokre površine. Stoga tekućinu koja okružuje konstrukciju ne treba modelirati što omogućava puno brži proračun [63].



### 5.8.1 Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata omogućava numerički proračun određenih vrijednosti fizikalnih veličina u analiziranom području. Kontinuirano neprekinuto područje, koji se analizira (domena) dijeli se odnosno diskretizira na određen broj diskretnih konačnih elemenata određene veličine. Na kontaktu pojedinih konačnih elemenata formiraju se zajednički čvorovi, stranice i plohe.

Nakon diskretizacije analiziranog područja potrebno je odrediti funkcije za približenje točnom rješenju pa se odabiru bazne funkcije. Posebnu poteškoću izgradnje baznih funkcija susrećemo kad bazne funkcije moraju zadovoljiti neke posebne uvjete, npr. točno aproksimirati funkciju ili derivacije na rubu područja ili u pojedinim točkama.

To se prvenstveno odnosi na funkcije zadane diferencijalnim jednadžbama. Isto tako često je potrebno izgraditi funkcionalno približenje koje treba zadovoljiti neke geometrijske uvjete. Npr. ako je područje neki dio materijalnog kontinuuma, koje se sastoji od dvije ili više različitih tvari, tada funkcionalno približenje treba o tome voditi računa na unaprijed zadani način. U takvim slučajevima nameće se sama po sebi ideja da se baza izgradi po dijelovima podpodručja (komada kontinuuma) nezavisno, s tim da se na spoju podpodručja mora očuvati kompatibilnost [63].

Razvijanjem osnovne zamisli dolazi se do postupka raspodjele područja na dovoljno male srazmjerno pravilne dijelove, takve da se na svakom takvom dijelu funkcija srazmjerno jednostavno izražava pomoću zgodno izabranih baza. Takvi mali dijelovi područja, srazmjerno jednostavnih oblika, nazivaju se konačni elementi, a sam postupak podjele područja naziva se diskretizacija na konačne elemente ili tehnika konačnih elemenata.

Naime, izborom istog oblika konačnog elementa za diskretizaciju cijelog područja, problem se svodi na rješavanje problema na jednom elementu, dok se na ostalim ponavlja, što je prikladno za primjenu računala [63].

Kako svaki konačni element oblikuje funkciju „razapetu“ nad sobom pomoću svoje lokalne baze, bazne funkcije elementa se još nazivaju oblikovne funkcije. Pomoću

oblikovnih funkcija na elementima gradi se funkcija nad cijelim područjem. Na rubovima elemenata, tj. kontaktima elemenata mogu se postavljati različiti uvjeti npr. neprekidnost funkcije, neprekidnost funkcije i derivacije itd., što utječe na izbor oblikovnih funkcija. Taj problem naziva se problem kompatibilnosti [63].

Lokalizirana baza jednaka je nuli u svim čvorovima osim u čvoru pridruženja, gdje ima vrijednost jedan. Na ovaj način se dobiva vrpčasta globalna matrica što značajno smanjuje broj računskih operacija pri numeričkom rješavanju zadaće [63].

### 5.8.2 Mreža

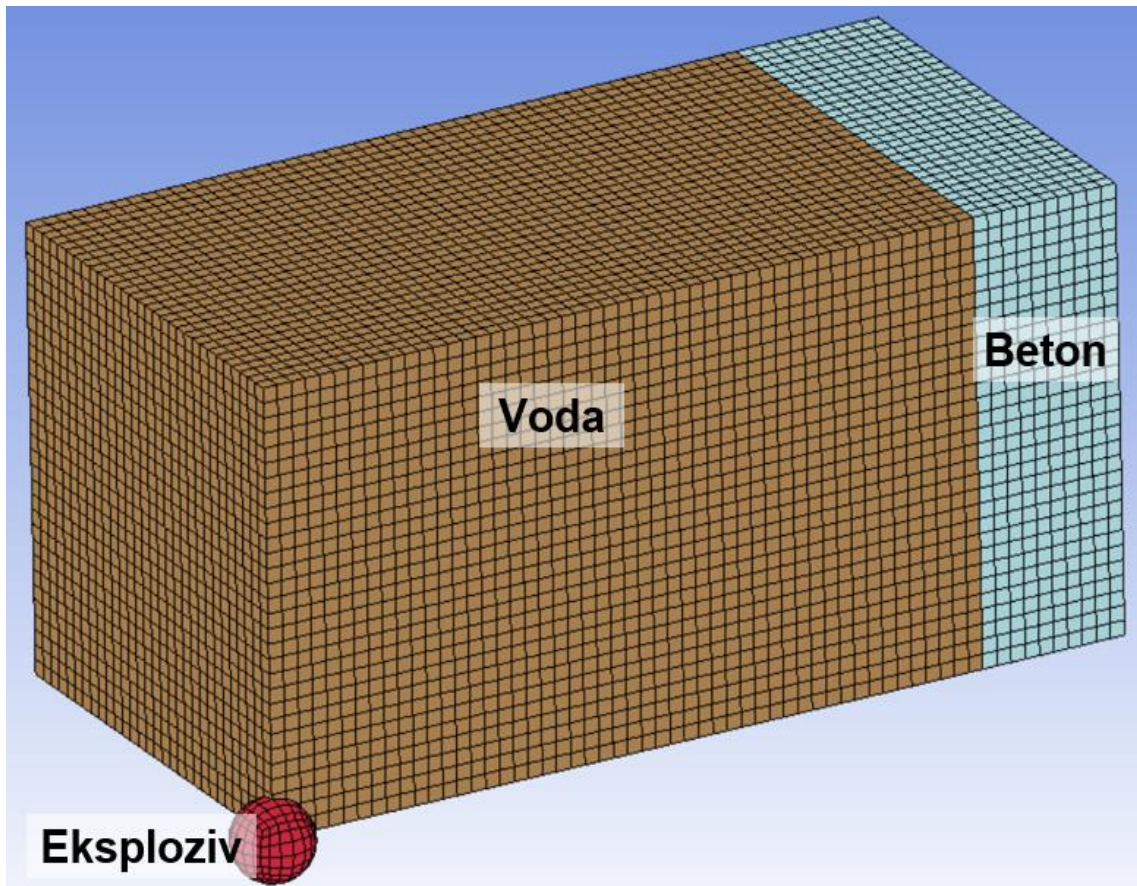
Promatrano područje se dijeli na konačne elemente korištenjem raspoloživih alata u softveru Ansys LS Dyna (engl. *Shape Mesher, Solid Mesher, Block Mesher, N-Line mesher, 2D Mesh Generation, Tetraheadar Mesher, Blank Mesher i Bulk Fluid*) [63].

Formiranje mreže konačnih elemenata može se izvršiti na dva načina. Prvi način se provodi u dvije faze, u prvoj fazi se unose geometrijski elementi pojedinih promatranih područja odnosno geometrijskih modela pojedinih dijelova globalnog modela (eksploziv, voda, zrak, konstrukcija i sl.), a u drugoj fazi se promatrana područja dijele na konačne elemente.

Drugi način je unošenje koordinata promatranog područja pojedinih odnosno geometrijskih dijelova globalnog modela, a zatim se, u istoj kartici za unos podataka, unose dimenzije elemenata ili broj podjela u smjeru koordinatnih osi ili gustoća mreže za promatrano područje oblika kugle.

Modeliranje podvodne eksplozije u ovom radu je provedeno na drugi način korištenjem raspoloživog alata, zadavanjem rubnih ploha područja pojedinog medija ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  ili  $r$ ) i gustoće diskretizacije po osima ili gustoće diskretizacije prostora za kuglu (eksploziv) (engl. *Shape Mesher i Solid Mesher*).

Na slici 5.3 prikazan je diskretizirani model podvodne eksplozije, u ovom radu, u računalnom programu LS Dyna.



Slika 5.3 Prikaz modela UNDEX-a eksploziv, fluid i konstrukcija

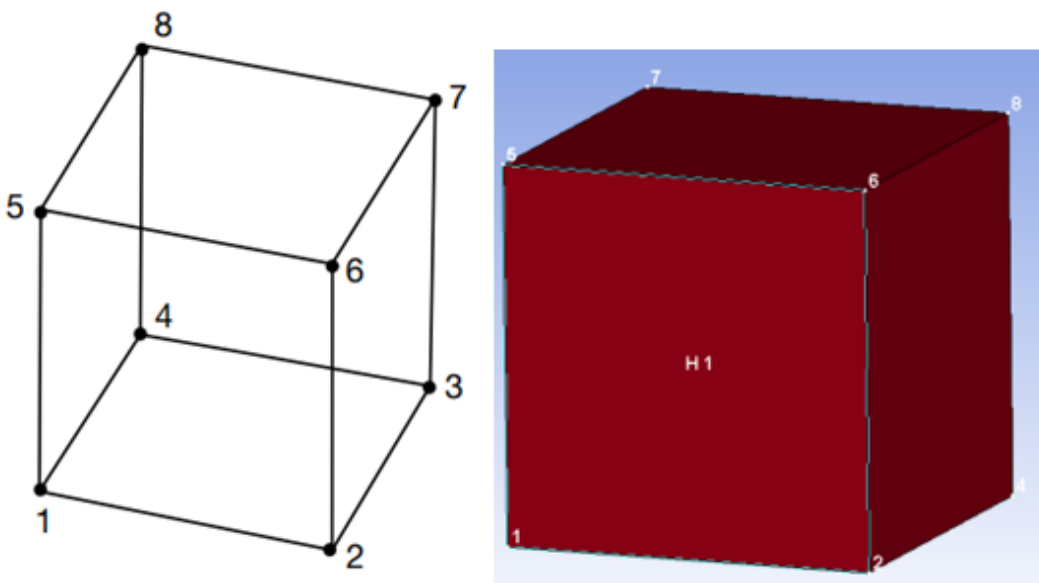
Na slici 5.3 je prikazan model koji se sastoji od eksploziva, vode i konstrukcije (betonski blok). Eksploziv je oblika kugle, veličine (polumjer 27,11 cm) i mase (136,08 kg) kao u literaturi Cole [3], kod svih numeričkih modela. Za spomenuti oblik i količinu eksploziva imamo eksperimentalne rezultate i možemo izračunati rezultate korištenjem empirijskih izraza. Prostor vode je oblika kvadra 3x3x5 m, prostor betonskog bloka 3x3x1 m. Veličina konačnih elemenata vode i betona je 10x10x10 cm.

### 5.8.3 Konačni elementi

Općenito, LS Dyna traži približno rješenje matematičkih jednadžbi koje opisuju podvodnu eksploziju uz zadane početne i rubne uvjete. Približno rješenje dobiva se pomoću postupka slabe formulacije, a zatim se koristi standardna Galerkinova formulacija ili Petrov-Galerkinova formulacija konačnih elemenata za rješenje zadaće.

Opcija Petrov-Galerkin ograničena je na određene konačne elemente, koji se ne koriste u modelu UNDEX.

Model podvodne eksplozije za područje vode koristi čvrste 8 čvorne elemente, vidjeti sliku 5.4. Ovi elementi koriste polinome prvog reda za oblikovne funkcije elemenata pa se globalna matrica masa transformira u dijagonalnu matricu.

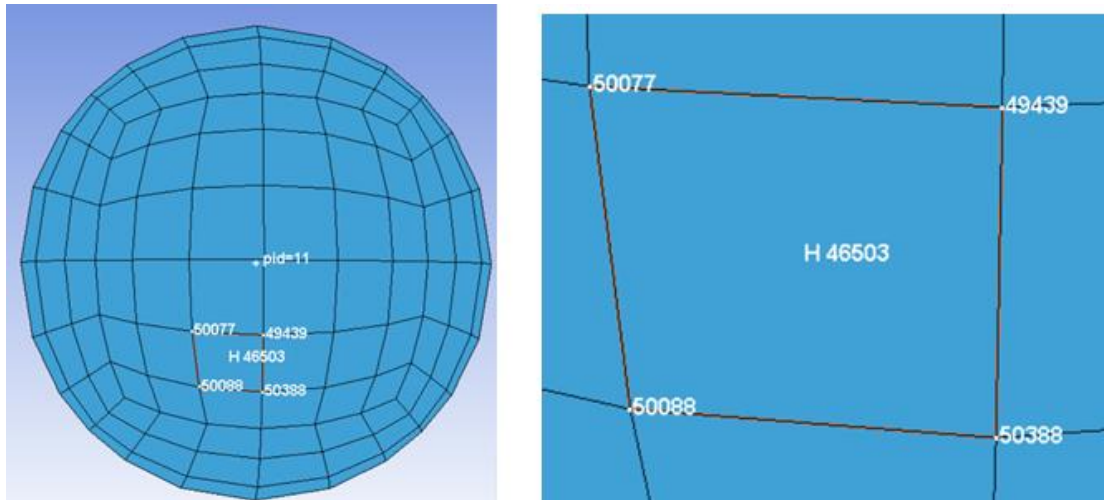


Slika 5.4 Prikaz osmočvornog elementa fluida i konstrukcije [65]

Dijagonalna matrica masa može smanjiti vrijeme računanja, ali tehnika zbrajanja redova također može rezultirati negativnim masama čvorova koje mogu uzrokovati probleme u rješavanju sustava jednažbi [63].

Kao što je već spomenuto za eksplozivni naboj oblika kugle program LS Dyna automatski diskretizira prostor eksplozivnog punjenja unošenjem gustoće diskretizacije konačnim elementima. Prethodno se zadaje položaj središta i radijus kugle.

Treba napomenuti kako su konačni elementi različitih veličina i oblika, što je prikazano na slici 5.5.



Slika 5.5 Prikaz prostora eksploziva (kugla) (pid 11) i elementa (H 46503)

Tip nepomičnog konačnog elementa koji se koristi za domenu fluida je element akustičnog tlaka. Pretpostavke za element akustičnog tlaka su mali pomaci fluida i zanemarivanje viskoznosti. LS Dyna akustični elementi prate valove niskog tlaka kroz akustični medij.

Akustični element zahtijeva postojanje samo jedne nepoznanice, a to je tlak. U ovom modelu materijala korisnik definira gustoću, brzinu zvuka, atmosferski tlak, gravitaciju i granicu slobodne površine promatranog prostora (domene).

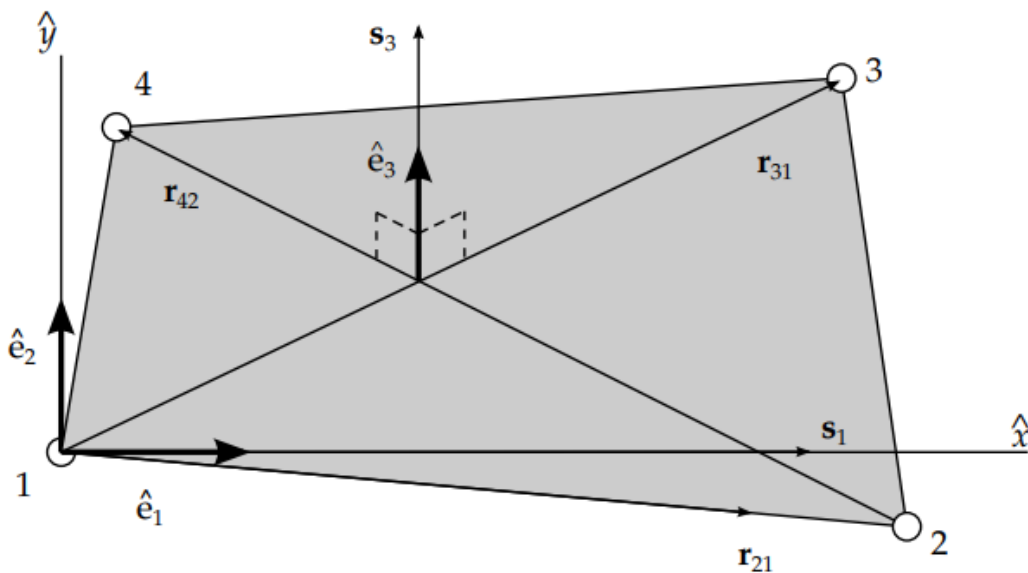
Atmosferski tlak i gravitacija se koriste za izračunavanje hidrostatičkog tlaka. Definirana granica slobodne površine u modelu tretira refleksije tlačnog vala na granici kao granici kontakta, gdje je jedan materijal akustičan materijal, a drugi materijal je zrak [63].

Za domenu konstrukcije koriste se ravninski elementi Belytschko-Tsay. Ravninski elementi omogućavaju definiranje debljine dvodimenzionalnog elementa pa mogu modelirati i trodimenzionalno područje. Belytschko - Tsay ravninski element je zadan u formulaciji elemenata u LS Dyna 970 zbog njegove računalne učinkovitosti.

Učinkovitost elementa potječe iz njegove kombinacije rotacije i brzine. Zbog ove formulacije elementi Belytschko-Tsay su ograničeni na probleme s malim naprezanjima. Pretpostavka male deformacije vrijedi u polju UNDEX, daleko od središta eksplozije, u modelu je dopuštena samo elastična deformacija konstrukcije broda [63].

Belytschko - Tsay je četvero čvorni element, a za definiranje površine uzima se središnja točka plohe i debljina elementa. Koordinatni sustav se deformira na svakom elementu kao i rotacijski koordinatni sustav. Odnos deformacija - brzina ocjenjuju se u središnjoj točki elementa i čvorovima. Brzina i kutna brzina rješavaju se na srednjoj površini korištenjem interpolacije pomoću bilinearne funkcije oblika za element četverokuta s četiri čvora. Naprezanja koja proizlaze iz rješenja odnosa brzina - deformacija integriraju se kroz debljinu elementa kako bi se dobile sile i momenti u čvorovima [63].

Na slici 5.6 prikazan je Belytschko - Tsay četverokutni element.



Slika 5.6 Belytschko - Tsay četverokutni element [63]

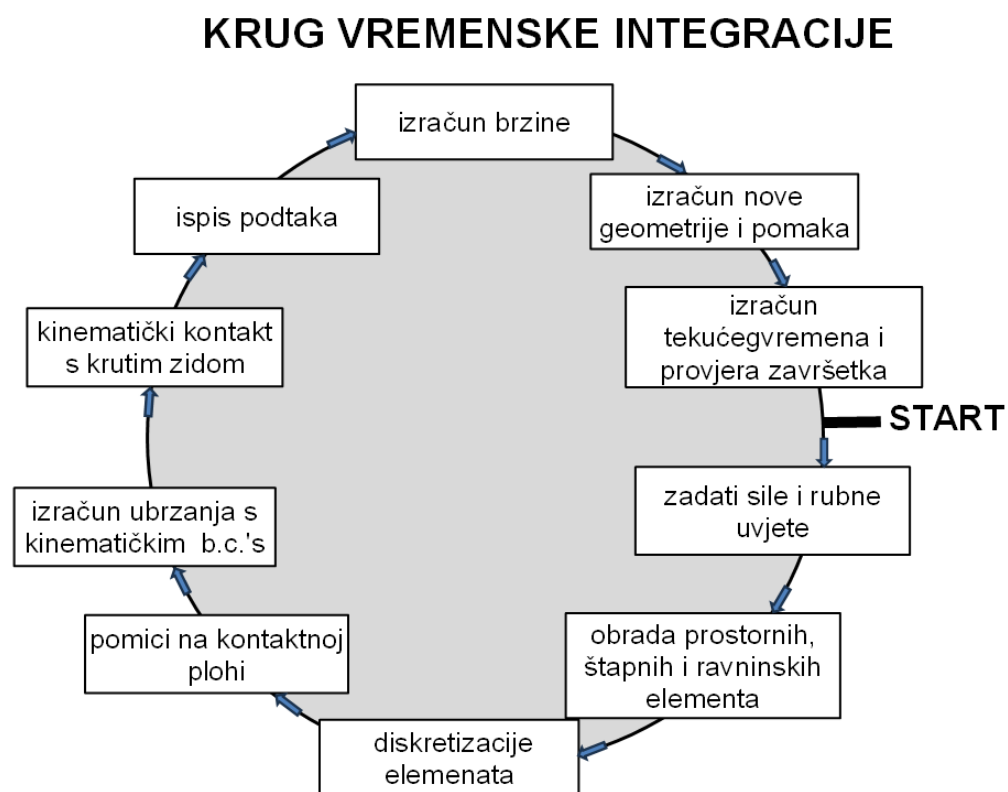
#### 5.8.4 Integracija vremena

LS Dyna koristi metodu središnje razlike za izvođenje vremenske integracije modela. Središnja diferencijska shema je uvjetno stabilna i točnosti drugog reda.

Vremenska integracija u LS Dyna je eksplicitna što znači da je rješenje u trenutnom vremenu. Rješenje koraka se može odrediti iz rješenja u prethodnom vremenskom koraku bez rješavanja sustava jednačbi. Stoga matrice mase i prigušenja u poludiskretnoj jednačbi gibanja moraju biti dijagonalne. Dijagonalne matrice se kreiraju pomoću tehnike zbroja redova matrica i podložni su poteškoćama u proračunu [63].

Ubrzanja se rješavaju inverzijom matrice mase u polu - diskretnoj jednačbi gibanja, a zatim se koriste za rješavanje brzine i pomaka.

Položaji čvorova se određuju, u svakom vremenskom koraku, dodavanjem trenutnih pomaka čvorova položaju čvorova u prethodnom vremenskom koraku. Pojednosti o petlji vremenske integracije izvedene u LS Dyna-i prikazani su na slici 5.7 [63].



Slika 5.7 Krug vremenske integracije [63]

Stabilnost metode središnjih razlika kontrolira se veličinom vremenskog koraka, koji se koristi u analizi. Definira se maksimalni vremenski korak za koji će model biti stabilan, a to je bilo koje vrijeme manje od maksimalnog ili kritičnog vremenskog koraka. LS Dyna izračunava maksimalni ili kritični vremenski korak koji osigurava stabilnost proračuna kao i minimalnog kritičnog vremenskog koraka preko svih elemenata u modelu. Za čvrste elemente kritični vremenski korak izračunava se pomoću jednadžbi:

$$L_c = \frac{V_{element}}{A_{element}}, \quad (5.4)$$

$$\Delta t_{critical} = \frac{L_c}{\sqrt{Q+(Q^2+c^2)}}, \quad (5.5)$$

gdje je  $L_c$  koeficijent volumena i površine najveće plohe elementa,  $V_{elementa}$  volumen elementa, a  $A_{elementa}$  površina najveće plohe elementa,  $Q$  je funkcija koeficijenta viskoznosti, a  $c$  je brzina zvuka u elementu.

Kritični vremenski korak određen je omjerom karakteristične duljine elementa prema brzini zvuka u elementu. Postoji nekoliko dostupnih metoda određivanja karakteristične duljine elementa. Ovaj način nudi korisniku izbor konzervativnog vremenskog koraka potrebnog za analizu. U ovom primjeru, metoda je korištena za četverokutne elemente jednake duljine. U modelu podvodne eksplozije proračun kontrolira i minimalni kritični vremenski korak elementa oplata broda, što zahtijeva manje vremenske korake nego kod fluida [63].

### 5.8.5 Granično i početno stanje

Za modeliranje podvodne eksplozije u modelu UNDEX u računalnom programu LS Dyna, koristi se naredba INITIAL\_DETONATION. INITIAL\_DETONATION inicira proces detonacije u eksplozivnom punjenju. Udarni val se širi u akustičkim elementima u fluidu.

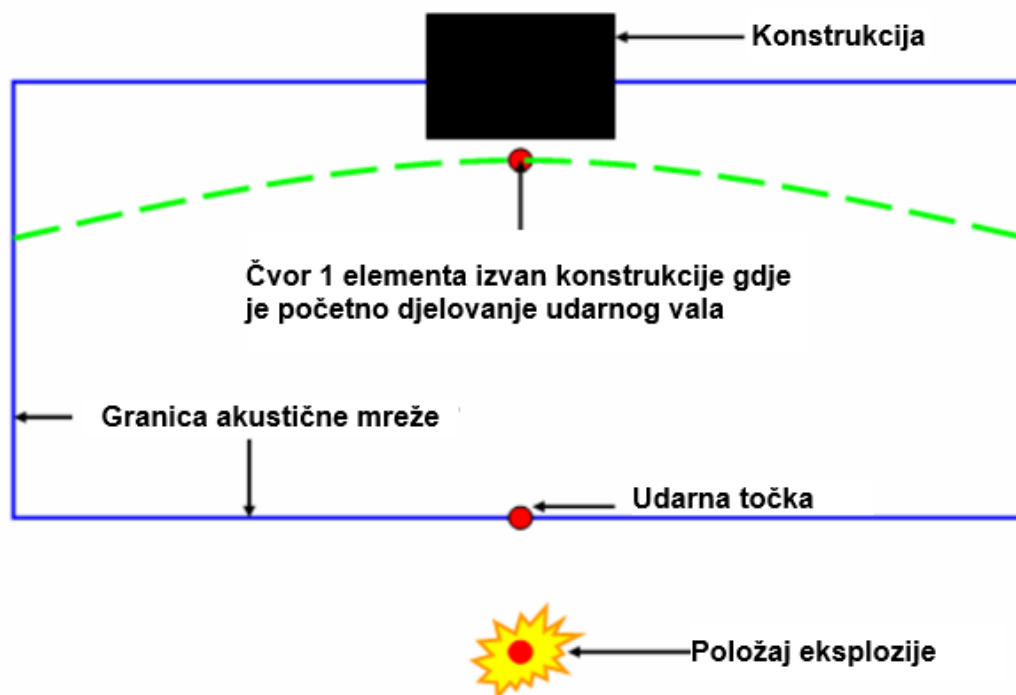
Korisnik prvo unosi središte eksplozivnog punjenja koje može biti interno ili izvan promatranog područja fluida. U UNDEX modelu kad je središte eksplozivnog punjenja na većoj udaljenosti, izvan područja fluida, unose se koordinate čvora na slobodnoj površini fluida, maksimalni tlak i vremenska konstanta za djelovanje UNDEX-a.



Ovi ulazni parametri se koriste za inicijalizaciju i aproksimaciju vremenske promjene tlaka udarnog vala. Udarni val je inicijaliziran na početku proračuna, kad je vrijeme jednako nula sekundi.

Na kraju treba definirati točku udaljenosti, koja se nalazi na dnu granice promatranog područja fluida na spojnici središta eksplozivnog punjenja i konstrukcije. LS Dyna koristi točku udaljenosti za određivanje granice akustične mreže promatranog prostora (domene) fluida. Granica akustične mreže djeluje kao granica koja sprječava prijenos reflektiranog udarnog vala od ponovnog ulaska u domenu fluida i utjecaj na rezultate, nakon što udarni val dosegne granicu domene.

Raspored pojedinih dijelova modela i INITIAL\_DETONATION prikazani su na slici 5.8.



Slika 5.8 Shema podataka za unos u program LS Dyna, INITIAL\_DETONARION [63]

## 5.9 Djelovanje podvodne eksplozije na konstrukciju

Interakcija fluida i konstrukcije (engl. *Fluid structure interaction - FSI*) je česta fizikalna pojava, koja se događa u raznim slučajevima kao i kod djelovanja podvodne eksplozije na podvodnu konstrukciju. U ovom slučaju podvodna eksplozija se odvija u vodi i djeluje na vodu, a preko vode kao medija djeluje na konstrukciju. Za rješavanje zadaće interakcije fluida i konstrukcije koristi se Lagrangeova i Eulerova metoda (engl. *Arbitrary Lagrange-Euler - ALE*).

Lagrangeova metoda se koristi za modeliranje konstrukcije pomoću mreže konačnih elemenata kod koje su točke u mreži povezane s materijalom. Uslijed vanjskih djelovanja mreža se deformira i simulira ponašanje konstrukcije. S druge strane, Eulerova metoda se koristi za opis fluida pomoću nepromjenjive fiksne mreže kroz koju teče promatrani fluid. Metoda omogućava odvojen opis ponašanja fluida i konstrukcije te je kontakt fluida i konstrukcije diskretiziran različitim mrežama konačnih elemenata.

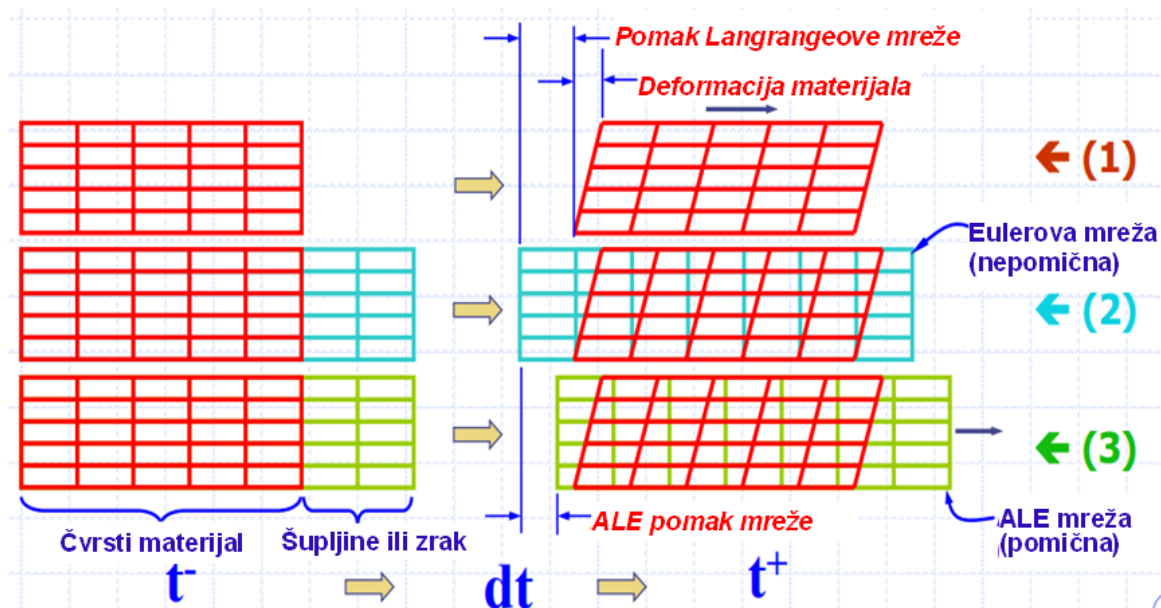
Osnovna ideja formulacije je djelovanje tekućine na konstrukciju i praćenje relativnih pomaka između spojenih Lagrangeovih čvorova konstrukcije i Eulerovih čvorova tekućine. Sile u kontaktnim čvorovima proporcionalne su pomacima, što se modelira pomoću elastičnih opruga.

Ogromna količina energije se udarnim valom širi kroz fiksnu mrežu i dolazi do konstrukcije. Kontakt tekućine i konstrukcije treba osigurati prijenos energije iz tekućine u konstrukciju, bez gubitaka pri prijenosu.

Opis LS Dyna konačnim elementima opće namjene za analizu dinamičkog odziva konstrukcije na velike deformacije uključuje konstrukciju povezanu s tekućinom. Metodologija glavnog rješenja temelji se na eksplicitnoj vremenskoj integraciji.

Ponašanje materijala opisuje se konstitutivnim modelima i jednadžbama stanja.

Na slici 5.9 prikazane su mreže 2D elemenata, fiksna Eulerova mreža za fluid, promjenjiva Lagrangianova mreža za konstrukciju i mreža Lagrange - Eulerove metode, nakon interakcije [16].



Slika 5.9 Prikaz 2D Lagrangeove mreže i 2D Eulerove mreže i 2D mreže Lagrange - Euler [16]

Na slici 5.9 prikazan je opis stanja s tri formulacije: (1) Lagrange, (2) Euler i (3) ALE (Arbitrary - Lagrange - Euler).

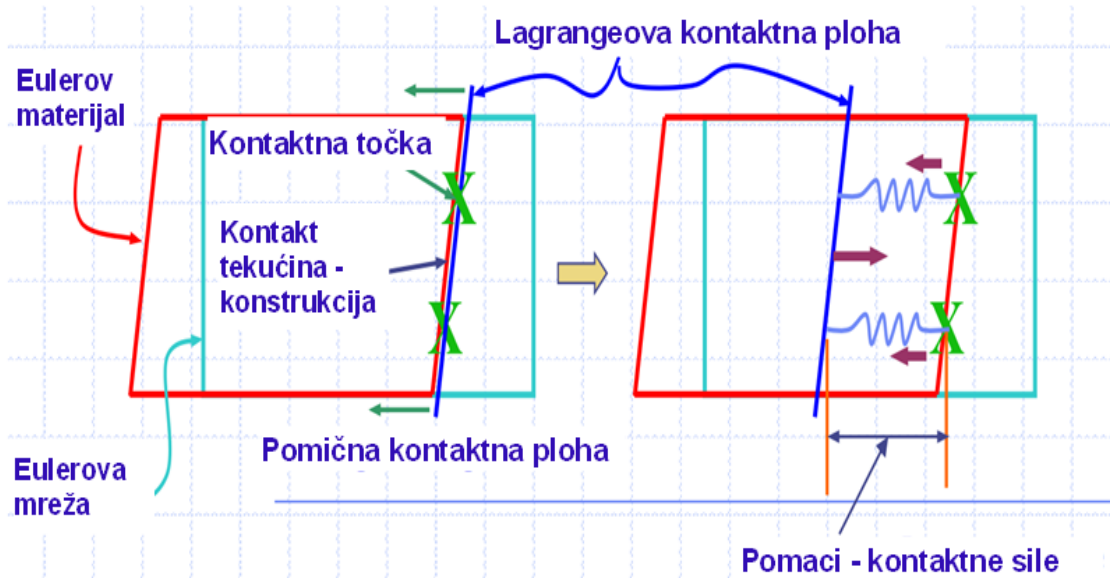
Vide se dvije mreže koje se preklapaju, jedna mreža je u pozadini koja je fiksna u prostoru, kroz koju teče materijal, a druga mreža je vezana za materijal koji "teče" kroz fiksnu mrežu.

Ovo se može vizualizirati u dvije faze:

- 1) U prvoj fazi materijal se deformira u Lagrangeovom koraku prema Lagrangeovoj formulaciji.
- 2) U drugoj fazi varijable stanja u "Lagrangeovim elementima" (crveno) se mapiraju ili advektiraju ili ponovno zoniraju ili distribuiraju natrag na fiksnu (pozadina) referentnu Eulerovu mrežu (voda).

Energija udarnog vala prenosi se kroz vodu do kontaktne plohe između vode i konstrukcije. Dio energije prelazi granicu i nastavlja širenje u konstrukciji, a dio energije se reflektira od granice.

Na slici 5.10 prikazana je interakcija fluida i konstrukcije.



Slika 5.10 Interakcija fluida i konstrukcije na kontaktnoj plohi [16]

Na slici 5.10 je prikazana interakcija fluida i konstrukcije. Tlak na kontaktu fluida i konstrukcije je definiran jednačbom:

$$P_{coupling} \equiv (P_{in} - P_{out}) = \frac{F_{coupling}}{Area_{coupling}}, \quad (5.6)$$

gdje su  $P_{in}$  i  $P_{out}$  unutarnji i vanjski tlak na kontaktu segmenata Lagrange i Eulera,  $F_{coupling}$  sila između segmenata i  $Area_{coupling}$  je površina kontaktne plohe segmenata.

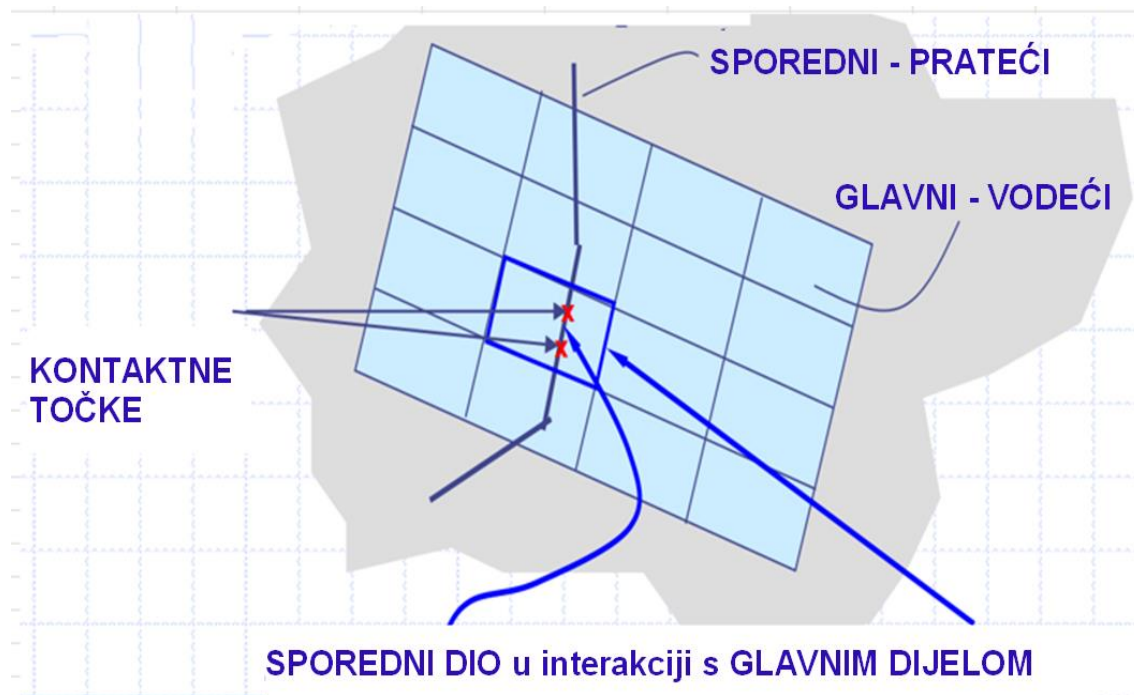
Fluid (Euler ili ALE) djeluje na konstrukciju na kontaktnoj plohi, djelovanje tlaka se rješava pomoću sila koje djeluju na konstrukciju u određenim točkama (NQUAD – X). Na mjestu djelovanja sila u modelu su postavljene elastične opruge preko kojih se prenose sile i ostvaruju pomaci.

Neovisno se prati gibanje materijala preko granične plohe. Zatim se računaju dubine prodiranja preko granice. Na temelju toga izračunavaju se sile i njihova preraspodjela na obje mreže.

Eulerova metoda nije prikladna za modeliranje deformacije konstrukcije jer se mreža ne može deformirati. Rješenje dinamike konstrukcije u interakciji fluid/konstrukcija, uslijed djelovanja podvodne eksplozije, se ne može dobiti korištenjem čiste Eulerove metode zbog deformacije mreže konstrukcije uzrokovane udarnim valom.

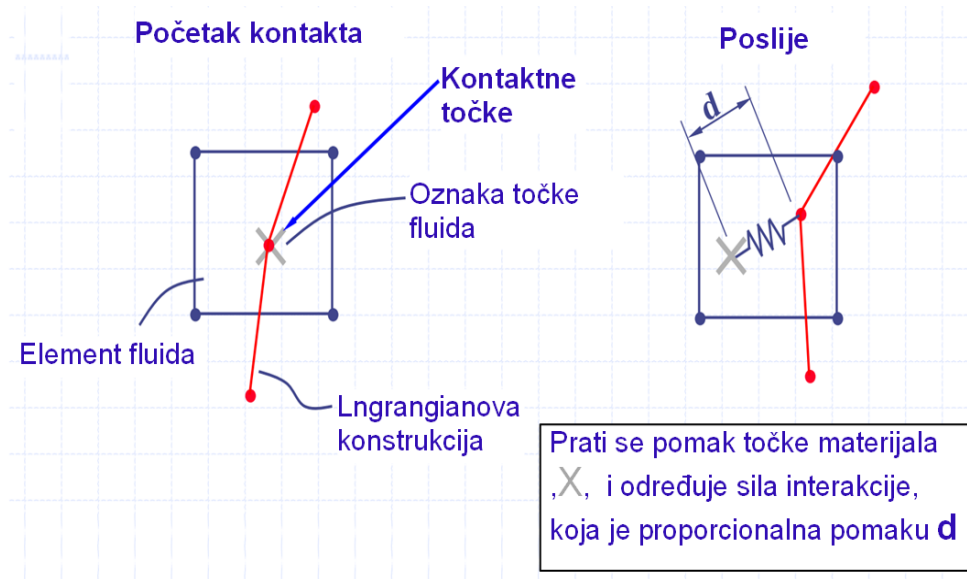
Metoda Lagrange/Euler (ALE) može riješiti dinamiku fluida i deformacije konstrukcije korištenjem kombinacije Lagrangove metode i Eulerove metode [44]. U računalnom programu LS Dyna, u dijelu programa FSI (engl. *Fluid Structure interaction*), unose se podaci za interakciju eksploziva, vode i konstrukcije.

Također se definira glavni i sporedni sklop sustava. Konstrukcija koja je modelirana Lagrangeovom metodom je sporedni (engl. SLAVE) sklop, a voda koja je modelirana Eulerovom metodom je glavni (engl. MASTER) sklop, kao što je prikazano na slici 5.11.



Slika 5.11 Prikaz formulacije temeljene na prijenosu sile u točkama segmenata [16]

Djelovanje tekućine na konstrukciju riješeno je algoritmom, kojim se prati relativni pomak između tekućine i konstrukcije. Vrijednosti sile u čvorovima su proporcionalne veličini relativnih pomaka.



Slike 5.12 Prikaz 1-D Lagrangeove i 1-D Eulerove formulacije prijenosa sile

Na slici 5.12 je prikazana točka u elementu koja je određena za prijenos energije odnosno za opis interakcije fluida i konstrukcije. Interakcija u određenim točkama odvija se preko elastične opruge u kojoj se za određeni pomak pojavljuje određena sila.

### 5.9.1 Opis materijala

Fizikalna svojstva materijala koji se koriste u numeričkom proračunu (eksploziv, voda, zrak, tlo i materijali konstrukcije) unose se u pripremljene kartice ovisno o izboru modela materijala. Mehanička svojstva materijala se odabiru upravljačkoj jedinici (eng. *Key Manager*) u grupi materijala (eng. *Key MAT*). Za različita mehanička svojstva materijala i opterećenja preporučuju se različiti modeli materijala. Modeli materijala mogu biti jednostavni i složeni, što zahtijeva različite memorijske kapacitete računala.

Za numeričko modeliranje djelovanje podvodne eksplozije, za vodu i zrak koriste se modeli materijala MAT 009- NULL.

Model MAT 009-NULL se koristi za modeliranje zraka i vode, s nultim vrijednostima. Nulti tip materijala je učinkovit u modeliranju tekućina i hidrodinamičkih medija. Čvrstoća materijala u elementu nultog materijala se zanemaruje. Model se koristi kada je materijal izložen djelovanju eksploziva. Osim toga, ovaj model materijala može opisati oštećenja materijala i toplinske učinke [15].

Deformacija fluidnog elementa nastaje zbog gradijenta brzine ili brzine deformacije ( $\dot{\epsilon}$ ). Za fluidne elemente devijatorsko posmično naprezanje ( $\sigma_d$ ) je proporcionalno brzini posmične deformacije ( $\dot{\epsilon}$ ).

$$\sigma_d = 2\mu\dot{\epsilon}, \quad (5.7)$$

gdje je  $\mu$  viskoznost tekućine. Tekućina se deformira sve dok je pod utjecajem posmičnog naprezanja [15].

Karakteristike za vodu i zrak su prikazane u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Karakteristike materijala (MAT\_009-NULL) za vodu i zrak [62]

	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Tlak vodene pare (Pa)	Dinamička viskoznost (Pa·s)
Zrak	1,1845	0	0,0185
Voda	1000	0	0,998200

Keyword MAT 008-HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN koristi se za opis eksploziva TNT. Ovaj model materijala koristi se za eksplozivne materijale koji detoniraju (poseban oblik izgaranja).

Proces detonacije je kemijska reakcija koja oslobađa toplinu i tlak, pri čemu se oslobađa kemijska energija, čija se maksimalna vrijednost  $F$ , može prikazati u obliku [15]:

$$F = \max(F_1, F_2), \quad (5.8)$$

gdje je  $F_1$  funkcija gustoće  $\rho$ , brzine detonacije  $d_e$  eksploziva, omjera volumetrijskog tlaka  $\frac{v}{v_0}$  i Chapman-Jogetov tlak  $P_{cj}$  i može se prikazati u obliku:

$$F_1 = \frac{\rho d_e^2}{P_{cj}} \left(1 - \frac{v}{v_0}\right). \quad (5.9)$$

Dok je  $F_2$  funkcija brzine detonacije  $d_e$ , vremena detonacije  $t_b$  i trenutnog vremena  $t$  i karakteristične duljine elementa  $\Delta x$  [15].

$$F_2 = \frac{2(t-t_b)d_e}{3\Delta x} . \quad (5.10)$$

Ako je  $F$  veći od jedan, usvaja se vrijednost jedan i ostaje konstantan. Maksimalni tlak eksplozije  $P$ , u elementu se dobiva kao umnožak  $F$ , tako da:

$$P = FP_{eos}(V_R, V_0) , \quad (5.11)$$

gdje je  $P_{eos}$  tlak iz jednadžbe stanja temeljen na relativnom volumenu  $V_R$  i gustoći unutarnje energije po jedinici početnog volumena  $V_0$  [15].

Karakteristike eksploziva TNT-a su prikazane u tablici 5.2.

Tablica 5.2 Karakteristike materijala za eksploziv TNT [62]

	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Brzina detonacije (m/s)	Chapman-Jouget tlak (GPa)
TNT	1630	6390	21

Za tlo i beton se može koristiti više različitih modela materijala, u ovom radu je korišten model MAT 003-PLASTIC\_KINEMATIC.

U numeričkom modeliranju korišteni su i betoni drugih razreda tlačne čvrstoće, korištene mehaničke karakteristike prikazane su u 6. poglavlju.

U literaturi se mogu naći različite karakteristike za pojedine materijale. U 6. poglavlju navedeni su podaci za opis pojedinih modela materijala, koji su uneseni u kartice materijala, pri numeričkom modeliranju.



Karakteristike za beton su prikazane u tablici 5.3.

Tablica 5.3 Karakteristike materijala za Beton C 30/37

	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Modul elastičnosti (MPa)	Poissonov koeficijent	Granica popuštanja (MPa)
Beton C 30/37	2400	32000	0,18	32

### 5.9.2 Jednadžbe stanja

Jedan od načina za opisivanje svojstava materijala je korištenje jednadžbi stanja (engl. *Equation of state* - EOS). Ove jednadžbe opisuju stanje materijala, ovisno o uvjetima (temperatura, tlak i volumen) u kojima se materijal nalazi, razni autori predlažu različite vrijednosti.

Jedna uobičajena jednadžba stanja je linearni polinom. Ako materijal možda ima nelinearno ponašanje često se koristi EOS Chapman-Jouget. Za eksplozivni materijal predlaže se EOS JWL High Explosive.

Sve jednadžbe izražavaju tlak  $p$  koristeći unutarnju energiju u početnom volumenu  $E$ , uz mogućnost projiciranja specifičnog oblika materijala. U nastavku su prikazane tri jednadžbe stanja [62].

### 5.9.3 Linearni polinom

Linearna jednadžba stanja koristi linearni odnos za izražavanje tlaka u materijalu kao:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E, \quad (5.12)$$

gdje su  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_5$  i  $C_6$  koeficijenti polinoma, koji ovise o vrsti materijala, a  $E_u$  je unutarnja energija:

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1, \quad (5.13)$$

gdje je  $\frac{\rho}{\rho_0}$  omjer trenutne i početne gustoće [22].

Parametri jednadžbe stanja za zrak prikazani su u tablici 5.4.

Tablica 5.4 Podaci za jednadžbe stanja - EOS - Linearni polinomi za zrak [66]

	C0 (Pa)	C (Pa)	C2 (Pa)	C3 (Pa)	C4 (Pa)	C5 (Pa)	C6 (Pa)	E0 (Pa)	V0 (-)
Zrak	0	0	0	0	0,4	0,4	0	0	0

#### 5.9.4 Gruneisen

Gruneisen koristi formulaciju kubnog polinoma za određivanje tlaka. Formulacija je rastavljena u dvije jednadžbe, jedna jednadžba se koristi za komprimirane materijale ( $\mu > 0$ ), izraz za tlak je:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{\left[ (1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}) \right]^2} + (\gamma_0 + \alpha \mu) e, \quad (5.14)$$

gdje je  $\rho_0$  početna gustoća,  $\rho$  trenutna gustoća nakon promjene,  $C$  je brzina zvuka u vodi,  $\gamma_0$  je Gruneisenov koeficijent,  $S_1$ ,  $S_2$  i  $S_3$  su konstante materijala,  $\alpha$  koeficijent korekcije, a  $\mu$  je određen izrazom:

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1. \quad (5.15)$$

Specifična unutarnja energija vode je određena izrazom:

$$e = \frac{\rho g D + P_{atm}}{\rho \gamma_0}, \quad (5.16)$$

gdje je  $D$  dubina vode,  $P_{atm}$  atmosferski tlak [16, 22 i 62].

Parametri jednadžbe stanja za vodu prikazani su u tablici 5.5.

Tablica 5.5 Podaci za jednadžbu stanja - EOS Gruneisen za vodu [66]

	(m/s)	S1 (-)	S2 (-)	S3 (-)	$\gamma_0$ (Pa)	A (-)	$E_0$ (Pa)	V (-)
Voda	1480	1,75	0	0	0,28	0	0	1

### 5.9.5 Jednadžba stanja eksploziva JWL

Produkti detonacije eksploziva (eksplozije) su plinski produkti s vatrom, odnosno snažnim tlakom i visokom temperaturom. Tlak produkata eksplozije modelira se s JWL (Jones – Wilkens i Lee) parametarskom jednadžbom stanja (Dobratz i Crawford 1985.) i može se napisati u obliku:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V + \frac{\omega E}{V}}, \quad (5.17)$$

gdje su  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  i  $\omega$  konstante eksploziva, koje se određuju na temelju eksperimentalnih ispitivanja,  $V$  je relativni volumen i  $E$  je unutarnja energija [62].

Parametri jednadžbe stanja za eksploziv TNT prikazani su u tablici 5.6.

Tablica 5.6 Podaci za jednadžbu stanja - EOS JWL za eksploziv TNT [66]

JWL	A	B	R1	R2	$\omega$	$E_0$	$V_0$
TNT	371 GPa	3,23 GPa	4,15	0.95	0,3	4,3 GPa	1

### 5.9.6 Kontrola „hourglassa“

Nedostatak integracije na konačnim elementima s konstantnim naprežanjem je pojava energije vrijednosti jednake nuli u nekim čvorovima pa je potrebna „hourglass“ kontrola. Za „hourglass“ kontrolu koriste se modovi, koji se zovu „hourglass“ modovi. Nepoželjni „hourglass“ modovi imaju tendenciju smanjenja perioda koji su puno kraći od perioda odgovora konstrukcije, a često su oscilatorni [68].

Međutim, „hourglass“ modovi koji imaju periode reda veličine perioda odgovora konstrukcije mogu biti kinematski stabilni (čvrsti elementi) koji moraju omogućiti komponente globalne deformacije.

Jedan od načina izbjegavanja nepoželjnih „hourglassa“ je pomoću viskoznih prigušenja ili malih elastičnih krutosti, koje mogu zaustavljati formiranje nepoželjnih modova, a imaju zanemariv utjecaj na stabilnost globalnih modova.

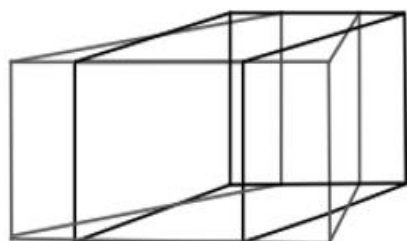
Dva od prvih trodimenzionalnih algoritama za upravljanje „hourglass“ modovima su razvili Kosloff i Frazier te Wilkins i dr. 1974. [68].

Budući da su „hourglass“ modovi deformacije ortogonalni na proračunske deformacije, rad „hourglass“ otpora je zanemaren u energetske jednačini. Ovo može dovesti do laganog gubitka energije; međutim, „hourglass“ kontrola uvijek se preporučuje za integraciju čvrstih elemenata.

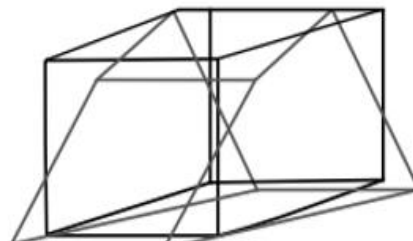
Otpor formiranju modova „hourglassa“ prati disipacija energije, što se bilježi u izlaznim datotekama te omogućava dodatnu analizu.

Na slici 5.13 prikazani su „hourglass“ modovi za izračune brzine deformacije čvrstog 8 čvornog elementa, LS Dyna manual 2017. [68].

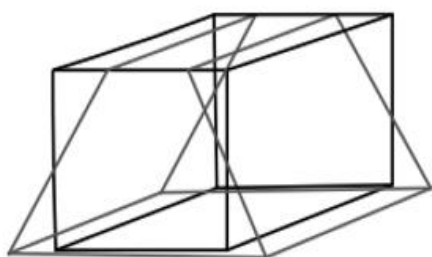
$$\dot{\epsilon}_{ij} = 0,$$



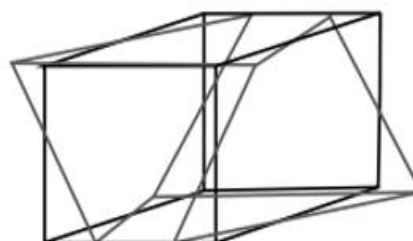
1k



2k



3k



4k

Slika 5.13 „Hourglass“ modovi osmočvornog konačnog elementa s jednom integracijskom točkom [65]

## 6 NUMERIČKO MODELIRANJE PODVODNE EKSPLOZIJE

Numeričko modeliranje i simulacije podvodne eksplozije provedene su u računalnom programu LS Dyna. Numeričkim simulacijama, na odabranim modelima, istražene su sposobnosti računalnog programa u modeliranju podvodne eksplozije te primjenu u inženjerskim proračunima.

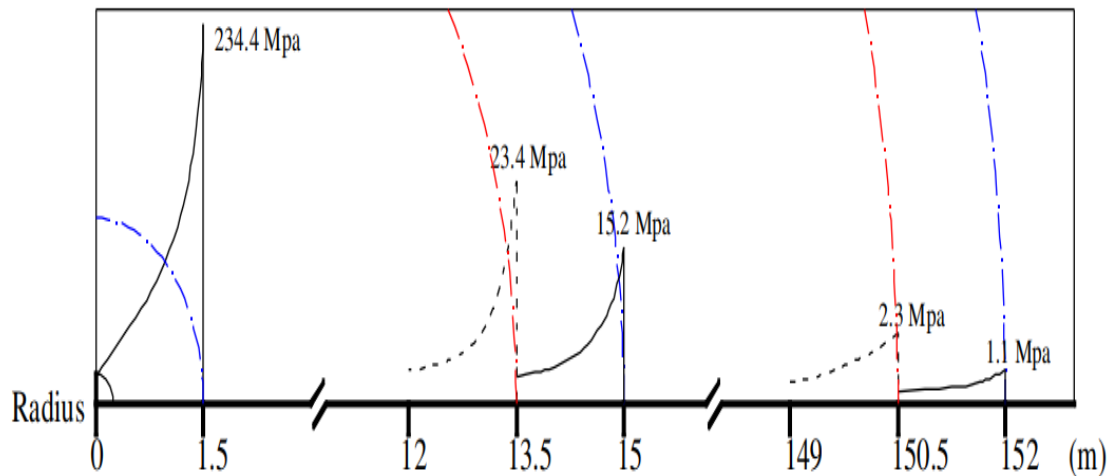
U prvom dijelu istraživanja ispitana je mogućnost smanjivanja analiziranog područja vode kako bi se postigle redukcije i racionalizacije numeričkog modela te verifikacije modela, a zatim je u drugom dijelu nastavljeno istraživanje podvodne eksplozije na više serija i grupa numeričkih modela. Istraživanjem je obuhvaćeno:

- utjecaj dubine eksplozivnog punjenja na ukupni tlak,
- utjecaj oblika i veličine prostora vode na rezultate tlaka,
- utjecaj veličine konačnih elemenata eksploziva na rezultate tlaka,
- utjecaj veličine konačnih elemenata vode na rezultate tlaka,
- utjecaj veličine konačnih elemenata i prostora vode na rezultate tlaka,
- utjecaj veličine konačnih elemenata na brzinu širenja udarnog vala,
- utjecaj oblika eksplozivnog punjenja na rezultate tlaka,
- podvodna eksplozija u neograničenoj sredini (engl. *free field*),
- podvodna eksplozija ograničena slobodnom površinom vode,
- podvodna eksplozija ograničena dnom,
- podvodna eksplozija ograničena slobodnom površinom vode i dnom,
- interakcija podvodne eksplozije i konstrukcije te
- interakcija podvodne eksplozije i betonske gravitacijske brane.

### 6.1 Eksperimentalni rezultati tlaka podvodne eksplozije

U literaturi [3], [15], i [40] navedeni su eksperimentalni rezultati maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala za eksplozivni naboj od eksploziva TNT-a, na određenim udaljenostima od središta eksplozije.

Na slici 6.1 prikazani su eksperimentalni rezultati vrijednosti maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala za eksplozivni naboj TNT-a, mase  $W=136,08$  kg (300 lb), oblika kugle, na određenim udaljenostima od središta eksplozije  $R$ .



Slika 6.1 Eksperimentalne vrijednosti maksimalnog tlaka na određenim udaljenostima [40]

Također, za provjeru ispravnosti numeričkog modela i postupka pored spomenutih diskretnih eksperimentalnih rezultata korišteni su i rezultati maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala dobiveni pomoću empirijskog izraza.

Empirijski izraz za određivanje vrijednosti tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj sredini, koje je predložio Cole [3], kao što je već ranije navedeno je:

$$p_m(R) = K_1 \left( \frac{(\sqrt[3]{W})}{R} \right)^{A_1} \text{ (MPa)}, \quad (6.1)$$

gdje je:

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (m),

$W$  - masa eksploziva (kg) i

$K_1$  i  $A_1$  koeficijenti.

U ovom radu i tablici 6.1 za potrebe proračuna maksimalne vrijednosti tlaka prema empirijskom izrazu (6.1) usvojene su sljedeće vrijednosti koeficijenata:  $K_1 = 52,39$  i  $A_1 = 1,13$ . Koeficijente, empirijski izraz (6.1) i eksperimentalne rezultate (slika 6.1) predložio je Cole, za količinu eksploziva 136,08 kg oblika kugle. Upravo ta količina i oblik eksploziva koristi se u numeričkom modeliranju, u ovom radu. Dobiveni numerički rezultati su verificirani s empirijskim i rezultatima dobivenim pomoću empirijskog izraza i eksperimentalnih rezultata [42].

Utjecaj atmosferskog i hidrostatičkog tlaka u empirijskim izrazima je zanemaren kao i kod numeričkih modela.

Tablici 6.1 Vrijednosti maksimalnog tlaka udarnog vala na određenim udaljenostima

R (m)	W (kg)	$K_1$	$A_1$	$P_m$ (MPa)	$P_m$ Eksperiment (MPa)	Odstupanje (%)
1,50	136,08	52,39	1,13	210,86	234,4	10,04
6,00	136,08	52,39	1,13	44,02		
7,00	136,08	52,39	1,13	36,98		
8,00	136,08	52,39	1,13	31,80		
9,00	136,08	52,39	1,13	27,84		
10,00	136,08	52,39	1,13	24,72		
11,00	136,08	52,39	1,13	22,19		
12,00	136,08	52,39	1,13	20,11		
13,50	136,08	52,39	1,13	17,61	23,4	24,75
14,00	136,08	52,39	1,13	16,90		
15,00	136,08	52,39	1,13	15,63	15,2	-2,84
16,00	136,08	52,39	1,13	14,53		
17,00	136,08	52,39	1,13	13,57		
18,00	136,08	52,39	1,13	12,72		
19,00	136,08	52,39	1,13	11,97		
20,00	136,08	52,39	1,13	11,29		
30,00	136,08	52,39	1,13	7,14		
40,00	136,08	52,39	1,13	5,16		
50,00	136,08	52,39	1,13	4,01		
151,00	136,08	52,39	1,13	1,15	2,3	50,00
152,00	136,08	52,39	1,13	1,14	1,1	-3,78

U tablici 6.1 prikazane su vrijednosti maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala podvodne eksplozije, na određenim udaljenostima od središta eksplozije, dobivene pomoću usvojenog empirijskog izraza (6.1), i vrijednosti tlaka dobivene eksperimentima.

Također je prikazano relativno odstupanje rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza i eksperimenta. Korišten je usvojeni empirijski izraz (6.1) i koeficijenti ( $A_1$  i  $K_1$ ) za izračun maksimalne vrijednosti tlaka na fronti udarnog vala na određenoj udaljenosti od središta eksplozije iz literature [3] i [42].



Na slici 6.1 se vidi, kako maksimalna vrijednost tlaka opada eksponencijalno s udaljenošću. Također se vidi odstupanje od „principa sličnosti“ odnosno zakona skaliranja. Prema spomenutom principu, deset puta manji tlak bi se trebao pojaviti na deset puta većoj udaljenosti od središta eksplozije. Međutim očekivani tlak se pojavljuje na manjoj udaljenosti, tj. na udaljenosti od 13,5 m, umjesto na udaljenosti od 15 m.

Dijagram na slici 6.1 odnosi se na točno određenu količinu i oblik eksplozivnog punjenja (kugla mase 136,08 kg), pa je prirodno zapitati kakav zaključak možemo izvući za neki drugi oblik i količinu eksploziva. Drugim riječima, koji se zakon skaliranja može primijeniti [3]?

Udarni val se ponaša po „principu sličnosti“ i zakonu skaliranja, koji kaže ako se količina eksplozivnog punjenja pomnoži s faktorom  $k$ , tlak će biti nepromijenjen na udaljenosti pomnoženoj s faktor  $k$  [3].

Ispravnost načela ovisi, pored ostalog i o pretpostavci kako nikakve vanjske sile ne djeluju na sustav. Gravitacijska sila je vanjska sila koja je uvijek prisutna kod podvodne eksplozije. Nevažno je što je ona relativno mala u usporedbi s unutarnjim silama koje uzrokuju generiranje i širenje udarnog vala, ali se njen učinak ne može zanemariti kao i u ponašanju plinovitih produkata eksplozije. Stoga, navedeni „princip sličnosti“ i zakon skaliranja se ne odnose na pojave nastanka i širenja udarnog vala podvodne eksplozije [3].

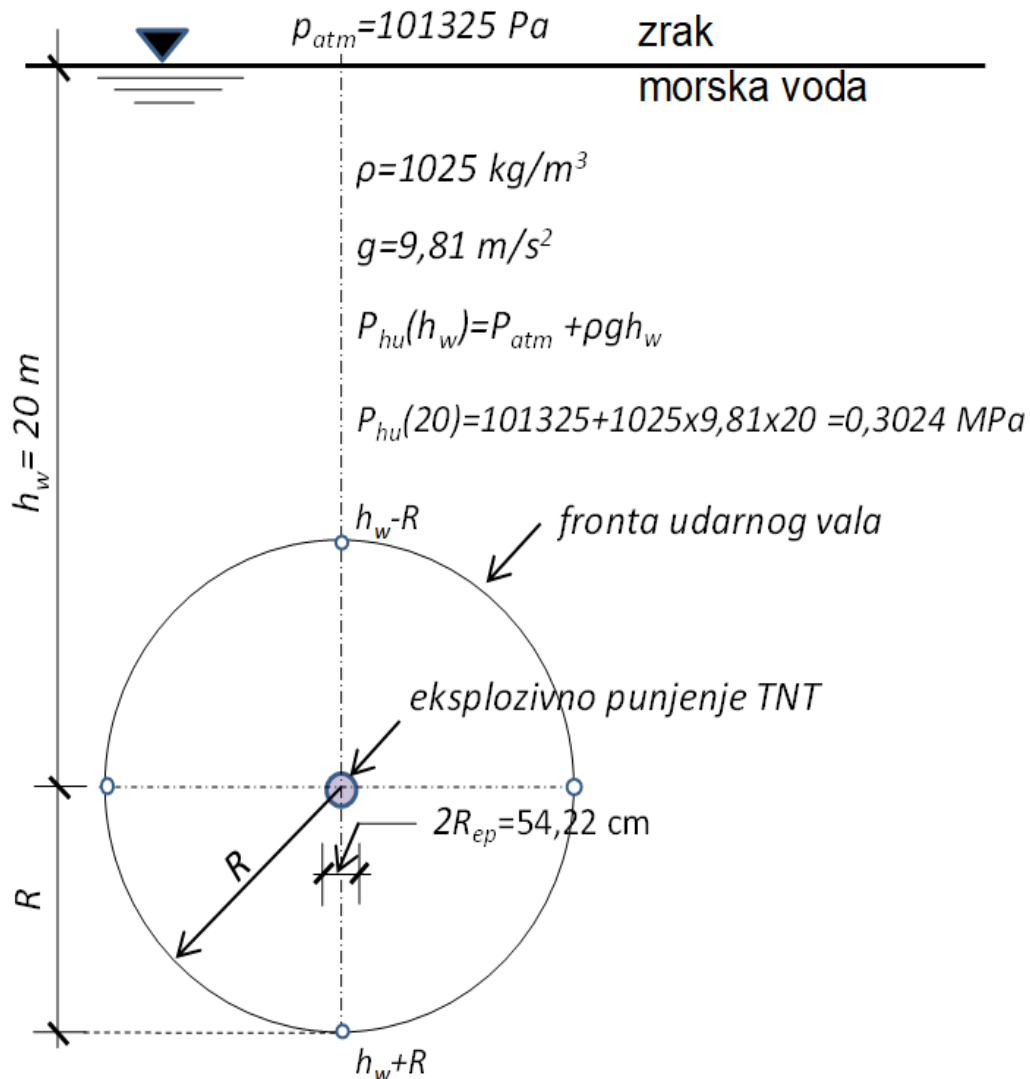
Količina eksploziva koja je korištena tijekom numeričkih istraživanja je 136,08 kg, oblika kugle, što je preuzeto iz literature [3] jer postoje eksperimentalni rezultati tlaka, na nekim udaljenostima (vidjeti sliku 6.1), koji su uz rezultate dobivene pomoću empirijskih izraza (vidjeti tablicu 6.1) korišteni za usporedbu s numeričkim rezultatima i ocjenjivanje numeričkih rezultata i postupka.

## 6.2 Utjecaj dubine eksplozivnog punjenja na ukupni tlak

Središte eksplozivnog naboja je na dubini 20 m, eksplozivno punjenje je TNT, oblik punjenja je kugla, promjer punjenja je 54,22 cm, a masa eksplozivnog naboja je 136,08 kg.

Podvodna eksplozija se odvija na određenoj dubini vode, koja može biti različita, a ovisi o učincima koje želimo postići. Hidrostatički tlak je posljedica gravitacijskog ubrzanja, koje u masi stupca vode generira silu. Veličina hidrostatičkog tlaka, ovisi o više parametara, što je detaljnije opisano u poglavlju 3.7. Svakako treba istaknuti kako su te sile manje u zraku nego u vodi zbog velike razlike u gustoći.

Na slici 6.2 prikazano je djelovanje hidrostatičkog tlaka i podvodne eksplozije.



Slika 6.2 Utjecaj djelovanja hidrostatičkog tlaka na podvodnu eksploziju [37]

Na površini vode djeluje tlak zraka, koji pritišće površinu vode, a njegova veličina, pored ostalih faktora, ovisi o visini stupca zraka i tlak je najviši na razini mora. Ukupni hidrostatički tlak na određenoj dubini dobije se prema izrazu koji je dan na slici 6.2, gdje je prikazan izračun hidrostatičkog tlaka za dubinu središta eksplozije od 20 m.

Udarni valovi podvodne eksplozije se šire sferno u prostoru vode tako da na određenom frontu udarnog vala oblika kugle djeluju različite vrijednosti hidrostatičkog tlaka jer se nalaze na različitim dubinama, osim točaka u horizontalnim ravninama, koje se nalaze na istim dubinama. Najmanji hidrostatički tlak je na plicem polu, bliže površini ( $h_w - R$ ) promatrane kugle koju formira fronta udarnog vala. Najveći hidrostatički tlak je na dubljem polu ( $h_w + R$ ) promatrane kugle koju formira fronta udarnog vala. Srednja vrijednost hidrostatičkog tlaka je na horizontalnoj ravnini koja prolazi kroz središte eksplozivnog naboja.

Podvodna eksplozija se odvija na određenoj dubini, gdje se uslijed detonacije eksploziva generira hidrodinamičko nestacionarno eksplozivno polje, koje se naglo širi u prostor vode i troši nastalu ogromnu količinu energije. U prostoru vode također, istovremeno, djeluje stacionarno konzervativno gravitacijsko polje, koje uzrokuje stalno djelovanje hidrostatičkog tlaka u svim točkama polja i u svim smjerovima. Veličina hidrostatičkog tlaka za određenu nadmorsku visinu i tekućinu te ostale uvjete ovisi o dubini i konstantna je u vremenu. Pojave u promatranom prostoru podvodne eksplozije su rezultirajuće djelovanje eksplozivnog i gravitacijskog polja.

U tablici 6.2 prikazane su vrijednosti maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala od podvodne eksplozije i hidrostatičkog tlaka, na horizontalnoj osi, koja prolazi kroz središte eksplozivnog punjenja. Za izračun vrijednosti maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala i hidrostatičkog tlaka korištene su prethodno spomenute relacije.

Prikazane vrijednosti maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala na određenim udaljenostima od središta eksplozije ( $R=1,5$  m; 2 m; 5 m i 10 m), vrijednosti hidrostatičkog tlaka na različitim dubinama u horizontalnoj ravnini. Za izračun tlaka udarnog vala korišten je usvojeni empirijski izraz (6.1) i koeficijenti  $K_1=52,4$  i  $A_1=1,13$  [42], za eksplozivni naboj TNT, oblika kugle i mase 136,08 kg.

Tablica 6.2 Vrijednosti tlaka na frontu udarnog vala i hidrostatički tlak

Dubina $D$ (m)	Hidrostatički tlak $P_w$ (MPa)	$R=1,5$ m		$R=2$ m		$R=5$ m		$R=10$ m	
		$P_m$ (MPa)	$100 \frac{P_w}{P_m}$ (%)	$P_m$ (MPa)	$100 \frac{P_w}{P_m}$ (%)	$P_m$ (MPa)	$100 \frac{P_w}{P_m}$ (%)	$P_m$ (MPa)	$100 \frac{P_w}{P_m}$ (%)
5	0,152	210,86	0,072	152,34	0,100	54,09	0,280	24,72	0,291
6	0,162	210,86	0,077	152,34	0,106	72,66	0,222	24,72	0,310
7	0,172	210,86	0,081	152,34	0,113	72,66	0,236	24,72	0,329
8	0,182	210,86	0,086	152,34	0,119	72,66	0,250	24,72	0,349
9	0,192	210,86	0,091	152,34	0,126	72,66	0,264	24,72	0,368
10	0,202	210,86	0,096	152,34	0,133	72,66	0,278	24,72	0,387
11	0,212	210,86	0,101	152,34	0,139	72,66	0,292	24,72	0,407
12	0,222	210,86	0,105	152,34	0,146	72,66	0,305	24,72	0,426
13	0,232	210,86	0,110	152,34	0,152	72,66	0,319	24,72	0,445
14	0,242	210,86	0,115	152,34	0,159	72,66	0,333	24,72	0,465
15	0,252	210,86	0,120	152,34	0,166	72,66	0,347	24,72	0,484
16	0,262	210,86	0,124	152,34	0,172	72,66	0,361	24,72	0,503
17	0,272	210,86	0,129	152,34	0,179	72,66	0,375	24,72	0,522
18	0,282	210,86	0,134	152,34	0,185	72,66	0,389	24,72	0,542
19	0,292	210,86	0,139	152,34	0,192	72,66	0,402	24,72	0,561
20	0,302	210,86	0,143	152,34	0,199	72,66	0,416	24,72	0,580
21	0,312	210,86	0,148	152,34	0,205	72,66	0,430	24,72	0,600
22	0,323	210,86	0,153	152,34	0,212	72,66	0,444	24,72	0,619
23	0,333	210,86	0,158	152,34	0,218	72,66	0,458	24,72	0,638
24	0,343	210,86	0,163	152,34	0,225	72,66	0,472	24,72	0,657
25	0,353	210,86	0,167	152,34	0,232	72,66	0,485	24,72	0,677

Za svaku udaljenost od središta eksplozije prikazan je maksimalni tlak udarnog vala dobiven pomoću empirijskog izraza i hidrostatički tlak na različitim dubinama te postotak hidrostatičkog tlaka u odnosu na maksimalni tlak udarnog vala. U tablici se vidi očekivani porast hidrostatičkog tlaka s porastom dubine i opadanje maksimalnog tlaka udarnog vala s povećanjem udaljenosti od središta eksplozije ( $R$ ). Postotak se povećava s povećanjem dubine jer se povećava hidrostatički tlak kao i zbog smanjenja maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala s povećanjem udaljenosti od središta eksplozije.

Najveći postotak na promatranoj maksimalnoj dubini i na najvećoj udaljenosti od središta eksplozije je 0,677 %. Vrijednost tlaka na frontu udarnog vala je 24,72 MPa, a hidrostatički tlak je 0,353 MPa. S obzirom na odnos vrijednosti tlakova, može se zaključiti kako je hidrostatički tlak zanemariv za ukupno djelovanje podvodne eksplozije na podvodne građevine.

## 6.3 Numeričko modeliranje podvodne eksplozije u neograničenoj sredini

### 6.3.1 Opis numeričkog postupka i pretpostavke

Podvodna eksplozija u neograničenoj sredini, kao što je prethodno opisano, odvija se bez utjecaja ograničenja širenju udarnog vala, koji se slobodno širi u promatranom prostoru vode. Ograničenja širenju udarnog vala predstavljaju slobodna površina vode, dno ili neka druga prepreka ili promjena od koje se dijelom ili u potpunosti reflektira udarni val.

Prethodno u radu je dan kratak opis nastanka i djelovanja podvodne eksplozije kao fizikalne pojave te su prikazani neki rezultati eksperimentalnih istraživanja i usvojena empirijska matematička formulacija za određivanje djelovanja podvodne eksplozije (izraz 6.1, usvojeni koeficijenti ( $K_1=52,39$  i  $A_1=1,13$ ) i eksperimentalni rezultati slika 6.2 [3].

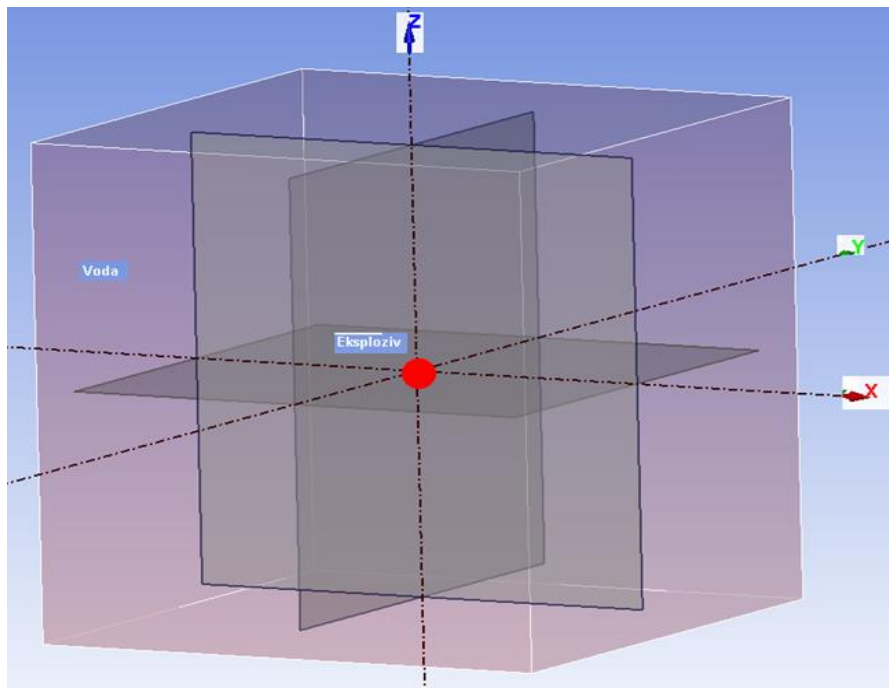
Svi numerički modeli su razvijeni u prostoru 3D, konačni elementi vode, zraka i betona su prizmatičnog oblika (kocka, kvadar, prizma), a eksploziva prema postavkama računalnog programa.

U nastavku rada razvijeno je više numeričkih modela i provedene su numeričke simulacije podvodne eksplozije u računalnom programu LS Dyna, u cilju ocjene sposobnosti numeričkog modeliranja i proračuna podvodne eksplozije za potrebe istraživanja i inženjerskih proračuna. Dobiveni rezultati numeričkih postupaka su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima i rezultatima dobivenim pomoću empirijskog izraza kako bi se provjerila i potvrdila ispravnost modela i modeliranja podvodne eksplozije, u računalnom programu LS Dyna. Ispravnost postupka uz određena odstupanja numeričkih i eksperimentalnih rezultata omogućava primjenu postupka u praktičnom inženjerskom proračunu podvodne eksplozije pri projektiranju obalnih i hidrotehničkih građevina i infrastrukture te daljnjem istraživanju.

### 6.3.2 Pretpostavke numeričkog postupka

Modeliranje podvodne eksplozije u neograničenoj sredini provodi se uz pretpostavke homogenosti i izotropnosti eksploziva i vode te simetričnosti kugle eksploziva uronjenog u središte promatranog volumena vode. Zanemaren je atmosferski i hidrostatički tlak, a pretpostavlja se kako je promatrani volumen vode bez mjehurića zraka i ima ujednačenu gustoću i temperaturu. Pretpostavlja se kako su osigurani preduvjeti za istovremenu detonaciju eksplozivnog punjenja. Koriste se tri ravnine simetrije koje se sijeku i formiraju koordinatne osi što omogućava analizu samo 1/8 prostora vode i eksploziva. Središte kugle eksploziva i promatranog prostora (volumena) vode je u ishodištu koordinatnog sustava. Definiranje interakcije na kontaktu ploha u ravninama simetrije između promatranog dijela prostora i okoline zbog simetričnosti, homogenosti i izotropnosti rješava se zadavanjem rubnih uvjeta.

Na slici 6. 3 prikazan je globalni prostorni model podvodne eksplozije u neograničenoj sredini.

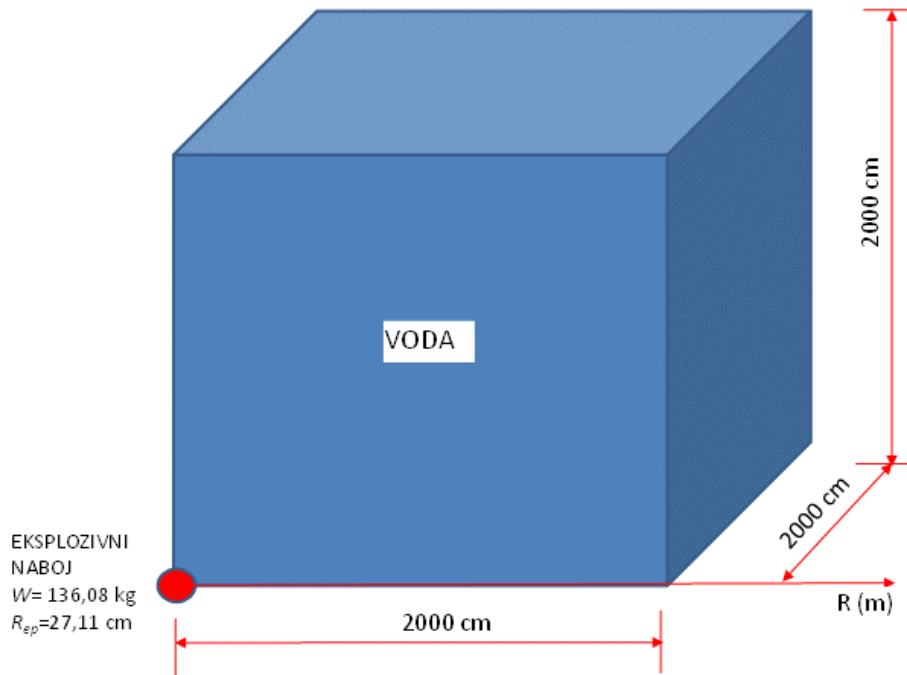


Slika 6.3 Globalni prostorni model podvodne eksplozije

Za istraživanje djelovanja podvodne eksplozije nadalje koristit će se 1/8 ukupnog promatranog (globalnog) volumena vode s duljinom brida kocke 20 m, koja je polovina od duljine brida kocke globalnog prostornog modela.

Ova duljina je uzeta kao prihvatljiva udaljenost na kojoj se očekuje potencijalno djelovanje podvodne eksplozije na podvodne građevine. Za ovo područje postoje tri poznate eksperimentalne vrijednosti maksimalnog tlaka (1,5 m; 13,5 m i 15 m), a također se mogu dobiti vrijednosti maksimalnog tlaka pomoću usvojenog empirijskog izraza.

Udaljenost je također određena na temelju predviđenih tehničkih mogućnosti, odnosno kapaciteta memorijskog prostora raspoloživog računala. Pripremljen je osnovni model podvodne eksplozije, koji se sastoji od: potpunog eksplozivnog naboja oblika kugle, mase 136,08 kg, radijus kugle 27,11 cm i 1/8 volumena vode oblika kocke s duljinom brida 20 m, model je prikazan na slici 6.4.



Slika 6.4 Reducirani model podvodne eksplozije, prostor vode kocka, brida 2000 cm

### 6.3.3 Osnovni elementi numeričkog modela podvodne eksplozije

Modeliranje podvodne eksplozije u računalnom programu LS Dyna zahtijeva, pored geometrijskih elemenata i definiranje vrijednosti određenih parametara vode i eksploziva te ostalih elemenata, potrebnih za realizaciju numeričke simulacije [20], [37], [43], [16] i [66]:

Parametri vode:

Karakteristike za vodu, prikazane su tablici 6.3.

Tablica 6.3 Karakteristike materijala (MAT\_009-NULL) za vodu [66]

	Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	Tlak vodene pare (cm-g- $\mu$ s)	Dinamička viskoznost (cm-g- $\mu$ s)
Voda	1,0	-2,0 x10-4	8,822x10-12

Karakteristike jednadžbe stanja za vodu, prikazane su tablici 6.4.



Tablica 6.4 Podaci za jednadžbu stanja - EOS Gruneisen za vodu [66]

	Brzina zvuka (cm/ $\mu$ s)	S1 (-)	S2 (-)	S3 (-)	$\gamma_0$	A (-)	E0	V (-)
Voda	0,148	1,75	0	0	0,28	0	0	1,0

HOURLASS:  $Q_M=1,0 \cdot 10^{-6}$  [16].

Promatrano područje vode: prostor oblika kocke ili kvadra, ovisno o modelu.

Karakteristike za eksploziv, prikazane su tablici 6.5.

Tablica 6.5 Karakteristike materijala za eksploziv TNT [66]

	Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	Brzina detonacije (cm/ $\mu$ s)	Chapman-Jouget tlak (mbar)
TNT	1,63	0,784	0,26

Karakteristike jednadžbe stanja za eksploziv, prikazane su u tablici 6.6.

Tablica 6.6 Podaci za jednadžbu stanja - EOS JWL za eksploziv TNT [66]

JWL	A (mbar)	B (mbar)	R1	R2	$\omega$	E0 (mbar)	$V_0$
TNT	3,71	0,0323	4,15	0,95	0,3	0,043	1,0

Mjerne jedinice za unos podataka u računalni program LS Dyna su: cm, g,  $\mu$ s (mikrosekunda (zamjenska oznaka us)), 100000 mbar=1 MPa.

Eksploziv: TNT, mase  $W=136,08$  kg (300 lb), oblika kugle, polumjer kugle  $R_{ep}=27,11$  cm, [16], [58], [66] i [69].

Navedeni parametri vode i eksploziva su uzeti iz literature i bit će zadržani za sve daljnje analizirane modele. Eventualne promjene i dopune pojedinih parametara i karakteristike novih materijala bit će posebno naglašene navedene.

#### 6.3.4 Rubni uvjeti na graničnim ploham numeričkog modela

Nakon smanjenja prostora analize koristeći ravnine simetrije, daljnje smanjenje područja analize (volumen vode), u cilju postizanja zadovoljavajućih rezultata istraživanja, postiže se korištenjem mogućnosti zadavanja rubnih uvjeta (engl. *BOUNDARY*) u računalnom programu LS Dyna. U računalnom programu, pored ostalih, postoji mogućnost zadavanja rubnog uvjeta nepropusne granične plohe i propusne granične (rubne) plohe.

Rubni uvjet kod kojeg nema refleksije udarnog vala od rubne plohe odabranog promatranog područja vode (*BOUNDARY\_NON\_REFLECTION*) omogućava nesmetan prolaz udarnog vala kroz graničnu plohu i širenje i izvan promatranog područja bez refleksije. Ovako zadavanje rubnog uvjeta omogućava smanjenje promatranog područja vode s propusnim graničnim ploham, bez ograničenja, ovisno o zahtjevima modela i istraživanja.

Rubni uvjet kojim se ograničava daljnje širenje udarnog vala na graničnoj plohi promatranog područja vode (*BOUNDARY\_SPC\_SET\_(ID)*) (*SPC* - Single Point Constraint) onemogućava prolaz udarnog vala iz promatranog područja kroz graničnu plohu u vanjski prostor. Udarni val dolazi do granične plohe, a nakon toga se reflektira (odbija) od granične plohe i reflektirani val se širi u promatranom prostoru vode. Ovaj rubni uvjet se zadaje na ploham simetrije modela.

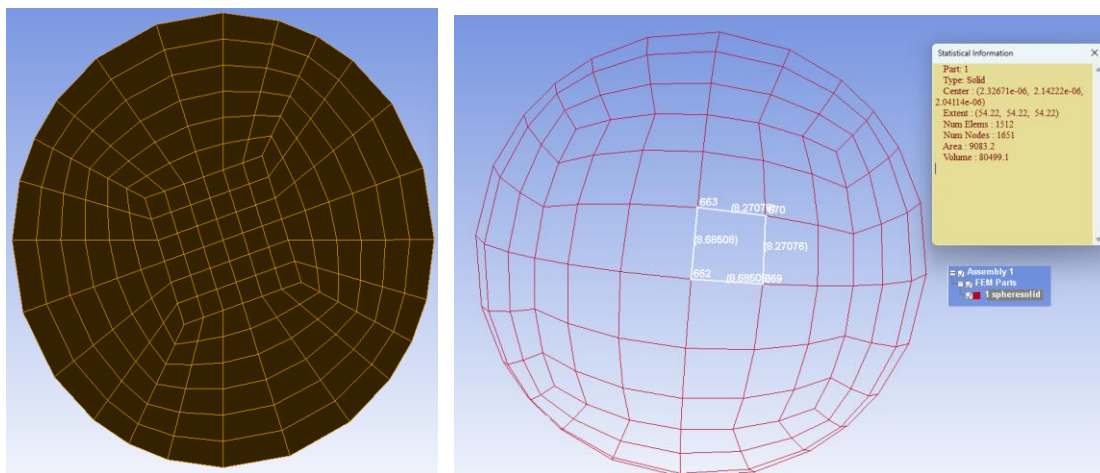
Nadalje, istraženo je ponašanje nepropusnih i propusnih graničnih ploha, promatranog prostora vode izloženih djelovanju udarnog vala. Za potrebe istraživanja pripremljeni su modeli:

- Model 1 - Volumen vode: kocka 20x20x20 m, propusne granične plohe, konačni elementi vode 25×25×25 cm, 512000 elemenata i
- Model 2 – Volumen vode: kocka 20x20x20m, nepropusne granične plohe, konačni elementi vode 25×25×25 cm, 512000 elemenata.

### 6.3.5 Diskretizacija eksplozivnog punjenja oblika kugle i vode oblika kocke

Računalni program LS Dyna (LS-Pre-Post(R) V4.9.4-17.May2022) automatski na poseban način provodi diskretizaciju prostora eksplozivnog punjenja u obliku kugle, nakon što se zadaju središte i radijus kugle eksploziva ( $R_{ep}=27,11$  cm) te gustoća diskretizacije eksploziva 6 (šest).

Na slici 6.5 prikazana je diskretizacija eksplozivnog naboja u obliku kugle.

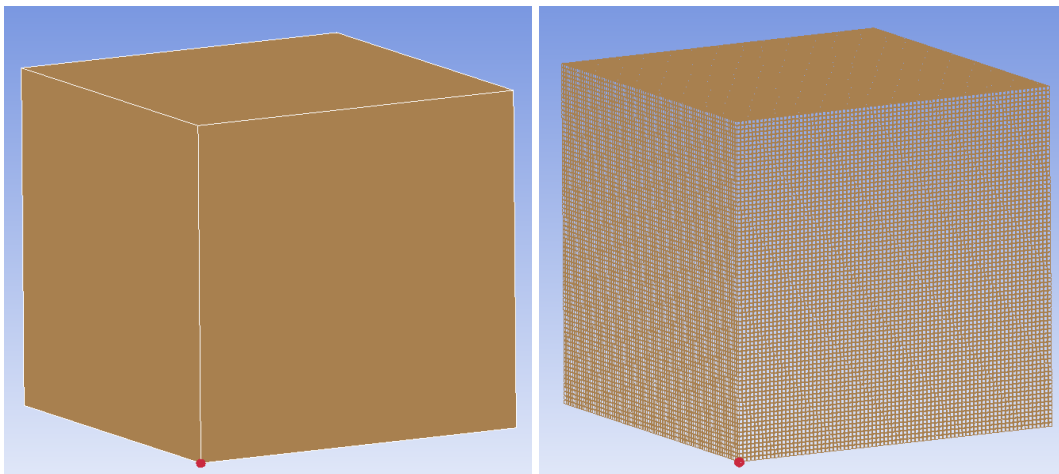


Slika 6.5 Diskretizacija eksploziva, presjek (lijevo) kroz središte i površina (desno), dimenzije plohe konačnog elementa na površini kugle i podaci o kugli

Na slici 6.5, lijevo, prikazan je raspored i oblik elemenata u presjeku kugle kroz središte kugle, a na slici 6.5, desno, prikazana je diskretizirana površina kugle i čvorovi elemenata na površini kugle, koji ima oblik prostornog četverokuta i kotirane su spojnice čvorova, duljina spojnica je 8,68508 cm i 8,27076 cm.

Kao što je prikazano na slici konačni elementi kugle nisu jednake veličine i oblika, a u ovom promatranom modelu broj konačnih elemenata eksploziva je 1513.

Promatrani prostor vode je oblika kocke, koja je diskretizirana s konačnim elementima oblika kocke duljine brida 25 cm. Kocka se u programu LS Dyna generira zadavanjem koordinata rubnih ploha po koordinatnim osima, a diskretizacija se postiže zadavanjem veličine ili broja konačnih elemenata po pojedinom bridu odnosno po koordinatnim osima.



Slika 6.6 Numerički model podvodne eksplozije i diskretizirani model (desno)

Na slici 6.6 prikazan je, prethodno opisani, numerički model i diskretizirani model za ispitivanje propusnosti graničnih ploha promatranog prostora vode.

#### 6.3.6 Odabir vremena trajanja numeričke simulacije

Pored veličine promatranog prostora vode odnosno broja konačnih elemenata i vrijeme trajanja numeričke simulacije podvodne eksplozije također je značajno i zahtjeva određeni memorijski kapacitet računala i vrijeme računanja pa se vrijeme nastoji maksimalno skratiti.

Potrebno vrijeme trajanja numeričke simulacije, se određuje računanjem potrebnog vremena za dolazak fronta udarnog vala do zahtijevane udaljenosti od središta eksplozije. Brzina udarnog vala, nakon kratkog početnog vremena, jednaka je brzini širenja zvuka u vodi [3]. Približno vrijeme trajanja numeričke simulacije podvodne eksplozije računa se korištenjem poznate željene udaljenosti od središta eksplozije i brzine širenja zvuka u vodi, oko 1500 m/s.

Vremenski korak tijekom proračuna je promjenjiv i program ga automatski generira.

Pored vremena trajanja simulacije razlikujemo vrijeme trajanja procesiranja – rješavanja numeričke računalne simulacije, koje ovisi o složenosti numeričkog modela (broju konačnih elemenata, zadanom vremenu trajanja, i sl.) i tehničkim karakteristikama računala, mogućnosti programa i dr.

### 6.3.7 Analiza rezultata dobivenih numeričkim postupkom

Važno je napomenuti, prije analize izlaznih rezultata numeričkog postupka tj. dijagrama promjene tlaka, kako se prilikom numeričkog proračuna u programu LS Dyna kao izlazni rezultati dobivaju određene diskretne vrijednosti parametara podvodne eksplozije u čvorovima (točkama), elementima, dijelovima domene, kompletnoj domeni promatranog diskretiziranog prostora (energija, pomaci, brzine, ubrzanja, tlak, naprezanja, deformacije i dr.).

Tako na primjer, dobivene numeričke vrijednosti tlaka u promatranom području su konstantne vrijednosti na čitavim konačnim elementima. Što znači kako se dobiva jedinstvena vrijednost tlaka, koja je jednaka na čitavom konačnom elementu. Za očitavanje vrijednosti tlaka odabire se element i dobije se dijagram vremenske promjene tlaka u odabranom konačnom elementu i brojčane ekstremne vrijednosti tlaka. Na dijagramu se može očitati vrijeme dolaska fronta udarnog vala do određenog elementa, vidjeti sliku 6.9.

Na temelju preuzetih izlaznih rezultata maksimalnih vrijednosti tlaka na frontu udarnog vala u pojedinim konačnim elementima crtaju se dijagrami promjene maksimalnog tlaka u ovisnosti od udaljenosti od središta eksplozije. Takav dijagram bi trebao biti stepenast, gdje bi širina stepenice bila dimenzija konačnog elementa, u promatranom smjeru.

Svakako, postoje i druge mogućnosti, pored prikaza tlaka kao stepenaste funkcije, moguće je pripremiti kontinuiranu – neprekinutu krivulju koja je glatka krivulja koja spaja točke, gdje su točke dobivene vrijednosti tlaka: na početku elementa, na sredini elementa, na kraju elementa ili pak srednja vrijednost od dva susjedna elementa.

Svakako da postoje određene razlike koje su veće ako su veće dimenzije konačnih elemenata. Također, razlike su najveće u početnom vremenu kad je gradijent opadanja tlaka vrlo velik, a manje pri manjim promjenama tlaka.

Treba istaći kako vrijednosti tlaka dobivene pomoću empirijskih izraza čine neprekinutu funkciju, a udaljenost od središta treba uzeti isto kao i kod aproksimacije rezultata tlaka dobivenih numeričkim postupkom.

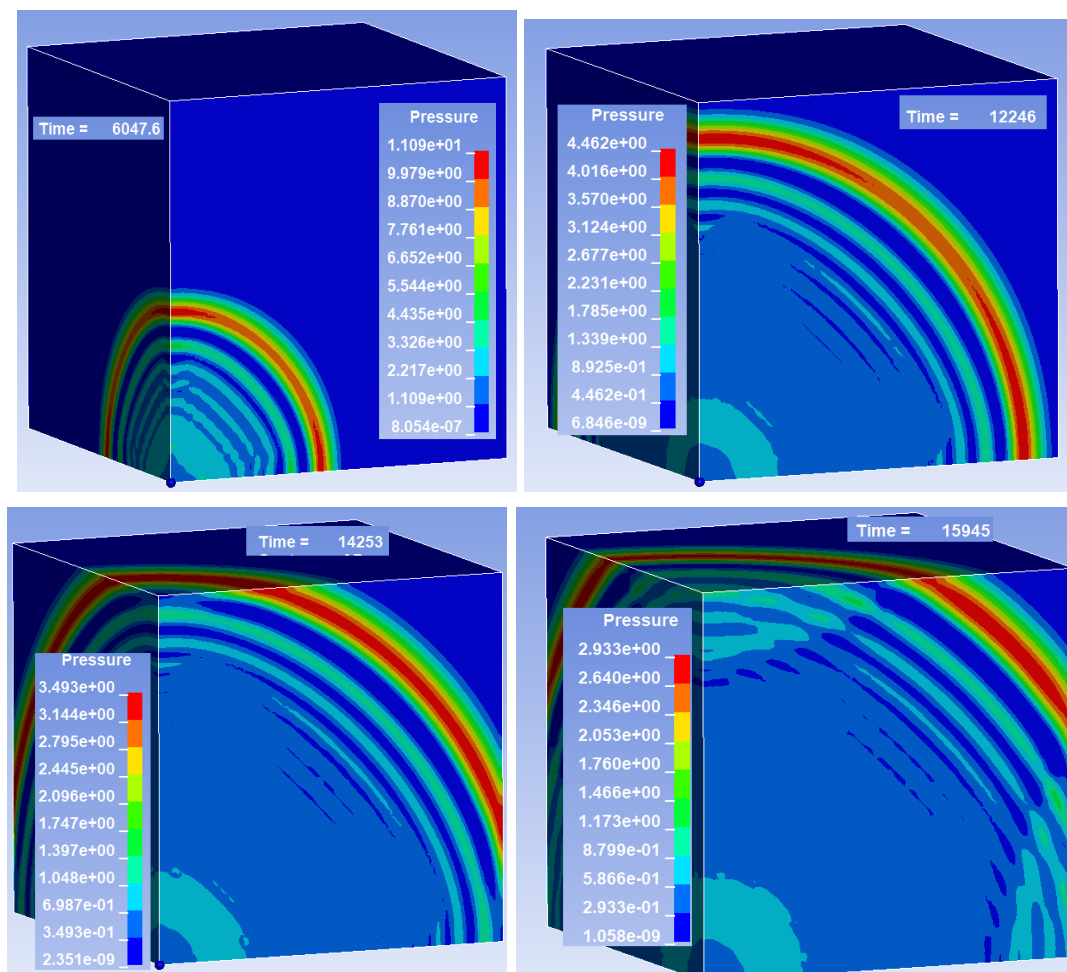
U ovom radu je korištena dobivena vrijednost na kraju konačnog elementa kako bi se dobila kontinuirana funkcija tlaka, na temelju diskretnih rezultata dobivenih pomoću programa LS Dyna.

#### 6.3.8 Rezultati numeričkog postupka dobiveni za različite rubne uvjete

Nakon provedenog numeričkog postupka na prethodno usvojenim modelima dobiveni su numerički rezultati za razne vrijednosti određenih parametara podvodne eksplozije u čvorovima, elementima i sl. Pored mogućnosti pregleda promjene pojedinih parametara u vremenu izlazni podaci omogućavaju pregled animacije podvodne eksplozije u nijansama različitih boja s različitim vrijednostima pojedinih parametara, vidjeti sliku 6.7.

Vrijeme trajanja postupka numeričkog proračuna je različito za pojedine modele i može trajati od desetak minuta do više od 10 sati. Veličina datoteke s ulaznim podacima i izlaznim rezultatima može biti od desetak do više od 285 GB.

Na slici 6.7 prikazano je širenje udarnog vala u promatranom volumenu vode za model podvodne eksplozije s propusnom granicom, model 1 20x20x20m\_nr. U nazivu modela nr pojašnjava da nema refleksije udarnog vala (NON\_REFLECTING).



Slika 6.7 Širenje udarnog vala u vodi u modelu s propusnom granicom

Na slici 6.7 prikazano je širenje fronte udarnog vala nakon eksplozije u prostoru vode gdje su granične plohe propusne. U trenutku  $6047,6 \mu\text{s}$  udarni val se nesmetano širi u prostoru vode, a u trenutku  $t=12246 \mu\text{s}$  prednji kraj udarnog vala se nalazi u blizini granične propusne plohe. Prednji kraj udarnog vala je prethodnica udarne fronte vala maksimalne vrijednosti tlaka u kojoj se tlak povećava od nule (zeleno na slici, ispred crvenog pojasa).

Nakon što prednji kraj udarnog vala udari u propusnu graničnu plohu, najprije na najkraćoj udaljenosti od središta eksplozije, nešto ranije od trenutka  $t=14253 \mu\text{s}$ , udarni val se i dalje nesmetano širi izvan promatranog prostora, a u trenutku  $t=15645 \mu\text{s}$  udarni val postepeno prolazi dijelovima graničnih ploha na većim udaljenostima od središta eksplozije.

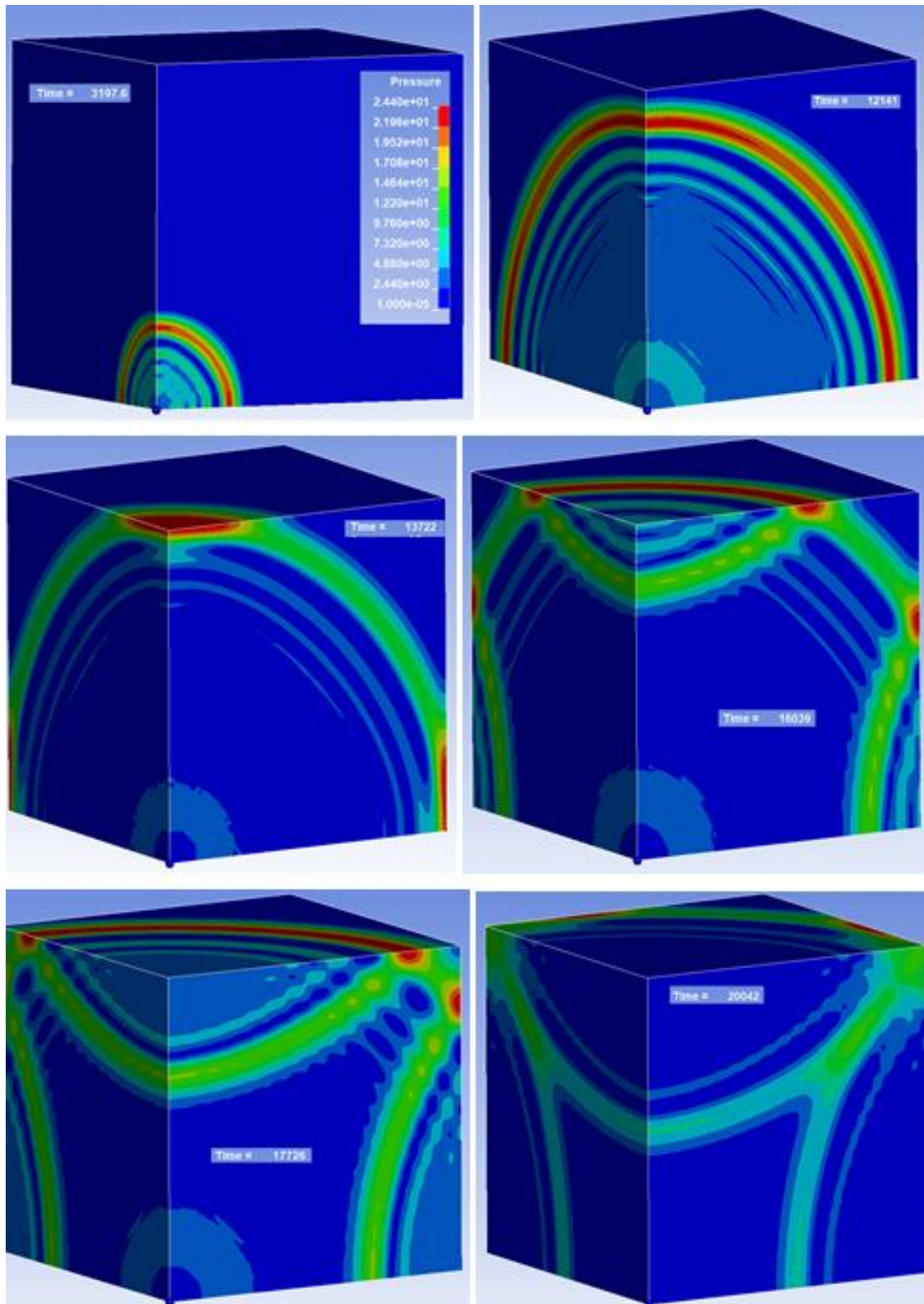
Kako je već spomenuto datoteke pojedinih modela zauzimaju značajan dio memorijskog prostora na računalu, a posebno pri pokretanju animacije pa otežava i povremeno blokira njegov rad.

Modeli veličine 175 GB i više su gotovo operativno neprihvatljivi za modeliranje i istraživanje podvodne eksplozije. Kod takvih modela, nakon proračuna omogućeno je preuzimanje krivulja tlak - vrijeme na određenim udaljenostima od središta eksplozije i sl. Animacija modela se može realizirati, uz odbacivanje eksploziva, vode, vrlo sporo i traje duže vrijeme. Kod većine modela, nakon preuzimanja potrebnih rezultata, iz datoteke se brišu izlazni rezultati kako bi se oslobodio memorijski prostor i omogućio daljnji rad na računalu. U slučaju potrebe očitavanja nekih drugih rezultata koje nismo preuzeli model se mora ponovno rješavati.

Tijekom istraživanja na numeričkim modelima u računalnom programu LS Dyna kod svih realiziranih modela, nakon uzimanja potrebnih podataka, brisani su svi dijelovi osim ulaznih podataka i očitanih rezultata.

Na slici 6.8 prikazano je širenje udarnog vala u promatranom volumenu vode za model podvodne eksplozije s nepropusnom granicom.





Slika 6.8 Širenje udarnog vala u vodi u modelu s nepropusnom granicom

Na slici 6.8 prikazano je širenje fronta udarnog vala nakon eksplozije u prostoru vode, u kojem su granične plohe nepropusne. U trenutku  $t=3197,6 \mu\text{s}$  val se nesmetano širi u prostoru vode. Na animaciji podvodne eksplozije vidi se kompletan model, vrijeme i skala s odabranim parametrom. U ovoj animaciji je odabrana vremenska promjena maksimalnog tlaka na fronti udarnog vala, koja je prikazana u različitim bojama i vrijednostima u MPa.

Prednji kraj udarnog vala, u trenutku  $t=12141 \mu\text{s}$ , se nalazi u blizini granične nepropusne plohe, na donjoj stranici prednje plohe kocke. Nakon što prednji kraj udarnog vala udari u nepropusnu graničnu plohu, u trenutku  $t=13722 \mu\text{s}$ , zbog zadanog rubnog uvjeta na graničnoj plohi koja ne dozvoljava gibanje čvorova na graničnoj plohi u smjeru koordinatne osi u pojedinom smjeru, udarni val se reflektira i raste tlak u prostoru vode.

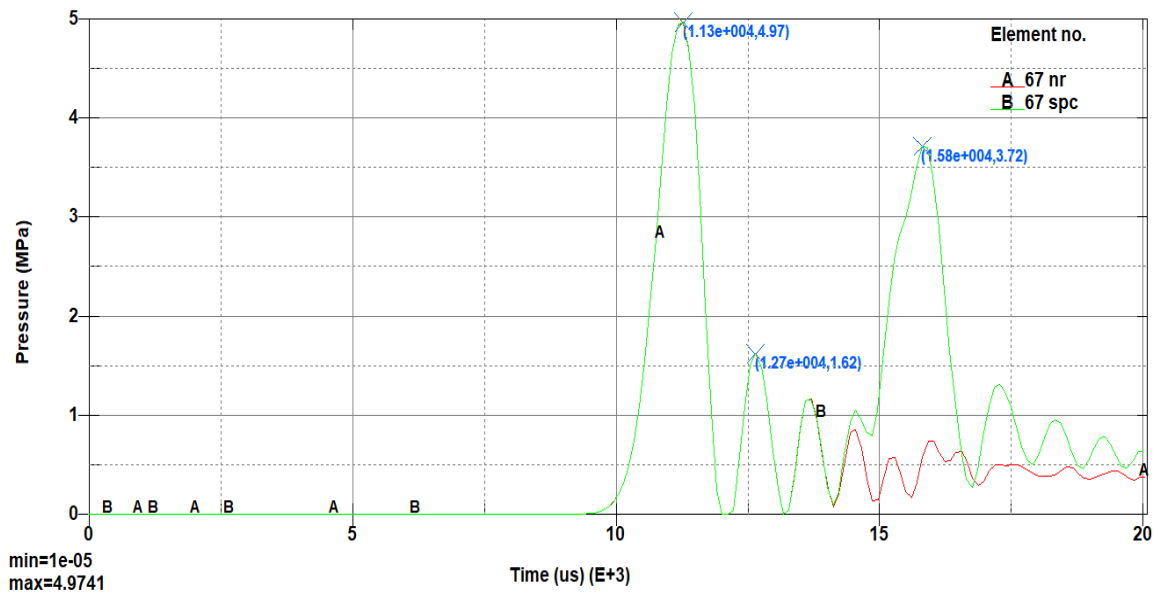
Nakon toga u trenutku  $t=16039 \mu\text{s}$  reflektirani val se širi u prostoru vode, a na dijelu, gdje je granična ploha na većoj udaljenosti, odvija se i dalje refleksija udarnog vala i na prednjoj plohi formira oblik sličan obliku gornjeg dijela boce (engl. *top of the bottle*), koja se sužava.

Nastavlja se i dalje širenje i refleksija udarnog vala i razmak između fronta reflektiranog vala se smanjuje i formira oblik sličan orašaru (klijesta koja služe za razbijanje oraha – (engl. *crack nuts*), u trenutku  $t=16039 \mu\text{s}$ , koji stiže.

U tom trenutku kad fronte donje i gornje grane udarnog vala dosegnu vrh prednje plohe kocke, na dijagonali, grane udarnog vala se spoje tj. sudare i proces se nastavlja duž dijagonale i formira se oblik sličan patentnom zatvaraču na odjeći (engl. *zip*), koji se zatvara.

### 6.3.9 Analiza rezultata tlaka dobivenih numeričkim postupkom

Na slici 6.9 su prikazani usporedni dijagrami tlaka za dva analizirana modela, koji su prethodno opisani, a razlikuju se po rubnim uvjetima, na prvom modelu su granične plohe propusne (nr), a na drugom modelu granične plohe promatranog prostora vode su nepropusne (spc), u elementu 67, na udaljenosti od 16,75 m, od centra eksplozije.



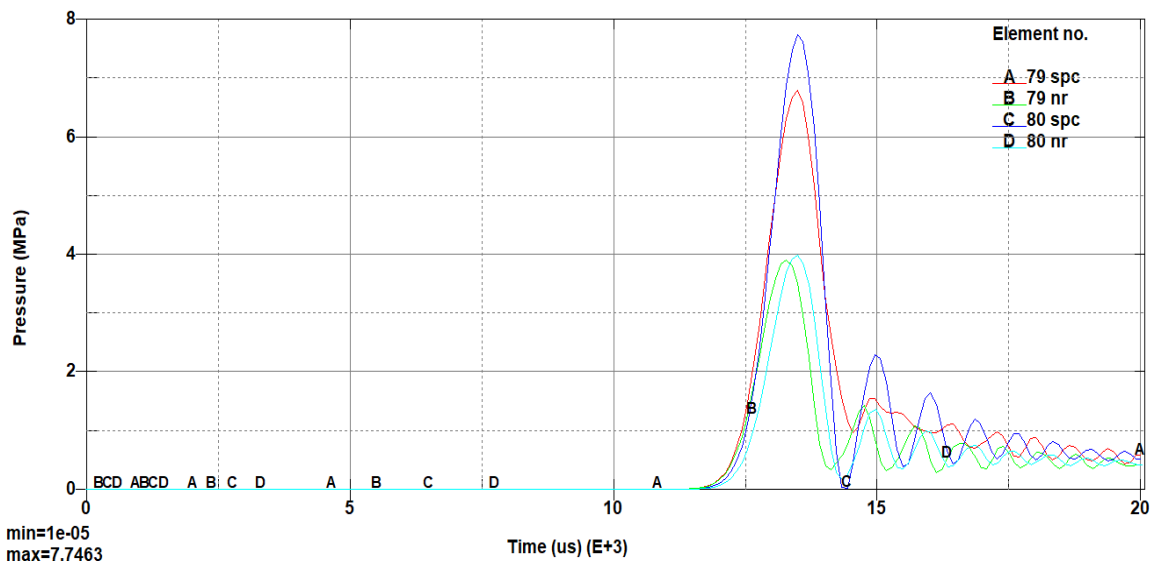
Slika 6.9 Usporedni prikaz promjene tlaka u smjeru propusne i nepropusne granične plohe

Na slici 6.9 dijagram A predstavlja maksimalni tlak na fronti udarnog vala na modelu podvodne eksplozije s propusnom graničnom plohom (NON\_REFLECTING).

Na slici 6.9, dijagram B predstavlja maksimalni tlak na fronti udarnog vala na modelu podvodne eksplozije s nepropusnom graničnom plohom (SPC), na kojoj nije omogućen prolaz udarnog vala izvan granične plohe promatranog prostora.

Na dijagramu A i B je vidljivo kako je maksimalna vrijednost udarnog vala identična, dijagrami A i B se preklapaju do  $t=13722 \mu\text{s}$  za udarni val s propusnom i nepropusnom granicom. Nakon toga vrijednost tlaka se za udarni val s nepropusnom granicom (B) povećava zbog utjecaja reflektiranog vala, koji se reflektira u vremenu oko  $13722 \mu\text{s}$ . Na dijagramu je na nekim odabranim ekstremnim vrijednostima dijagrama tlaka prikazano vrijeme i tlak. Maksimalna vrijednosti tlaka dijagrama A i B može se očitati za vrijeme  $11300 \mu\text{s}$  gdje je i tlak  $4,97 \text{ MPa}$ .

Na slici 6.10 su prikazani usporedni dijagrami tlaka za oba analizirana modela, koji su prethodno opisani, koji se razlikuju po rubnim uvjetima. Na prvom modelu granične plohe su propusne (nr), a na drugom modelu granične plohe su nepropusne (spc). Dijagrami promjene tlaka u elementima 79 i 80, na udaljenosti od  $19,75 \text{ m}$  i  $20 \text{ m}$ , od središta eksplozije.



Slika 6.10 Usporedni prikaz promjene tlaka u smjeru propusne i nepropusne granične plohe

Na slici 6.10 dijagram B i D predstavlja maksimalni tlak na fronti udarnog vala na modelu podvodne eksplozije s propusnom graničnom plohom (NON\_REFLECTING).

Na slici 6.10, dijagram A i C predstavlja maksimalni tlak na fronti udarnog vala na modelu podvodne eksplozije s nepropusnom graničnom plohom (SPC), na kojoj nije omogućen prolaz udarnog vala izvan granične plohe promatranog prostora. Na dijagramu A i C je vidljivo kako je maksimalna vrijednost tlaka udarnog vala značajno veća od vrijednosti udarnog vala s propusnom granicom. Vrijednost tlaka je veća zbog utjecaja reflektiranog udarnog vala od nepropusne granice.

Kao što je prethodno opisano, računalni program LS Dyna omogućava zadavanje rubnih uvjeta tako da su vanjske granične plohe propusne pa na vanjskim plohamo nema refleksije udarnog vala (NON\_REFLECTING). Pretpostavlja se kako ova činjenica omogućava daljnje smanjivanje promatranog područja vode, što će biti istraženo, u sljedećem dijelu.

### 6.3.10 Ovisnost numeričkih rezultata o obliku i veličini prostora vode

Prilikom numeričke analize podvodne eksplozije potrebno je odrediti geometriju pojedinih elemenata (voda i eksploziv) i provesti diskretizaciju eksploziva i promatranog područja vode s konačnim elementima određene veličine. Poseban izazov je prostor vode jer se radi o području značajno većih dimenzija od dimenzija

eksploziva, volumenom većim i do 100 puta, ovisno o modelu. S obzirom kako za određeni volumen vode, smanjivanjem veličine elementa vode, povećava se njihov broj i brzo se dolazi do graničnih vrijednosti, koju računalo može procesirati.

Kako je već prikazano, računalni program ima sposobnost zadavanja rubnih uvjeta gdje su granične vanjske plohe volumena vode propusne ili nepropusne. Udarni val podvodne eksplozije se širi sferno u prostor vode u svim smjerovima jednako, pa za promjenu tlaka na različitim udaljenostima od središta eksplozije dovoljno je pratiti u jednom pravcu.

Za potrebe istraživanja analiziran je prostor vode koji je u obliku kocke i četiri prostora vode u obliku kvadra, gdje je duljina duže stranice kvadra, u promatranom smjeru, jednaka duljini brida kocke.

Diskretizacija prostora vode je provedena na način da se zadaju koordinate graničnih ravnina prostora vode, po koordinatnim osima, a zatim se za svaku koordinatnu os, u istoj kartici za unos podataka, zadaje broj konačnih elemenata ili njihova veličina, vidjeti sliku 6.6 desno.

Za istraživanje prethodne pretpostavke razvijena je skupina numeričkih modela, kod kojih je područje vode oblika kocke i kvadara različitih dimenzija s različitim veličinama konačnih elemenata. Najduži brid kvadra je jednak duljini brida kocke i iznosi 20 m. Kapacitet računala podržava maksimalni prostor vode oblika kocke duljine brida 20 m koji je diskretiziran konačnim elementima oblika kocke minimalne duljine brida 25 cm i iznimno 20 cm.

Nadalje, za istraživanje, se koristi već pripremljeni i prezentirani model 1 i stvaraju se novi modeli. Kod svih modela usvojen je eksploziv TNT težine 136,08 kg, oblika kugle polumjera  $R_{ep}=27,11$  cm, eksploziv je diskretiziran s 1513 konačnih elemenata, gustoća diskretizacije 6.

Nadalje, bit će ukratko opisan postupak unosa podataka za numerički model, u ovom radu. Najprije se zadaju koordinate promatranog područja vode, na koordinatnim osima. Diskretizacija volumena vode je provedena u istoj kartici, gdje se unose dimenzije elemenata ili broj podjela u smjeru koordinatnih osi.

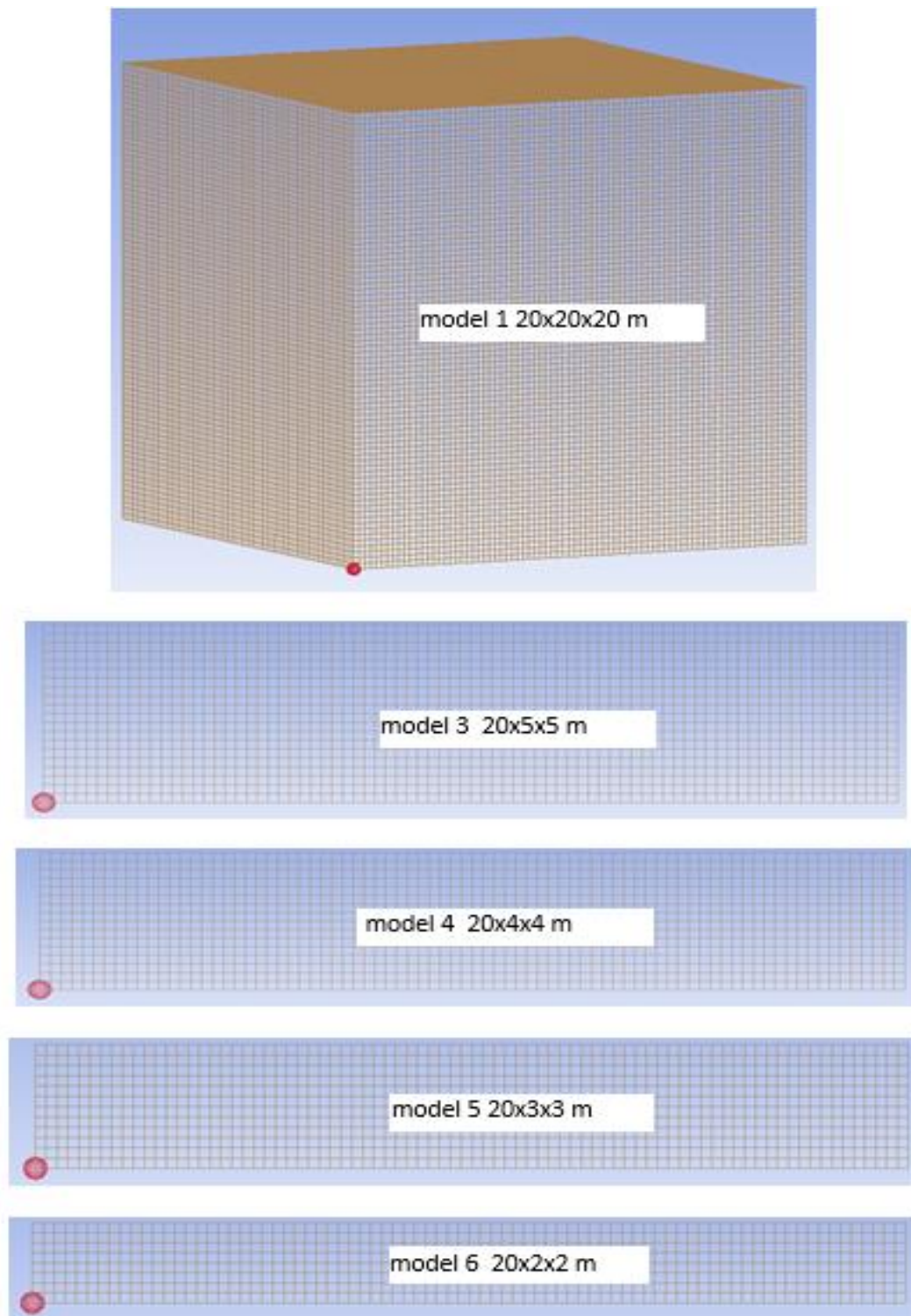
Kao što je već spomenuto za eksplozivni naboj oblika kugle program LS Dyna automatski diskretizira prostor eksplozivnog punjenja. Nakon unosa radijusa i koordinata središta kugle odabire se gustoća diskretizacije konačnim elementima, koja može biti: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, .... Odabirom veće gustoće diskretizacije povećava se broj konačnih elemenata eksploziva. Treba napomenuti kako su konačni elementi različitih veličina i oblika, što je prikazano na slici 6.5.

Temeljem prethodnih analiza rubnih ploha, autor ovog rada pretpostavlja da redukcija volumena vode od volumena kocke na volumen kvadra, neće značajno utjecati na dobivene rezultate tlaka, ali to svakako treba istražiti i dokazati. Ako se istraživanjem dokaže da su odstupanja u nekim prihvatljivim granicama to će omogućiti istraživanje na manjim modelima, uz manje korištenje kapaciteta računala.

Prva grupa numeričkih modela sastoji se od prethodno pripremljenog modela 1 i još novih pripremljenih sljedećih modela:

- Model 1 - Volumen vode: kocka 20x20x20 m, konačni elementi vode su dimenzija 25x25x25 cm, 51200 elemenata, ranije spomenut i analiziran u druge svrhe,,
- Model 3 - Volumen vode: kvadar 20x5x5 m, konačni elementi vode su dimenzija 25x25x25 cm, 32000 elemenata,
- Model 4 - Volumen vode: kvadar 20x4x4 m, konačni elementi vode su dimenzija 25x25x25 cm, 20480 elemenata,
- Model 5 - Volumen vode: kvadar 20x3x3 m, konačni elementi vode su dimenzija 25x25x25 cm, 11520 elemenata i
- Model 6 - Volumen vode: kvadar 20x2x2 m, konačni elementi vode su dimenzija 25x25x25 cm, 5120 elemenata.

Na slici 6.11 prikazani su prethodno opisani diskretizirani numerički modeli podvodne eksplozije.



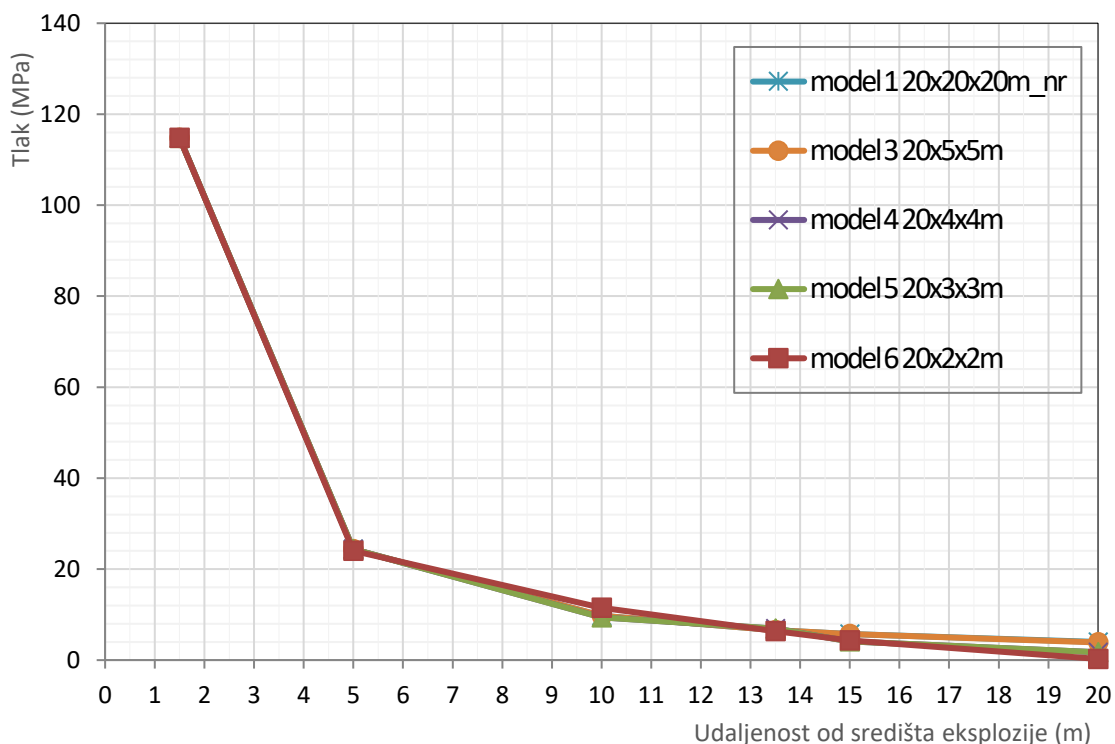
Slika 6.11 Diskretizirani modeli podvodne eksplozije raznih oblika i dimenzija

Nakon provedene numeričke simulacije, preuzeti su numerički rezultati za dijagram tlak - vrijeme, na udaljenostima: 1,5; 5,0; 10,0; 13,5; 15,0 i 20 m, od središta eksplozije. Na udaljenostima 1,5; 13,5 i 15,0 m, od središta eksplozije poznati su eksperimentalni

rezultati maksimalnog tlaka, kako je već ranije spomenuto [3], a udaljenosti 5,0; 10,0; 15,0 i 20,0 m su interpolirane vrijednosti dobivene pomoću empirijskog izraza, zbog veličine intervala.

Istraživanja podvodne eksplozije, u ovom radu, provodit će se na udaljenostima do 20 m od središta eksplozije. U ovom istraživanju nije težište na točnosti modela nego na istraživanju mogućnosti smanjenja volumena vode u modelu. Tako da neće biti primarno utvrđivanje odstupanja numeričkih od eksperimentalnih i vrijednosti dobivenih pomoću empirijskih izraza.

Na temelju dobivenih rezultata pripremljeno je pet dijagrama maksimalne vrijednosti tlaka, na različitim udaljenostima od središta eksplozije, za različite oblike i veličine volumena vode, veličine konačnih elemenata vode su 25x25x25 cm, koji su prikazani na slici 6.12.



Slika 6.12 Ovisnost tlaka o obliku i veličini volumena vode, konačni elementi vode 25x25x25 cm

Na slici 6.12 prikazani su dijagrami maksimalnog tlaka na temelju dobivenih numeričkih rezultata, na udaljenostima 1,5; 5,0; 10,0; 13,5; 15 i 20 m, za odabrane veličine i oblike volumena vode, veličina konačnih elemenata kod svih modela vode je 25x25x25 cm,



broj konačnih elemenata eksploziva je konstantan (1513 elemenata). Na slici nisu vidljiva veća odstupanja rezultata osim lokalno na udaljenosti 10 m i veća odstupanja na udaljenostima od 15 do 20 m. Na dijagramima su uočena apsolutna odstupanja koja izgledaju mala naročito na većim udaljenostima. Međutim relativna odstupanja su velika, što je prikazano u tablici.

U tablici 6.7 prikazani su dobiveni rezultati i relativno odstupanje rezultata tlaka za pojedine kvadre od rezultata tlaka za kocku.

Tablica 6.7 Vrijednosti maksimalnog tlaka za volumen vode oblika kocke i kvadara

Udalje- nost	Oblik i dimenzije promatranog prostora vode (elementi 25x25x25 cm)									
	Kocka 20x20x20 m	Kvadar 20x5x5			Kvadar 20x4x4		Kvadar 20x3x3		Kvadar 20x2x2	
	Tlak	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$	
(m)	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	%	(MPa)	%	(MPa)	%	
1,5	114,79	114,77	0,02	114,75	0,03	114,79	0,00	114,77	0,02	
5	24,41	24,38	0,11	24,36	0,19	24,38	0,13	24,04	1,50	
10	9,77	9,75	0,20	9,72	0,48	9,37	4,09	11,47	17,44	
13,5	6,60	6,58	0,30	6,47	1,94	6,95	-5,18	6,39	3,22	
15	5,76	5,71	0,80	5,55	3,60	4,12	28,48	4,31	25,15	
20	3,99	3,89	2,59	3,27	18,02	1,73	56,64	0,26	93,41	

U tablici je prikazano relativno odstupanje ( $\Delta$ ) maksimalnog tlaka za kvadre različitih veličina u odnosu na kocku. Postotak je dobiven od razlike tlaka kocke i pojedinog kvadra podijeljene s tlakom kocke i pomnožen sa 100. Vidljivo je kako promjena tj. smanjenje širine i visine promatranog prostora - volumena vode nema značajan utjecaj na rezultate maksimalnog tlaka udarnog vala na udaljenosti 1,5 m od središta eksplozije.

Relativno odstupanje maksimalne vrijednosti tlaka za kvadar dimenzija 15x3 x3 m je 0 % na udaljenosti 1,5 m, a na udaljenosti od 20 m 56,64 %. Relativno odstupanje tlaka na udaljenosti od 20 m za kvadar presjeka 5x5 m je 2,59 %, a za kvadar presjeka 4x4 m je 18,02 %. Povećanjem udaljenosti od središta eksplozije uglavnom se povećava postotak relativnog odstupanja tlaka kao i sa smanjenjem stranica presjeka kvadra odnosno volumena vode.

Dimenzije konačnih elemenata vode su 25x25x25 cm, a daljnje smanjenje veličine konačnih elemenata za promatrani prostor vode oblika kocke je vrlo zahtjevno zbog tehničkih ograničenja memorijskog kapaciteta računala. U radu je modeliranje podvodne eksplozije provedeno isključivo na 3D numeričkim modelima.

U istraživanju je utvrđeno kako model 2 - kvadar dimenzija 20x5x5 m ima najmanja odstupanja od vrijednosti maksimalnog tlaka dobivenog na modelu kocke dimenzija 20x20x20 m, od svih ostalih kvadara, na udaljenostima do 20 m. Maksimalno odstupanje je na udaljenosti od 20 m i iznosi 2,59 %.

Stoga, daljnja istraživanja utjecaja veličine konačnih elemenata na rezultate tlaka za kocku (dimenzija 20x20x20 m) i kvadar (dimenzija 20x5x5 m) će se nastaviti.

Također je vidljivo kako volumeni vode u obliku kvadra, ovisno o dimenzijama presjeka, daju prihvatljive rezultate maksimalnog tlaka, do određenih udaljenosti od središta eksplozije.

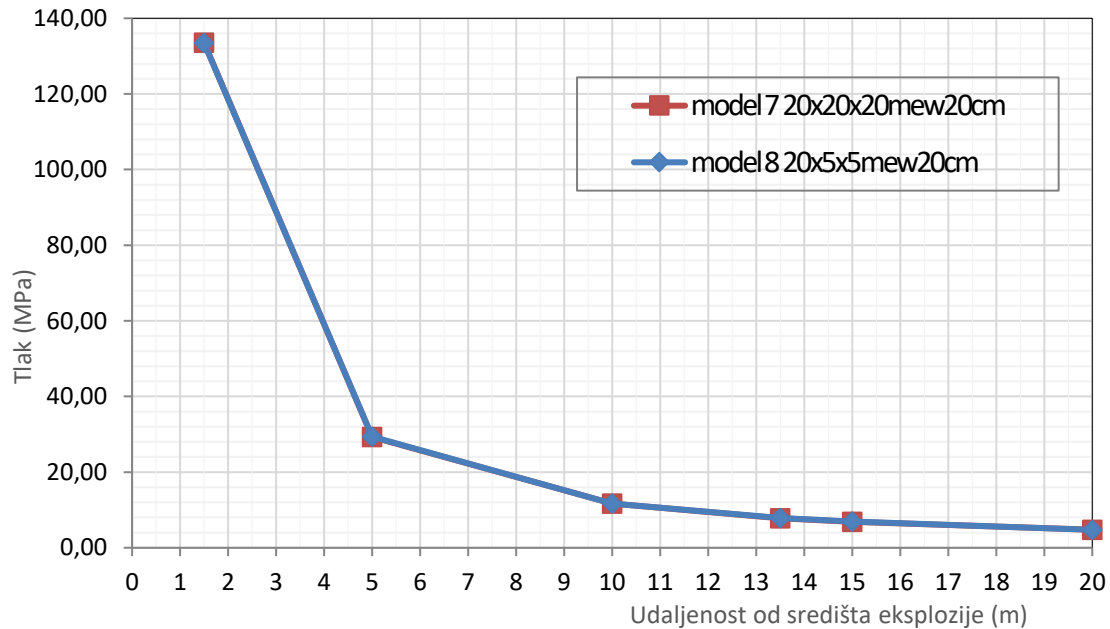
Kvadar presjeka 2x2 m daje prihvatljive rezultate na udaljenostima do 5 m, gdje je maksimalno odstupanje do 1,5 %. Kvadar presjeka 3x3 m daje prihvatljive rezultate na udaljenostima do 10 m, gdje je maksimalno odstupanje do 4,09 %. Kvadar presjeka 4x4 m daje prihvatljive rezultate na udaljenostima do 15 m, gdje je maksimalno odstupanje do 3,60 %.

Ovi rezultati se mogu koristiti pri pripremi modela podvodne eksplozije gdje se modelira djelovanje podvodne eksplozije do određene udaljenosti pri istraživanju i praktičnim inženjerskim proračunima djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine.

Istraživanje je nastavljeno uz promjenu dimenzija konačnih elemenata u cilju provjere ovisnosti odstupanja o promjeni veličine konačnih elemenata. U sljedećim modelima dimenzije konačnih elemenata vode su 20x20x20 cm, eksploziv TNT oblika kugle, mase  $W=136,08$  kg i polumjera  $R_{ep}=27,11$  cm, modeli su sljedeći:

- Model 7 - volumen vode: kocka 20x20x20 m, konačni elementi vode kocke dimenzija 20x20x20 cm, 1000000 elemenata i
- Model 8 - volumen vode: kvadar 20x5x5 m, konačni elementi vode kocke dimenzija 20x20x20 cm, 62500 elemenata.

Nakon provedene numeričke simulacije podvodne eksplozije, iz dobivenih rezultata numeričke simulacije preuzeti su dijagrami tlak – vrijeme i prikazani su rezultati maksimalnog tlaka na određenim udaljenostima od središta eksplozije, vidjeti sliku 6.13.



Slika 6.13 Ovisnost tlaka o obliku i veličini volumena vode, konačni elementi vode 20x20x20 cm

Rezultati numeričke simulacije dijagrami tlak - vrijeme, na udaljenostima: 1,5; 5,0; 10,0; 13,5; 15,0 i 20,0 m, od središta eksplozije. Na slici nisu vidljiva odstupanja dijagrama odnosno rezultata. Vrijednosti maksimalnog tlaka za volumen vode oblika kocke i kvadra te relativna odstupanja dobivenih rezultata prikazana su u tablici 6.8.

Tablica 6.8 Odstupanja maksimalnog tlaka za volumen vode oblika kocke i kvadra

Oblik i dimenzije promatranog prostora vode			
Udaljenost	Kocka 20x20x20 m	Kvadar 20x5x5 m	Δ
	Tlak	Tlak	
(m)	(MPa)	(MPa)	%
1,5	133,56	133,44	0,09
5	29,29	29,33	-0,14
10	11,64	11,68	-0,29
13,5	7,76	7,83	-0,96
15	6,82	6,90	-1,22
20	4,77	4,73	0,81

U tablici 6.8 prikazano je relativno odstupanje ( $\Delta$ ) vrijednosti maksimalnog tlaka u postotcima za kvadar u odnosu na kocku. Najveće odstupanje je na udaljenosti od 15 m i iznosi -1,22%. Vidljivo je kako promjena tj. smanjenje širine i visine promatranog prostora - volumena vode, za konačne elemente 20x20x20 cm, također nema značajnijeg utjecaja na rezultate maksimalnog tlaka udarnog vala na svim promatranim udaljenostima.

Numerički rezultati tlaka ovise od više parametara modela. U ovom istraživanju je analiziran utjecaj veličine i oblik volumena vode na odstupanje rezultata tlaka, neovisno o točnosti rezultata tlaka. Nakon provedenih istraživanja, analize rezultata, iznošenja činjenica i donošenja zaključaka u daljnjim istraživanjima istražiti će se utjecaj drugih parametara (veličine konačnih elemenata eksploziva i vode).

Dobiveni rezultati i zaključak su posljedica činjenice radijalnog širenja udarnog tlačnog vala u svim smjerovima i mogućnosti računalnog programa koji omogućava zadavanje propusnih graničnih ploha kao rubnog uvjeta, bez refleksije. Naime tlačni udarni val se širi sferno na isti način u svim smjerovima, ali zbog potrebe numeričkog postupka u diskretnoj mreži konačnih elemenata potrebno je osigurati dovoljne duljine i druga dva, kraća, brida kvadra za osiguranje numeričke stabilnosti postupka i dobivanja rezultata zadovoljavajuće točnosti.

Ovo svojstvo se može koristiti za smanjenje broja konačnih elemenata pri modeliranju. Ovo je vrlo važno s obzirom na složenost i kompleksnost modela kao i proračuna te omogućava proračun numeričkih modela sa značajno manjim kapacitetom računala uz smanjivanje veličine konačnih elemenata. Rezultati istraživanja i zaključci potvrđuju 3. hipotezu.

### 6.3.11 Ovisnost numeričkih rezultata tlaka o veličini konačnih elemenata eksploziva

Pretpostavlja se kako je točnost numeričkih rezultata tlaka ovisna o veličini konačnih elemenata eksploziva. Za potrebe istraživanja ovisnosti numeričkih rezultata o veličini konačnih elemenata eksploziva, vode i drugih istraživanja, korištena je razvijena skupina modela, koja se sastoji od četiri grupe modela. Volumen vode, kod svih modela je 20x5x5 m, eksploziv TNT, oblika kugle, polumjera  $R_{ep}=27,11$  cm, a korišteni su razvijeni modeli:

Prva grupa modela:

- Model 9 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 25×25×25 cm, 32000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 8, 3818 elemenata,
- Model 10 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 25×25×25 cm, 32000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 10, 7001 element i
- Model 11 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 25×25×25 cm, 32000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 12, 12907 elemenata.

Druga grupa modela:

- Model 12 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 20×20×20 cm, 62500 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 8, 3818 elemenata,
- Model 13 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 20×20×20 cm, 62500 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 10, 7001 element i
- Model 14 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 20×20×20 cm, 62500 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 12, 12907 elemenata.

Treća grupa modela:

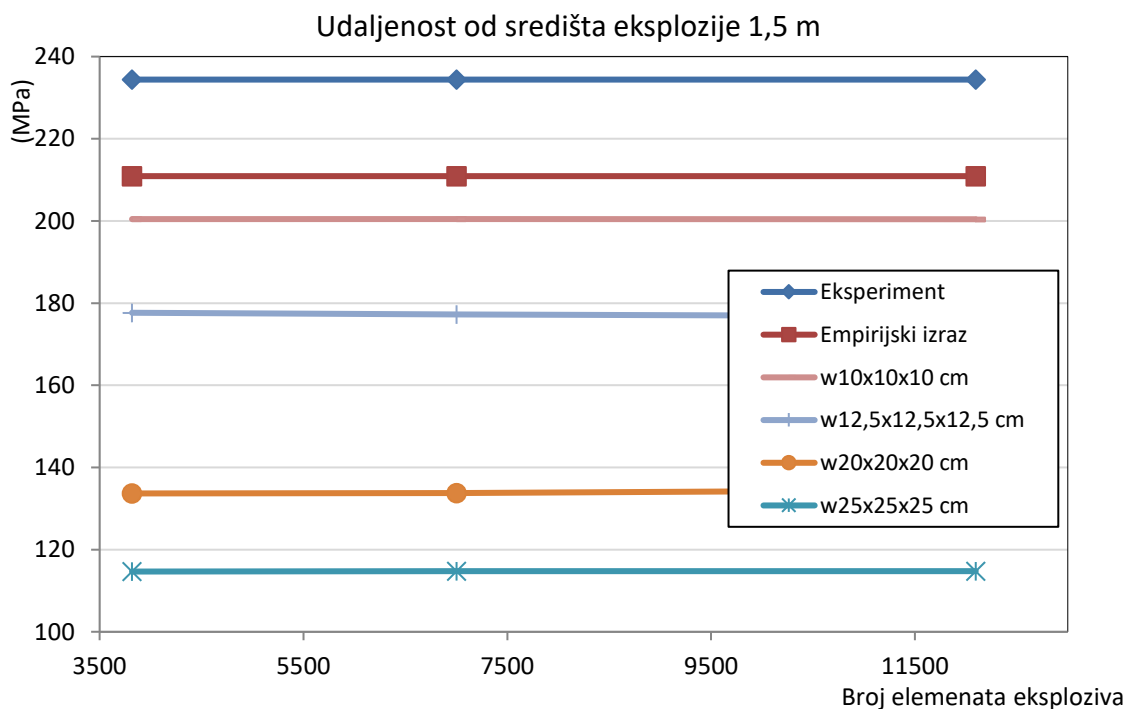
- Model 15 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 12,5×12,5×12,5 cm, 256000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 8, 3818 elemenata,
- Model 16 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 12,5×12,5×12,5 cm, 256000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 10, 7001 element i
- Model 17 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 12,5×12,5×12,5 cm, 256000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 12, 12907 elemenata.

Četvrta grupa modela:

- Model 18 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 10×10×10 cm, 500000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 8, 3818 elemenata,
- Model 19 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 10×10×10 cm, 500000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 10, 7001 element,
- Model 20 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 10×10×10 cm, 500000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 12, 12907 elemenata.

Nakon provedenih numeričkih simulacija podvodne eksplozije na navedenim skupinama modela, iz skupne dobivenih raznih rezultata numeričke simulacije, iz dijagrama tlak – vrijeme uzete su vrijednosti maksimalnog tlaka, na udaljenostima: 1,5; 13,5 i 15,0 m, od središta eksplozije.

Na temelju dobivenih numeričkih rezultata (dijagrami tlak – vrijeme) pripremljen je dijagram maksimalne vrijednosti tlaka, na udaljenosti 1,5 m od središta eksplozije, za različit broj (veličinu) konačnih elemenata eksploziva. Također su, na istoj slici, prikazani i dijagrami ovisnosti tlaka o veličini konačnih elemenata eksploziva, za modele s različitim brojem (veličinom) elemenata vode, te dijagrami na kojima je prikazan eksperimentalni rezultat i rezultat dobiven pomoću empirijskog izraza, slika 6.14.



Slika 6.14 Ovisnost maksimalnog tlaka o veličini konačnih elemenata eksploziva

Na slici 6.14 prikazane su vrijednosti tlaka dobivene eksperimentalno i pomoću empirijskih izraza te vrijednosti maksimalnog tlaka (četiri dijagrama) na temelju dobivenih numeričkih rezultata tlaka, na udaljenosti 1,5 m od središta eksplozije. Za svaku veličinu konačnih elemenata vode (25x25x25 cm, 20x20x20 cm, 12,5x12,5x12,5 cm i 10x10x10 cm) varirane su tri različite veličine konačnih elemenata eksploziva, koje su se dobile povećavanjem gustoće diskretizacije eksploziva, koja povećava broj konačnih elemenata eksploziva (od 3818, 7001 do 12097 elemenata). Za svaku određenu veličinu konačnih elemenata vode i različite veličine konačnih elemenata eksploziva prikazani su dijagrami, na temelju dobivenih numeričkih rezultata.

Na dijagramu maksimalnog tlaka za veličinu konačnih elemenata vode 10x10x10 cm, za različite veličine konačnih elemenata eksploziva vidljivo je kako povećanje broja konačnih elemenata eksploziva, odnosno smanjenjem njihove veličine, ne utječe na promjene vrijednosti tlaka i približavanje eksperimentalnom rezultatu (234,4 MPa) i rezultatu dobivenom pomoću empirijskog izraza (210,90 MPa). Krivulja maksimalnog tlaka je približno paralelna s osi x.

Ovo zapažanje vrijedi i za sve tri ostale krivulje s različitom veličinom konačnih elemenata vode (12,5x12,5x12,5 cm, 20x20x20 cm i 25x25x25 cm).

Pripremljeni su dijagrami na temelju numeričkih rezultata na drugim udaljenostima (5; 10; 13,5; 15 i 20 m) zapažanja su slična ali dijagrami neće biti prikazani u ovom radu. Rezultati istraživanja i zaključak potvrđuju dio 4. hipoteze.

#### 6.3.12 Ovisnost numeričkih rezultata tlaka o veličini konačnih elemenata vode

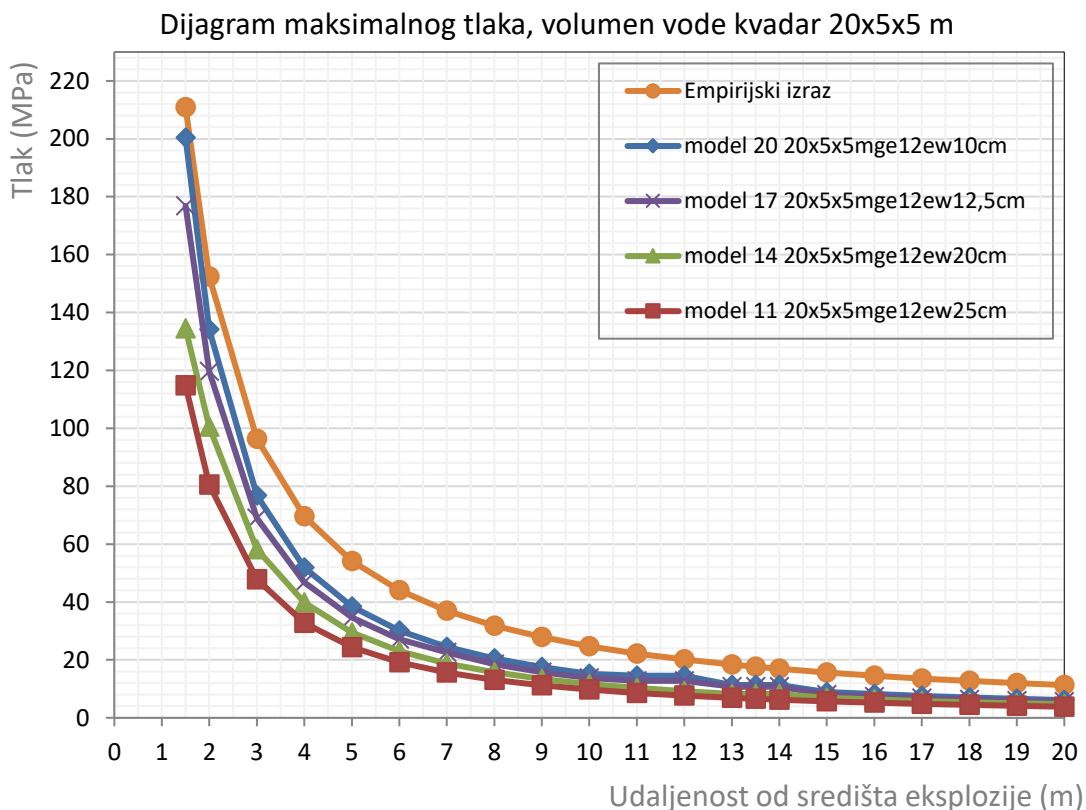
Nadalje će biti analiziran utjecaj veličine konačnih elemenata vode na rezultate tlaka. Za istraživanje utjecaja veličine konačnih elemenata vode na rezultate tlaka korišteni su prethodno razvijeni modeli. Volumen vode: 20x5x5 m, eksploziv TNT, oblika kugle, polumjera  $R_{ep}=27,11$  cm, a korišteni su već ranije razvijeni i prezentirani modeli:

Grupa modela:

- Model 11 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 25x25x25 cm, 32000 elemenata, eksploziv: gustoća diskretizacije 12, 12907 elemenata,
- Model 14 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 20x20x20 cm, 62500 elemenata, eksploziv: gustoća diskretizacije 12, 12907 elemenata,
- Model 17 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 12,5x12,5x12,5 cm, 256000 elemenata, eksploziv: gustoća diskretizacije 12, 12907 elemenata i
- Model 20 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 10x10x10 cm, 500000 elemenata, eksploziv gustoća diskretizacije 12, 12907 elemenata.

Nakon što je proveden numerički proračun modela, iz dijagrama tlak – vrijeme očitane su maksimalne vrijednosti tlaka na fronti udarnog vala. Podaci su korišteni za izradu dijagrama maksimalnog tlaka ovisno o udaljenosti za pojedinu veličinu konačnih elemenata vode. Gustoća diskretizacije eksploziva konačnim elementima je 12 i broj konačnih elemenata eksploziva je 12097 i isti je za sve analizirane modele.

Na slici 6.16 prikazan je dijagram tlaka dobiven pomoću empirijskog izraza i dijagrami tlaka dobiveni numeričkim postupkom. Uzete su vrijednosti maksimalnog tlaka, na udaljenostima: 1,5; 2,0 do 20,0 m u koracima od 1 m, od središta eksplozije. Na temelju dobivenih rezultata, pripremljena su četiri dijagrama maksimalne vrijednosti tlaka, za različite veličine elemenata vode i dijagram dobiven računski pomoću usvojenog empirijskog izraza, slika 6.15.



Slika 6.15 Ovisnost maksimalnog tlaka o veličini konačnih elemenata vode

Na slici 6.15 prikazan je dijagram maksimalne vrijednosti tlaka dobiven pomoću empirijskog izraza i četiri dijagrama tlaka, na temelju dobivenih numeričkih rezultata, na udaljenostima od 1,5; 2,0 do 20,0 m, s korakom od jednog metra, za svaku veličinu konačnih elemenata vode (25x25x25 cm; 20x20x20 cm; 12,5x12,5x12,5 cm i 10x10x10 cm) uz konstantnu veličinu konačnih elemenata eksploziva.

Na slici se vidi kako dijagram tlaka za veličinu elemenata vode 25x25x25 cm ima manje vrijednosti tlaka od dijagrama za elemente vode 20x20x20 cm i vrijednosti tlaka na dijagramima se povećavaju smanjenjem veličine elemenata i najveće su za elemente vode 10x10x10 cm. Promjena veličine elemenata vode izravno utječe na vrijednost tlaka. Vidljivo je kako povećanje broja konačnih elemenata vode, odnosno



smanjenje njihove veličine, dolazi do promjene i poboljšanja vrijednost tlaka te približavanja rezultatima dobivenim pomoću empirijskog izraza. Rezultati istraživanja i zaključak potvrđuju dio 4. hipoteze.

U tablici 6.9 prikazani su dobiveni rezultati i relativno odstupanje rezultata tlaka za pojedine kvadre s različitim veličinama konačnih elemenata.

Tablica 6.9 Odstupanja maksimalnog tlaka na modelima od empirijskih rezultata

Udalje- nost	Veličina konačnih elemenata vode								
	Empirijski izraz	10x10x10 cm		12,5x12,5x12,5 cm		20x20x20 cm		25x25x25 cm	
	Tlak	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$
(m)	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	%	(MPa)	%	(MPa)	%
1,5	210,90	200,41	4,97	176,81	16,16	134,48	36,24	114,76	45,59
2,0	152,37	134,19	11,93	119,68	21,45	100,54	34,02	80,57	47,13
3,0	96,36	76,76	20,34	68,92	28,48	58,24	39,57	47,84	50,36
4,0	69,62	51,92	25,42	46,77	32,83	39,81	42,82	32,77	52,93
5,0	54,10	38,44	28,95	34,63	35,99	29,41	45,64	24,38	54,94
6,0	44,03	30,08	31,68	27,12	38,40	23,07	47,61	19,14	56,53
7,0	36,99	24,43	33,95	22,56	39,01	18,74	49,34	15,59	57,85
8,0	31,81	20,48	35,62	18,48	41,91	15,71	50,61	13,07	58,93
9,0	27,85	17,46	37,28	15,79	43,30	13,41	51,84	11,18	59,85
10,0	24,72	15,23	38,39	13,74	44,41	11,67	52,78	9,73	60,65
11,0	22,20	14,47	34,79	12,71	42,73	10,29	53,66	8,58	61,35
12,0	20,12	14,47	28,05	12,71	36,82	9,19	54,34	7,65	61,99
13,0	18,38	11,33	38,35	10,72	41,69	8,25	55,09	6,88	62,54
13,5	17,61	11,33	35,66	10,72	39,15	8,21	53,38	6,55	62,81
14,0	16,90	11,33	32,96	10,72	36,59	8,21	51,42	6,24	63,06
15,0	15,63	8,90	43,07	8,03	48,63	6,84	56,23	5,70	63,55
16,0	14,53	8,17	43,78	7,38	49,22	6,29	56,72	5,23	64,02
17,0	13,57	7,53	44,51	6,81	49,82	5,81	57,22	4,82	64,52
18,0	12,72	6,99	45,09	6,32	50,32	5,38	57,69	4,45	65,04
19,0	11,97	6,52	45,57	5,89	50,77	4,98	58,37	4,11	65,64
20,0	11,30	6,11	45,86	5,56	50,82	4,70	58,40	3,81	66,29

Pregledom rezultata u tablici 6.9, vidi se kako je najmanje odstupanje ( $\Delta$ ) numeričkih od rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza za model s konačnim elementima vode 10x10x10 cm, koji su najmanji. Postotak odstupanja je najmanji na udaljenosti 1,5, a zatim se povećava i na udaljenosti od 20 m iznosi 45,86 %. Za konačne elemente vode 12,5x12,5x12,5 cm odstupanje se povećava i kreće se od 16,6 % na udaljenosti 1,5 m do 50,82 % na udaljenosti od 20 m. Za veličine konačnih elemenata 20x20x20

cm odstupanje je od 36,24 % do 58,40 %, a za konačne elemente 25x25x25 cm, odstupanje se povećava i iznosi od 45,59 % do 66,29 %.

Vidljivo je kako povećanje broja elemenata vode, odnosno smanjenjem njihove veličine u zadanom volumenu, dolazi do promjene vrijednosti tlaka. Smanjivanjem veličine konačnih elemenata vode tlak se približava rezultatima dobivenim pomoću empirijskog izraza i eksperimenta. Za postizanje numeričkih rezultata koji imaju manja odstupanja od eksperimentalnih ili od rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza potrebno je pripremiti modele s manjom veličinom konačnih elemenata.

Pregledom rezultata i odstupanja maksimalnog tlaka dobivenih numeričkim postupkom od rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza vidljiva su značajna odstupanja, vidjeti tablicu 6.9. Za konačne elemente 10x10x10 cm odstupanja su najmanja i ona su od 4,97 % do 45,86 %. Poboljšanje rezultata i smanjenje odstupanja može se postići samo smanjenjem veličine konačnih elemenata sukladno mogućnostima računala.

Koristeći preporuke o presjecima kvadara za pojedine udaljenosti iz prethodne analize može se nastaviti proces poboljšanja rezultata. Nakon istraživanja je navedeno, kako kvadar presjeka 2x2 m daje prihvatljive rezultate (maksimalno odstupanje do 1,5 %) na udaljenostima do 5 m pa je odabran kvadar dimenzija 501x201x201 cm za poboljšanje rezultata na udaljenostima od 5 m. Dimenzije su prilagođene za dijeljenje duljine brida kvadra s cijelim brojem elemenata.

Kvadar presjeka 3x3 m daje prihvatljive rezultate (maksimalno odstupanje do 4,09 %) na udaljenostima do 10 m, pa je odabran kvadar 10x3x3 m za poboljšanje rezultata na udaljenostima od 10 m.

Kvadar presjeka 4x4 m daje prihvatljive rezultate (maksimalno odstupanje do 3,6 %) na udaljenostima do 15 m, pa je odabran kvadar 1500x402x402 cm za poboljšanje rezultata na udaljenostima od 15 m.

Sukladno spomenutom pripremljena je nova grupa modela:

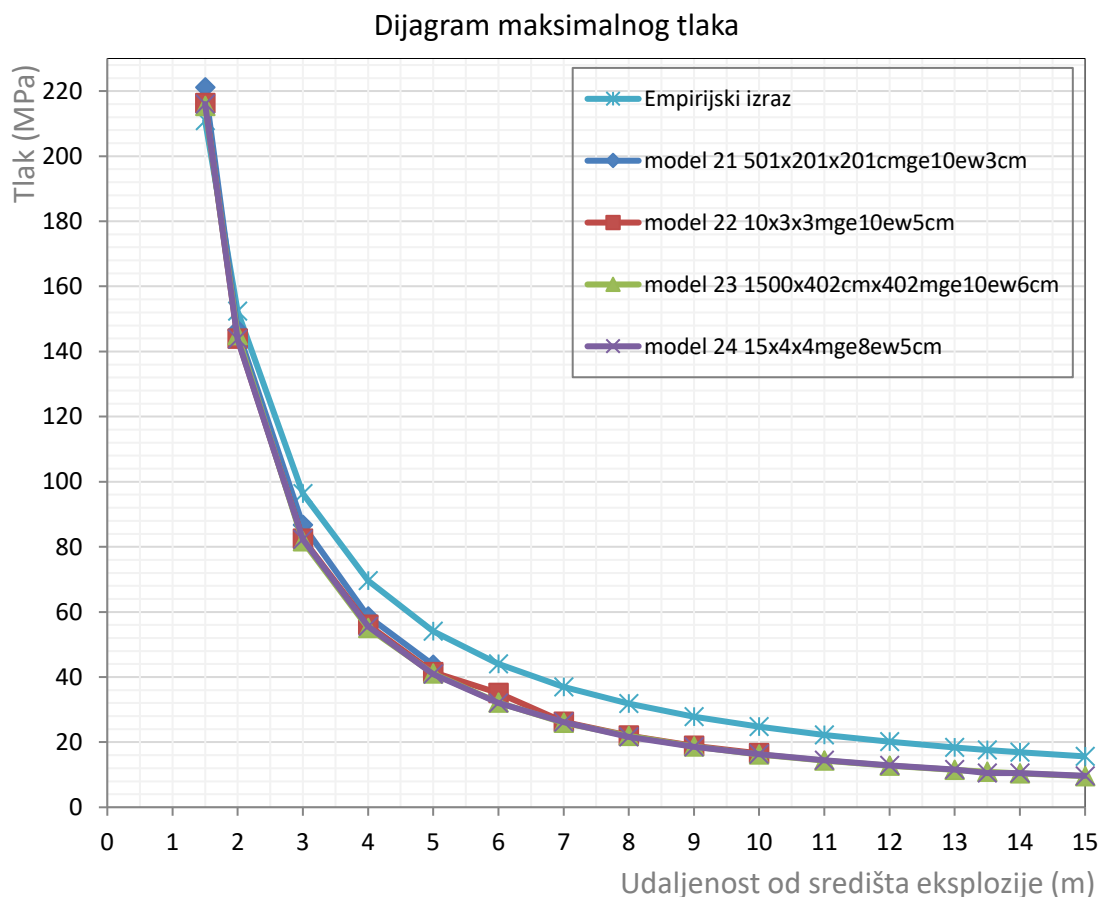
- Model 21 - Volumen vode 501x201x201 cm, konačni elementi vode 3x3x3 cm, 749663 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 10, 7001 element,
- Model 22 - Volumen vode 10x3x3 m, konačni elementi vode 5x5x5 cm, 720000 elemenata, eksploziv: gustoća diskretizacije 10, 7001 element,
- Model 23 - Volumen vode 1500x402x402 cm, konačni elementi vode 6x6x6 cm, 1122250 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 10, 7001 element i

- Model 24 - Volumen vode 1500x400x400 cm, konačni elementi vode 5x5x5 cm, 1920000 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 8, 3818 elemenata.

Nakon što je proveden numerički proračun modela, iz dijagrama tlak – vrijeme očitane su maksimalne vrijednosti tlaka na fronti udarnog vala. Podaci su korišteni za izradu dijagrama maksimalnog tlaka ovisno o udaljenosti za pojedinu veličinu konačnih elemenata vode.

Vrijednosti maksimalnog tlaka uzete su, na udaljenostima od 1,5; 2,0 do 15,0 m u koracima od 1 m, od središta eksplozije, ovisno o modelu.

Na temelju dobivenih numeričkih rezultata pripravljena su tri dijagrama maksimalne vrijednosti tlaka, za različita područja i različite veličine elemenata vode i dijagram dobiven računski pomoću empirijskog izraza, slika 6.16.



Slika 6.16 Ovisnost maksimalnog tlaka o veličini konačnih elemenata vode

Na slici 6.16 prikazani su dijagrami računске vrijednosti maksimalnog tlaka dobivene pomoću empirijskog izraza i četiri dijagrama tlaka na temelju dobivenih numeričkih rezultata, na udaljenostima od 1,5; 2,0 do 15,0 m, s korakom od jednog metra, za svaku

veličinu konačnih elemenata vode (3x3x3 cm, 5x5x5 cm, 6x6x6 cm i 5x5x5 cm), za različite dimenzije volumena vode (5,01x2,01x2,01; 10x3x3; 15x4,02x4,02 i 15x4x4 m).

Na slici se vidi kako su odstupanja dijagrama tlaka manja u području od 0 do 5 m udaljenosti od središta, a poslije se odstupanje povećava. Dobiveni rezultati i relativna odstupanja su prikazana u tablici 6.10.

Tablica 6.10 Odstupanja maksimalnog tlaka na modelima od empirijskih rezultata

Udaljenost	Veličina konačnih elemenata vode								
	Empirijski izraz	3x3x3 cm		5x5x5 cm		6x6x6 cm		5x5x5 cm	
	Tlak	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$
(m)	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	%	(MPa)	%	(MPa)	%
1,50	210,90	221,10	-4,84	216,27	-2,55	215,35	-2,11	216,00	-2,42
2,00	152,37	146,61	3,78	143,89	5,56	145,01	4,83	143,80	5,62
3,00	96,36	85,72	11,05	82,50	14,38	81,70	15,22	82,25	14,65
4,00	69,62	58,55	15,90	56,01	19,55	55,08	20,88	55,50	20,29
5,00	54,10	43,73	19,17	41,46	23,36	41,08	24,07	40,92	24,38
6,00	44,03			35,09	20,30	32,13	27,02	32,09	27,12
7,00	36,99			26,20	29,17	25,97	29,78	26,11	29,42
8,00	31,81			22,03	30,74	23,22	27,01	23,92	24,80
9,00	27,85			18,86	32,28	23,17	16,79	21,90	21,35
10,00	24,72			16,56	33,01	16,21	34,43	16,31	34,04
11,00	22,20					14,37	35,28	14,40	35,11
12,00	20,12					12,78	36,50	12,86	36,09
13,00	18,38					11,47	37,58	11,58	36,97
13,50	17,61					10,94	37,87	11,01	37,48
14,00	16,90					10,45	38,19	10,52	37,76
15,00	15,63					9,57	38,80	9,67	38,16

Pregledom rezultata u tablici 6.10, vidi se kako je najmanje odstupanje ( $\Delta$ ) numeričkih od rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza za model s konačnim elementima vode 3x3x3 cm, koji su najmanji. Postotak odstupanja je najmanji na udaljenosti 1,5, a zatim se povećava i na udaljenosti od 5 m iznosi 19,17 %. Za konačne elemente vode 5x5x5 cm odstupanje se povećava i kreće se od 2,55 % na udaljenosti 1,5 m do 33,01 % na udaljenosti od 10 m. Za elemente 6x6x6 cm odstupanje se povećava, a za elemente 5x5x5 cm se ponovno smanjuje.

Vidljivo je kako se povećanjem broja elemenata vode, odnosno smanjenjem njihove veličine u zadanom volumenu, dolazi do promjene vrijednosti tlaka i približavanja rezultatima dobivenim pomoću empirijskog izraza.

Za postizanje rezultata koji imaju manja odstupanja od eksperimentalnih ili od rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza potrebno je pripremiti modele s manjom veličinom konačnih elemenata. Za dobivanje točnijih rezultata preporučuje se smanjenje veličine konačnih elemenata pri proračunima djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine.

#### 6.3.13 Ovisnost numeričkih rezultata o veličini konačnih elemenata i prostora vode

Temeljem provedenog modeliranja podvodne eksplozije, uz sve do sada korištene načine smanjenja prostora, nisu se dobili numerički rezultati s prihvatljivim odstupanjem, na svim dijelovima promatrane udaljenosti (20 m). U posljednjim rezultatima (vidjeti tablicu 6.10), na udaljenostima preko 5 m odstupanja su veća od 20%. Na udaljenosti do 10 m, maksimalno odstupanje je 33,01 %, a na udaljenosti do 15 m, maksimalno odstupanje je 38,16 %, a maksimalno odstupanje na udaljenostima do 20 m je 45,86 % (vidjeti tablicu 6.9).

Prethodno je provedena redukcija prostora vode, uz pretpostavku homogenosti vode i zanemarivanje hidrostatičkog tlaka, koristeći simetriju, promatrani prostor je smanjen na 1/8 prostora. Nadalje, promatrani prostor vode oblika kocke (kocka 20x20x20 m) je zamijenjen s volumenom kvadra (20x5x5 m), uz prihvaćanje određenih odstupanja, što je daljnje smanjenje, već smanjenog prostora vode na 1/16. Nakon ove dvije redukcije globalnog prostora vode ukupno smanjenje prostora vode u odnosu na početni volumen vode je 128 puta, što znači kako se numerički postupak provodi na 1/128 početnog volumena.

Također je izvršeno daljnje smanjenje dimenzija presjeka kvadra za određivanje numeričkih rezultata, uz prihvaćanje dodatnih odstupanjima, na pojedinim dijelovima analiziranog područja vode (5, 10 i 15 m).

S obzirom na navedeno, potrebno je pronaći način daljnjeg smanjenja volumena vode i uz zadane računalne kapacitete postići manja odstupanja numeričkih rezultata.

U prethodnim istraživanjima utvrđeno je kako točnost rezultata ne ovisi o veličini konačnih elemenata eksploziva i izravno ovisi o veličini konačnih elemenata vode te o veličini i obliku analiziranog prostora vode.

Pregledom dobivenih rezultata prethodnih istraživanja, utvrđeno je kako se korištenjem kvadra određenih dimenzija presjeka umjesto kocke dobivaju numerički rezultat s određenim odstupanjem.

Postavlja se sljedeća pretpostavka: Odstupanje numeričkih rezultata od rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza ovisi o veličini konačnih elemenata vode i veličini promatranog volumena vode odnosno dimenzija presjeka kvadra. Rezultati se poboljšavaju smanjenjem veličine konačnih elemenata vode i povećanjem dimenzija presjeka kvadra.

Rezultate s prihvatljivim odstupanjima možemo dobiti smanjivanjem veličine konačnih elemenata vode, veličine brida kocke od 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm i 6 cm. Stoga, u sljedećem istraživanju, će se zadati veličina konačnih elemenata vode i maksimalno smanjiti dimenzije presjeka kvadra i pretvoriti ga u štap i pripremiti modele, sve u granicama kapaciteta računala.

Za potrebe istraživanja analizirani su prostori vode koji su u obliku kvadra, gdje je duljina duže stranice kvadra, u promatranom smjeru 20 m.

Istraživanje se provodi na tri nova modela, koja su pripremljena na kompletnom području, udaljenosti od središta do 20 m, uz smanjenje dimenzija presjeka kvadra i korištenje proširenog memorijskog prostora računala do krajnjih granica.

Složenost odabira elemenata modela i proračun je vrlo složen. Tako postupak proračuna modela na računalu, zbog velikog broja elemenata (do 3268300) i vremena trajanja (14000  $\mu$ s), traje (10 sati 35 minuta i 64 sekunde) sve dok postoji slobodnih memorijskih kapaciteta na računalu, nakon toga se proces prekida. Nakon

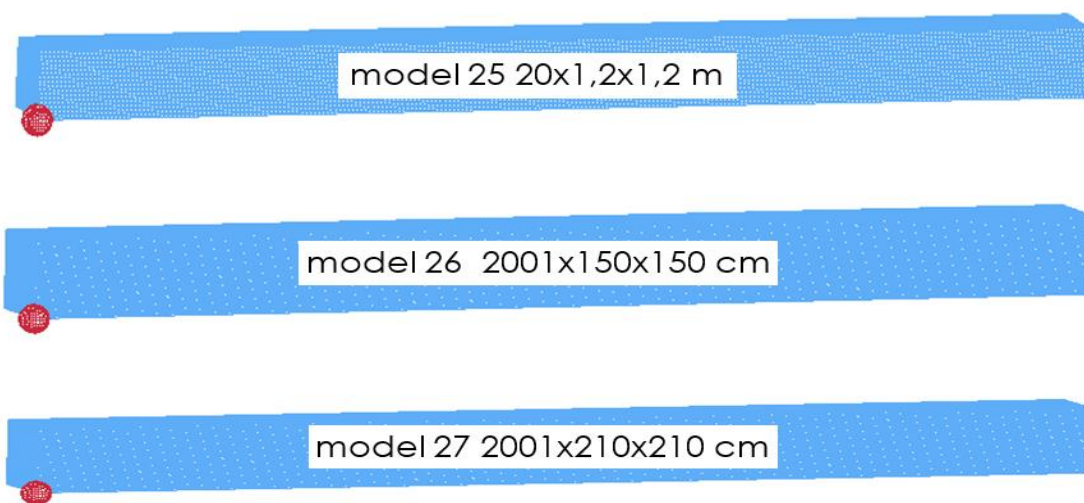
prekida procesiranja modela u izlaznim podacima ne postoje podaci, nakon određene udaljenosti, a pred sam kraj proračuna vrijednosti tlaka su jako malene. Kod svih modela usvojen je eksploziv TNT težine 136,08 kg, oblika kugle polumjera  $R_{ep}=27,11$  cm.

Razvijeni numerički modeli su:

- Model 25 - Volumen vode: kvadar 20x1,2x1,2 m, konačni elementi vode su dimenzija 4x4x4 cm, 1920000 elemenata,
- Model 26 - Volumen vode: kvadar 2001x150x150 cm, konačni elementi vode su dimenzija 3x3x3 cm, 1667500 elemenata i
- Model 27 - Volumen vode: kvadar 2001x210x210 cm, konačni elementi vode su dimenzija 3x3x3 cm, 3268300 elemenata.

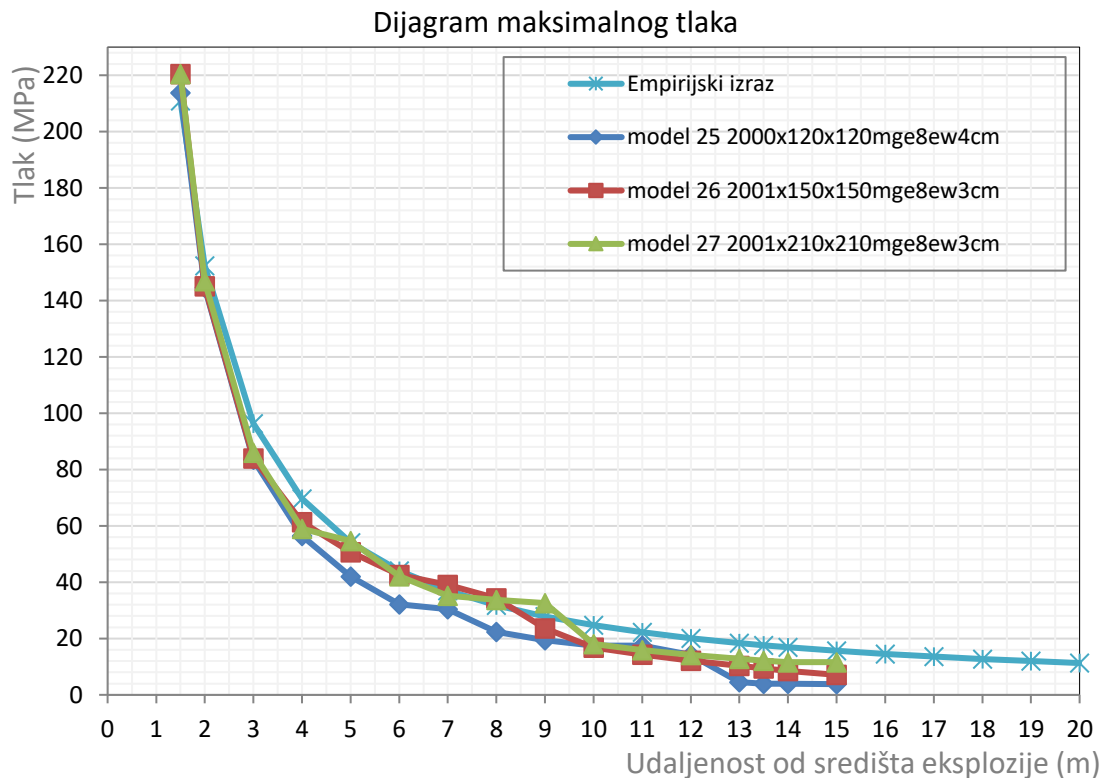
Nakon provedene numeričke simulacije, preuzeti su numerički rezultati za dijagram tlak - vrijeme, na određenim udaljenostima od središta eksplozije i pripremljeni su dijagrami i tablica.

Na slici 6.17 prikazani su prethodno opisani diskretizirani numerički modeli podvodne eksplozije.



Slika 6.17 Diskretizirani modeli podvodne eksplozije raznih dimenzija

Na temelju dobivenih rezultata pripravljena su tri dijagrama maksimalne vrijednosti tlaka, na različitim udaljenostima od središta eksplozije, za različite oblike i veličine volumena vode, koji su prikazani na slici 6.18.



Slika 6.18 Ovisnost tlaka o veličini volumena i konačnih elemenata vode

Na slici 6.18 prikazani su dijagrami maksimalnog tlaka na temelju dobivenih numeričkih rezultata, na udaljenostima 1,5; 2,0 do 20 m s korakom od 1 m, za odabrane veličine volumena vode i veličine konačnih elemenata. Na slici nisu vidljiva veća odstupanja na udaljenostima do 3 m, a nakon toga odstupanja se povećavaju do udaljenosti od 5 m pa se smanjuju do udaljenosti od 10 m pa se povećavaju do 15 m, a na udaljenostima preko 15 m nema rezultata ili su zanemarivi. Na modelima su volumeni vode oblika kvadra umanjenih dimenzija presjeka u odnosu na preporuke ranijih istraživanja i konačni elementi vode su različiti, veći od 2 cm, što rezultira odstupanjem numeričkih rezultata od rezultata dobivenih empirijskim izrazom.

U tablici 6.11 prikazani su dobiveni rezultati i relativno odstupanje rezultata tlaka za pojedine modele od rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza.



Tablica 6.11 Vrijednosti maksimalnog tlaka za različite volumene i konačne elemente vode

Udalje- nost	Različite veličina konačnih elemenata i volumena vode						
	Empirijski izraz	2000x120x120 ew4x4x4 cm		2001x150x150 ew3x3x3 cm		2001x210x210 ew3x3x3 cm	
	Tlak	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$	Tlak	$\Delta$
(m)	(MPa)	(MPa)	%	(MPa)	%	(MPa)	%
1,50	210,90	213,73	-1,34	220,50	-4,55	220,45	-4,53
2,00	152,37	144,62	5,09	145,06	4,80	146,90	3,59
3,00	96,36	83,53	13,31	83,98	12,85	85,99	10,77
4,00	69,62	56,41	18,98	61,34	11,89	59,01	15,24
5,00	54,10	42,07	22,25	50,67	6,36	54,64	-0,99
6,00	44,03	32,10	27,10	42,63	3,19	42,11	4,37
7,00	36,99	30,46	17,67	39,07	-5,62	35,23	4,75
8,00	31,81	22,39	29,61	34,33	-7,91	33,75	-6,10
9,00	27,85	19,39	30,37	23,57	15,35	32,57	-16,95
10,00	24,72	17,46	29,35	16,75	32,25	18,01	27,15
11,00	22,20	17,46	21,32	14,30	35,58	15,90	28,38
12,00	20,12	14,20	29,42	12,17	39,51	14,23	29,27
13,00	18,38	4,56	75,19	10,27	44,11	12,83	30,21
13,50	17,61	3,93	77,66	9,37	46,79	12,18	30,83
14,00	16,90	3,93	76,75	8,54	49,47	11,62	31,26
15,00	15,63	3,80	75,69	7,11	54,53	11,62	25,69
16,00	14,53						
17,00	13,57						
18,00	12,72						
19,00	11,97						
20,00	11,30						

Postotak odstupanja ( $\Delta$ ) je dobiven od razlike rezultata tlaka dobivenog pomoću empirijskog izraza i pojedinog modela podijeljen s tlakom dobivenim pomoću empirijskog izraza i pomnožen sa 100. Rezultati dobiveni na modelu 25 (2000x120x120 ew4x4x4 cm) pokazuju nepovoljan utjecaj malih dimenzija presjeka kvadra, a na udaljenosti od 13 m uočen je nagli pad tlaka, a rezultati na većim udaljenostima su zanemarive vrijednosti ili ne postoje. Rezultati modela 26 (2001x150x150 ew3x3x3 cm) i 27 (2001x210x210ew3x3x3 cm) pokazuju utjecaj nedovoljnog povećanja dimenzija presjeka kvadra i smanjenja veličine elemenata kao i nagli pad tlaka i na većim udaljenostima, gdje su vrijednosti rezultata zanemarive ili ne postoje.

Značajno je istaknuti kako postoje velika relativna odstupanja rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza i eksperimentalni rezultata, što je prikazano u tablici 6.1, koji su preuzeti iz literature. Maksimalno relativno odstupanje za udaljenosti od 0 do 20 m je 24,74 % na udaljenosti od 13,5 m, na udaljenosti od 1,5 m odstupanje je 10,3 %. Najveće odstupanje je na udaljenosti od 151 m od 49,99 %, vidjeti tablicu 6.1 Cole [3]. Ovi rezultati govore kako je podvodna eksplozija vrlo složena i kompleksna fizikalna pojava, a njeno istraživanje je vrlo složeno i opasno. Stoga svako istraživanje podvodne eksplozije predstavlja izazov i napredak te doprinosi razumijevanju i shvaćanju ove pojave.

Nadalje je istražen utjecaj dimenzija presjeka kvadra na numeričke rezultate tlaka. Istraživanja su provedena na ograničenom broju modela, koji neće biti prezentirani u ovom radu. Pravokutni presjek kvadra omogućava daljnje smanjenje broja konačnih elemenata, uz beznačajna odstupanja rezultata. Tako naprimjer, za promatrani prostor vode oblika kvadra, 20x4x2 m i 20x4x1,6 m i veličinu elemenata 4x4x4 cm, dobiju se identični rezultati tlaka, a smanjen je broj konačnih elemenata vode za 500 000. Također je utvrđeno, kako su rezultati tlaka neovisni o smjeru (x ili y) kraće stranice pravokutnog presjeka kvadra.

Zatim je utvrđeno kako se odabirom pravokutnog presjeka umjesto kvadratnog, jednake površine, mogu izbjeći neželjene pojave preskakanja (engl. *jump*) i odušivanja (engl. *blew out*) tlaka. Ovaj pojam se često koristio pri izvođenju minerskih radova u slučaju kad je mina eksplodirala, ali nije izvršila rušenje stijenske mase. Preskakanje je kašnjenje maksimalne vrijednosti tlaka, koja se pojavljuje nakon prvog ekstrema tlaka. Ispuhivanje je iščezavanje ili pad tlaka na nulu, nakon određene udaljenosti od središta eksplozije, vidjeti tablicu 6. 11.

Rezultati istraživanja pokazuju ovisnost rezultata tlaka o veličini dimenzija i oblika presjeka kvadra (volumena vode) i veličine konačnih elemenata, što zaslužuje posebnu pažnju i daljnja istraživanja, koja prelaze okvire ovog rada.

Rezultati ovih istraživanja mogu se koristiti u znanstvenom području matematičke fizike pri modeliranju odnosno diskretizacija domene svih valnih fizikalnih pojava (podvodna eksplozija, eksplozija u zraku, seizmika, hidroakustika, akustika, elektromagnetizam i dr.). Bez obzira na sve veće kapacitete računala, numerički modeli su sve složeniji i

uvijek se javlja isti izazov kako smanjiti količinu ulaznih podataka, a dobiti prihvatljive rezultate. Rezultati istraživanja i zaključak potvrđuju dio 1. hipoteze.

Temeljem provedenih istraživanja za potrebe rješavanja djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine preporuča se sljedeće:

- Zanemariti djelovanje hidrostatičkog tlaka.
- Korištenje reduciranih modela primjenom simetrije i redukcije volumena kocke na volumen kvadra.
- Dimenzije presjeka kvadra uskladiti sa zadanom udaljenosti od središta eksplozije.
- Za udaljenosti do 5 m - 2x2x5 m, za udaljenosti do 10 m - 3x3x10 m, za udaljenosti do 15 m - 4x4x15 m i za udaljenosti do 20 m - 5x5x20 m, vidjeti rezultate istraživanja u tablici 6.11.
- Veličine konačnih elemenata odabrati 3 cm, sukladno zahtijevanoj točnosti rezultata i tehničkim mogućnostima računala.
- Dobivene rezultate usporediti s rezultatima eksperimenta, ako postoje, ili rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza.

#### 6.3.14 Dijagrami tlak - vrijeme na određenim udaljenostima

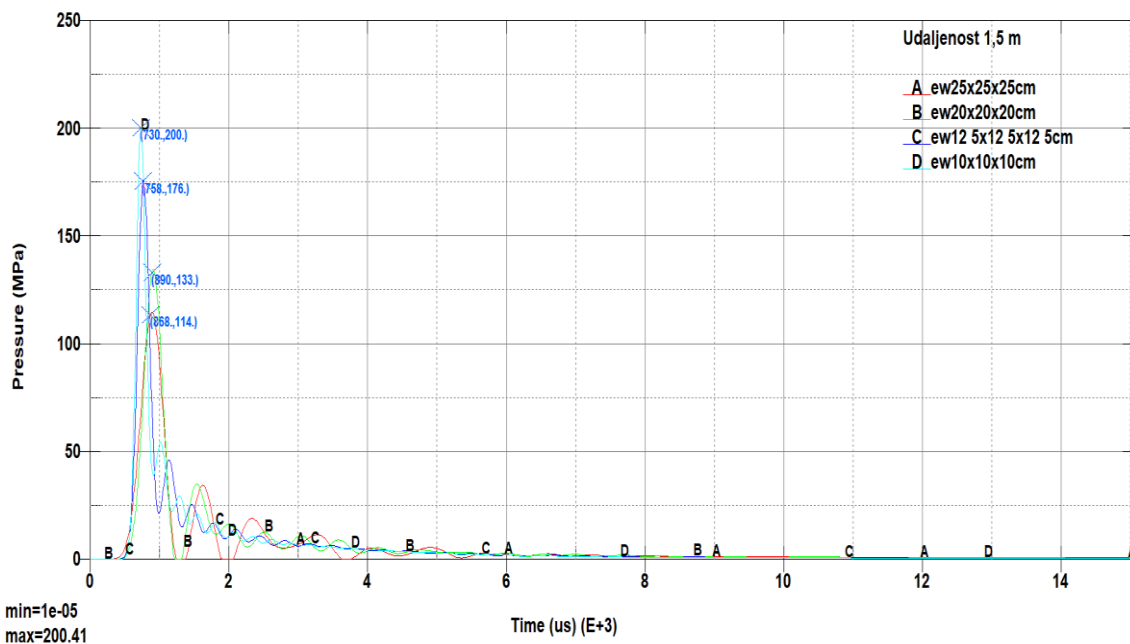
Izlazni rezultati numeričkog postupka, pored ostalih rezultata, su dijagrami tlak – vrijeme. Rezultati maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala dobivaju se u odabranim konačnim elementima vode. Dijagrami tlak - vrijeme prikazani su za različite veličine konačnih elemenata i na različitim udaljenostima. Dijagrami tlak – vrijeme su prikazani za već ranije razvijene i prezentirane modele:

- Model 11 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 25x25x25 cm, 32000 elemenata; gustoća diskretizacije eksploziva 12, 12907 elemenata,
- Model 14 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 20x20x20 cm, 62500 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 12, 12907 elemenata,
- Model 17 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 12,5x12,5x12,5 cm, 256000 elemenata; gustoća diskretizacije eksploziva 12, 12907 elemenata i
- Model 20 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 10x10x10 cm, 500000 elemenata; gustoća diskretizacije eksploziva 12, 12907 elemenata.

Dijagrami tlak - vrijeme uzeti su iz dobivenih rezultata numeričke simulacije, na udaljenostima: 1,5; 5,0; 10,0; 15,0 i 20,0 m, od središta eksplozije. Na slikama je prikazano pet dijagrama promjene vrijednosti tlaka u vremenu, na određenim udaljenostima, za različite veličine konačnih elemenata vode. Na dijagramima su također prikazane vrijednosti ekstremnog tlaka i vremena kad se tlak pojavio.

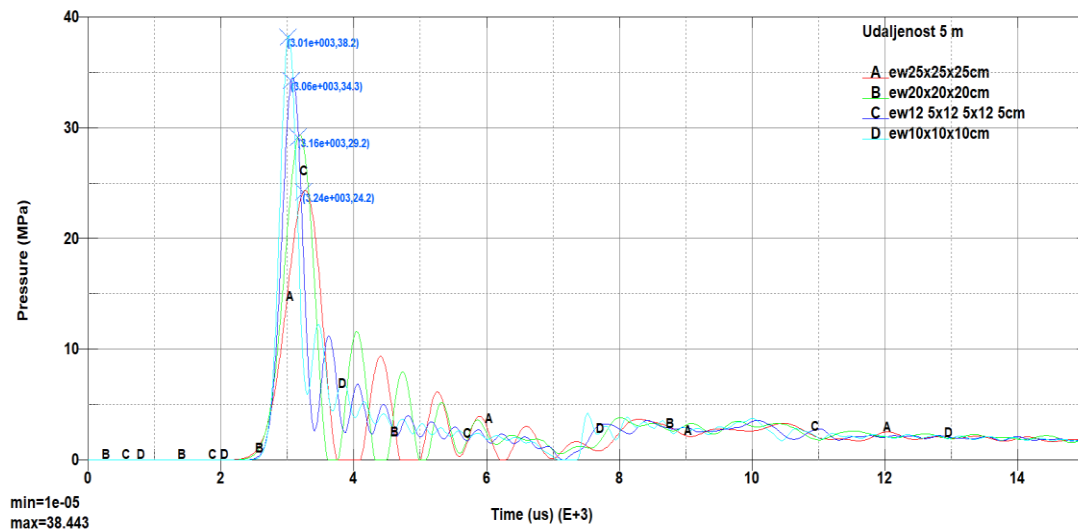
Na slici 6.19 prikazana su četiri dijagrama tlaka na udaljenosti od 1,5 m od središta eksplozije. Dijagrami su u originalu preuzeti iz izlaznih rezultata računalnog programa, bez ikakvih izmjena. Ispod dijagrama u donjem lijevom kutu slike prikazane su ekstremne vrijednosti tlaka. Pregledom dijagrama promjene tlaka u vremenu vidi se kako je najveći maksimalni tlak na modelu s konačnim elementima 10x10x10 cm.

Maksimalna vrijednost tlaka s povećanjem veličine elemenata se smanjuje i vrijeme pojave maksimalne vrijednosti tlaka se neznatno povećava.



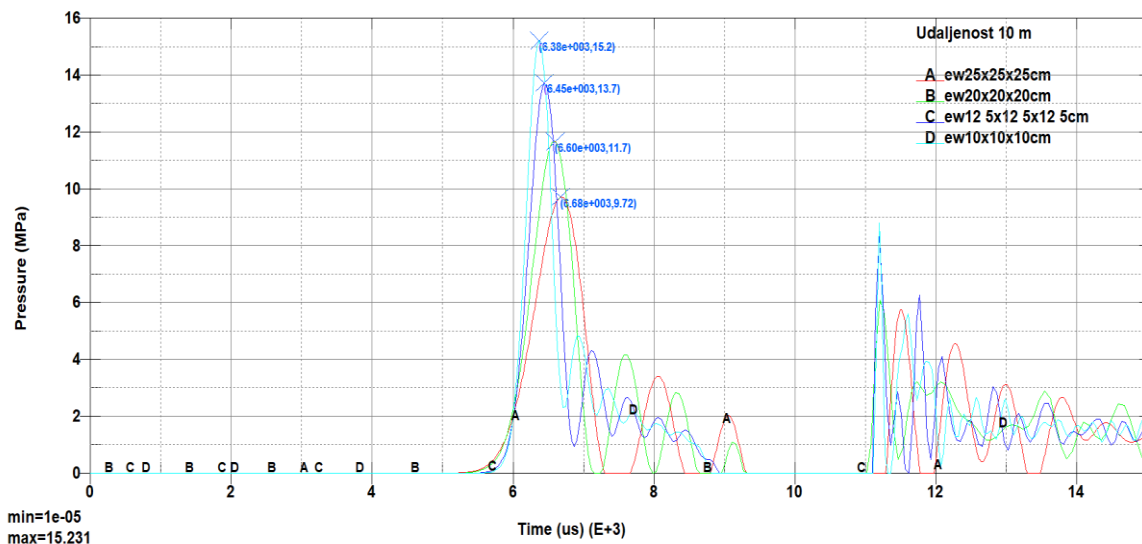
Slika 6.19 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 1,5 m

Na slici 6.20 pregledom dijagrama promjene tlaka u vremenu, na udaljenosti 5,0 m od središta eksplozije vidi se kako je najveći maksimalni tlak na modelu s konačnim elementima 10x10x10 cm. Maksimalna vrijednost tlaka pada s povećanjem veličine konačnih elemenata.



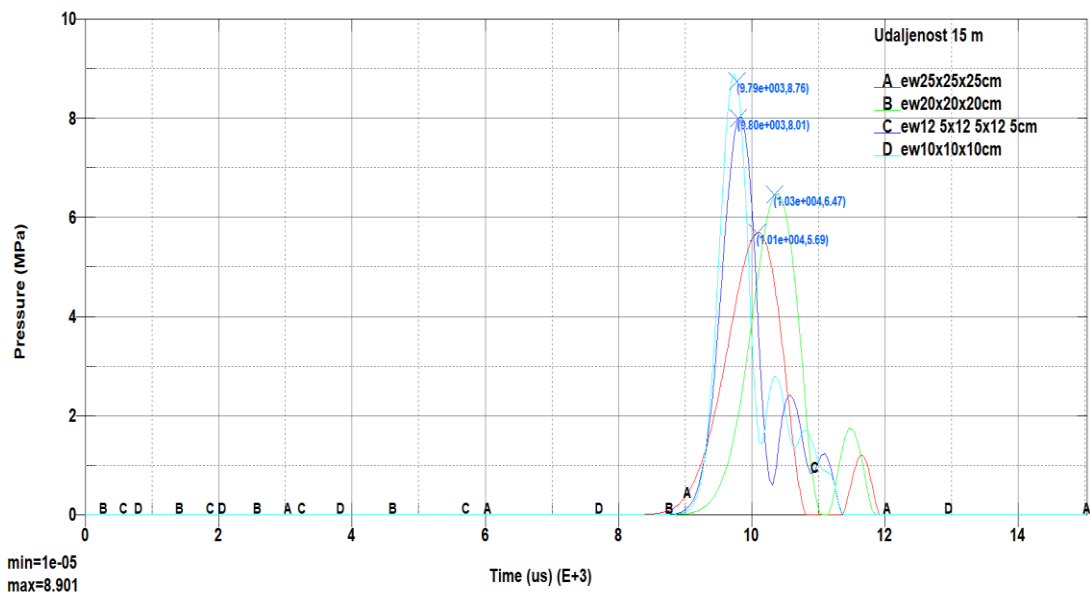
Slika 6.20 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 5 m

Na slici 6.21 pregledom dijagrama promjene tlaka u vremenu, na udaljenosti 10,0 m od središta eksplozije vidi se kako je maksimalni tlak na modelu s konačnim elementima 10x10x10 cm. Maksimalna vrijednost tlaka pada s povećanjem veličine konačnih elemenata vode. Povećanjem veličine elemenata maksimalna vrijednost je sve manja i sve se više pomiče od vremena maksimalne vrijednosti tlaka i naglašenije su naknadne lokalne ekstremne vrijednosti.



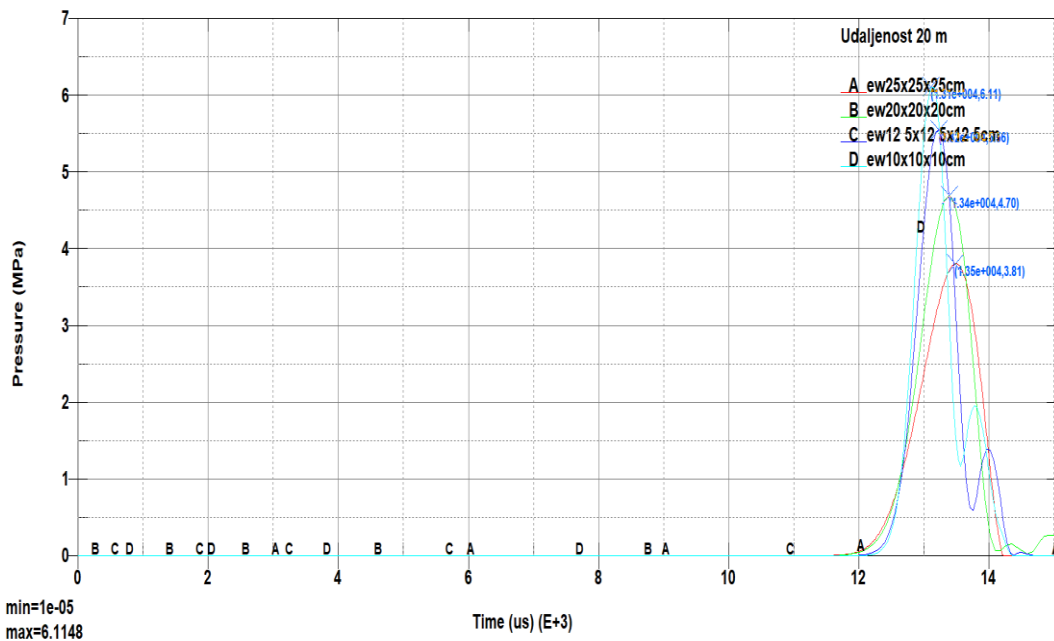
Slika 6.21 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 10 m

Na slici 6.22 su dijagrami promjene tlaka u vremenu, na udaljenosti 15 m od središta eksplozije maksimalni tlak je na modelu s konačnim elementima 10x10x10 cm.



Slika 6.22 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 15 m

Na slici 6.23 pregledom dijagrama promjene tlaka u vremenu, na udaljenosti 20 m od središta eksplozije vidi se kako je najveći maksimalni tlak na modelu s konačnim elementima 10x10x10 cm, a s povećanjem veličine konačnih elemenata vode maksimalna vrijednost tlaka opada.



Slika 6.23 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 20 m

Dobiveni numerički rezultati imaju određena odstupanja u od rezultata dobivenih pomoću empirijskih izraza, ovisno o veličini konačnih elemenata. Daljnjim povećanjem broja konačnih elemenata odnosno smanjivanjem njihovih dimenzija u zadanom volumenu može se postići smanjenje razlike između rezultata što potvrđuje ispravnost modela i numeričkog proračuna podvodne eksplozije u računalnom programu LS Dyna. Odstupanja numeričkih rezultata od rezultata dobivenih empirijskim izrazima, za pojedine veličine konačnih elemenata, prikazana su u tablicama 6.9; 6.10 i 6.11.

Numerički proračun i dane smjernice, koje su rezultat istraživanja podvodne eksplozije, nakon provedene verifikacije mogu se koristiti pri praktičnom inženjerskom proračunu i projektiranju pouzdanih i mehanički otpornih obalnih i hidrotehničkih građevina i infrastrukture.

#### 6.3.15 Ovisnost brzine širenja udarnog vala o veličini konačnih elemenata

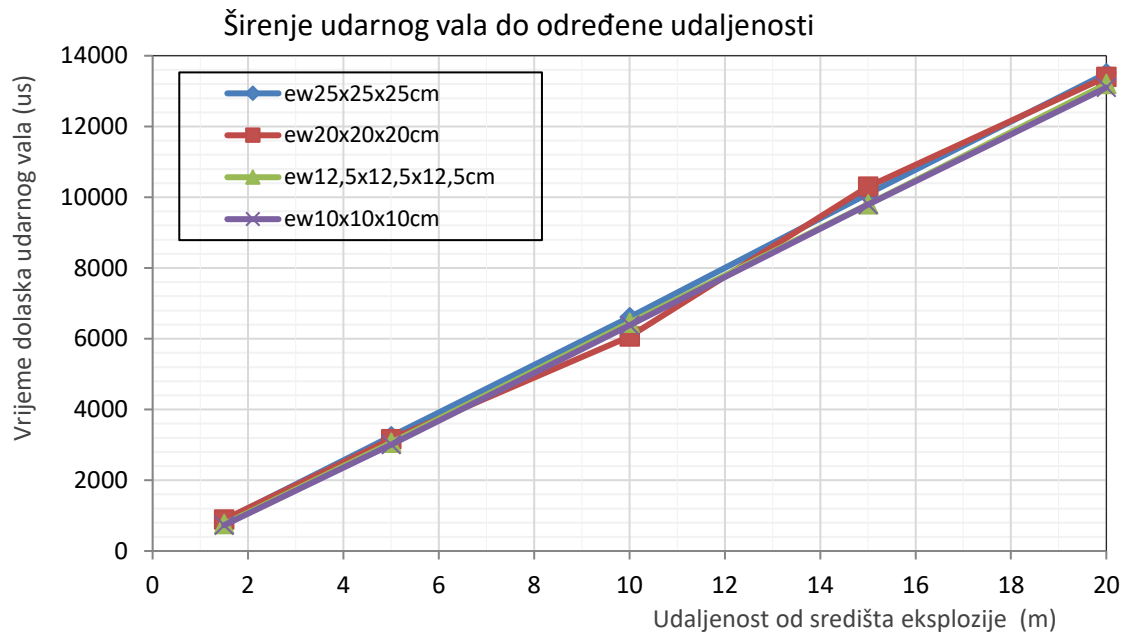
Brzina širenja udarnog vala nakon nekoliko milisekundi pada na brzinu širenja zvuka u vodi, a udarni val se širi kao zvučni val u vodi. U izlaznim rezultatima tlak – vrijeme dana je vrijednost maksimalnog tlaka i na dijagramu se, nakon odabira točke na dijagramu, može očitati vrijeme dolaska fronte udarnog vala na određenu udaljenost, što je prikazano na slikama 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 i 6.23.

Vrijeme dolaska maksimalnog tlaka dobije se odabirom točke na dijagramu tlaka udarnog vala u trenutku kad je on maksimalan u određenom elementu. Odabir udaljenosti odnosno konačnog elementa za odabir vremena uzeto je na isti način kao i kod određivanja vrijednosti maksimalnog tlaka to jest na desnom rubu elementa, što je prethodno opisano.

Za istraživanje ovisnosti vremena dolaska udarnog vala na neku udaljenost ovisno o veličini konačnih elemenata vode, korišteni su već ranije razvijeni modeli:

- Model 11 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 25x25x25 cm, 32000 elemenata, eksploziv: gustoća diskretizacije 12, 12907 elemenata,
- Model 14 - Volumen vode 20x5x5 m, elementi vode 20x20x20 cm, 62500 elemenata, eksploziv: gustoća diskretizacije 12, 12907 elemenata,
- Model 17 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 12,5x12,5x12,5 cm, 256000 elemenata, eksploziv: gustoća diskretizacije 12, 12907 elemenata i
- Model 20 - Volumen vode 20x5x5 m, konačni elementi vode 10x10x10 cm, 500000 elemenata, eksploziv gustoća diskretizacije 12, 12907 elemenata.

Na slici 6.24 prikazana su četiri dijagrama dolaska fronta udarnog vala (maksimalnog tlaka) na određenu udaljenost. Dijagrami su približno linearni što je povezano s činjenicom kako se fronta udarnog vala širi konstantnom brzinom širenja zvuka u vodi (brzina zadana u ulaznim podacima 1480 m/s), nakon nekoliko milisekundi.



Slika 6.24 Dijagram širenja udarnog vala u vodi za različite veličine konačnih elemenata

Na slikama u prethodnom dijelu rada prikazani su dijagrami vrijeme – tlak na kojima je očitano vrijeme dolaska fronta udarnog vala na određenu udaljenost. Na slici 6.22 vidljiva su neznatna odstupanja pojedinih dijagrama, dijagrami se smanjivanjem veličine elemenata uglavnom pomiču u lijevo, što znači kako udarni val dolazi ranije na određenu udaljenost.

Tako na slici 6.19 je, za udaljenost od 1,5 m, očitano vrijeme, za elemente veličine 10x10x10 cm 730  $\mu$ s, za elemente veličine 12,5x12,5x12,5 cm 758  $\mu$ s i za elemente veličine 20x20x20 cm 890  $\mu$ s. Fronta udarnog vala za elemente veličine 10x10x10 cm dolazi 28  $\mu$ s ranije od fronte udarnog vala za konačne elemente veličine 12,5x12,5x12,5 cm, a 160  $\mu$ s ranije od fronte udarnog vala za konačne elemente veličine 20x20x20 cm.

Treba napomenuti kako se pri odabiru točke „mišem“ na dijagramu tlak – vrijeme može dogoditi određena razlika, koja ovisi o preciznosti odabira točke maksimalne vrijednosti tlaka.



## 6.4 Utjecaj oblika eksplozivnog punjenja na dijagram tlaka

Oblik eksplozivnog punjenja može biti različitog oblika što ovisi o namjeni eksplozivnog punjenja, vrsti i agregatnom stanju eksploziva i drugim elementima. U ovom radu za potrebe istraživanja korišten je eksplozivni naboj oblika kugle i mase 136,08 kg, što je omogućilo provjeru točnosti modela i postupka jer za takvi eksplozivni naboj postoje eksperimentalni rezultati. U poglavlju 4.5 prikazani su neki numerički rezultati analize djelovanja eksplozije s različitim oblikom eksplozivnog punjenja.

Za potrebe istraživanja utjecaj oblika eksplozivnog punjenja na tlak razvijena su dva numerička modela, jedan s eksplozivnim punjenjem oblika kugle, a drugi oblika kocke. Masa eksplozivnog naboja je ista kao i kod svih numeričkih modela, u ovom radu, i iznosi 136,08 kg.

Usvojen je volumen vode u obliku kocke dimenzija 1,8x1,8x1,8 m jer na udaljenosti 1,5 od središta eksplozije imamo eksperimentalne rezultate tlaka, a povećanje od 30 cm je uzeto da se eliminiraju eventualni nepovoljni utjecaji ruba.

Masa eksploziva:  $W=136,08$  kg (300 lb),

Gustoća eksploziva:  $\rho=1630$  kg/m<sup>3</sup>.

Volumen eksploziva:

$$V_e = \frac{W}{\rho} = \frac{136,08}{1630} = 0,0835 \text{ m}^3 \quad (6.2)$$

Eksplozivni naboj u obliku kugle:

Volumen kugle:

$$V_e = \frac{4}{3} r^3 \pi . \quad (6.3)$$

Radijus kugle:

$$R_{ep} = \sqrt[3]{\frac{3V_e}{4\pi}}, \quad (6.4)$$

$$\pi = 3,142 ,$$

$$R_{ep} = \sqrt[3]{\frac{3 \times 0,0835}{4 \times 3,142}} = 0,2711 \text{ m} = 27,11 \text{ cm} . \quad (6.5)$$

Eksplozivni naboj u obliku kocke:

Volumen kocke:

$$V_e = a^3 . \quad (6.6)$$

Brid kocke:

$$a = \sqrt[3]{V_e} , \quad (6.7)$$

$$a = \sqrt[3]{0,0835} = 0,4371 \text{ m} = 43,71 \text{ cm} . \quad (6.8)$$

Dijagonala plohe kocke:

$$d_k = a\sqrt{2} \quad \text{i} \quad (6.9)$$

$$a = 43,71 \times 1,414 = 61,81 \text{ cm} . \quad (6.10)$$

Prostorna dijagonala kocke:

$$D_k = \sqrt{d^2 + a^2} \quad \text{i} \quad (6.11)$$

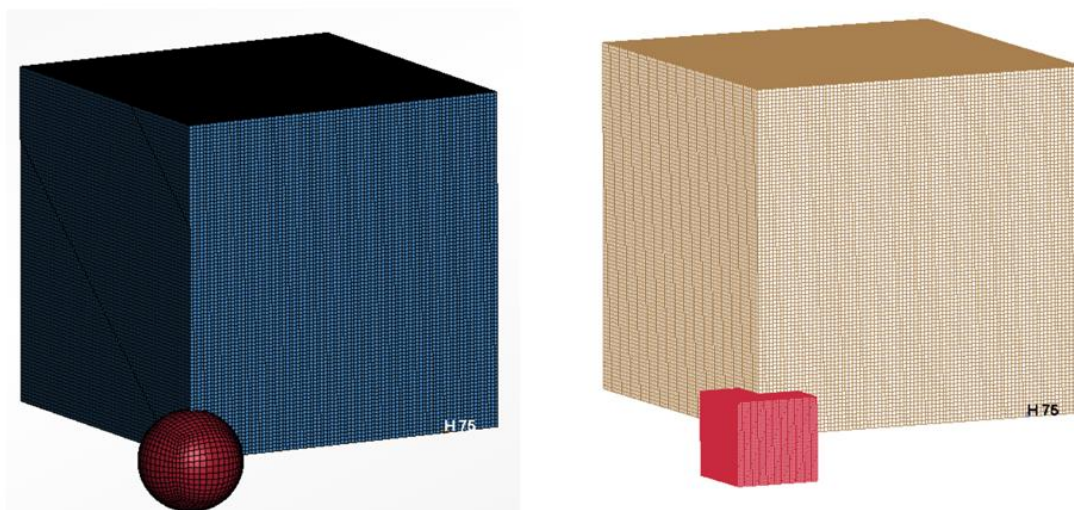
$$D_k = \sqrt{61,81^2 + 43,71^2} = 75,70 \text{ cm} . \quad (6.12)$$

Nakon određivanja radijusa eksplozivnog naboja oblika kugle i brida eksplozivnog naboja u obliku kocke, određen je volumen vode i razvijeni su novi numerički modeli:

- Model 29 - Volumen vode 1,8x1,8x1,8 m, konačni elementi vode 2x2x2 cm, 103823 elemenata, gustoća diskretizacije eksploziva 15, 100101 element i
- Model 30 - Volumen vode 1,8x1,8x1,8 m, konačni elementi vode 2x2x2 cm, 103823 elementa, konačni elementi eksploziva 0,93 cm, 103823 elementa.

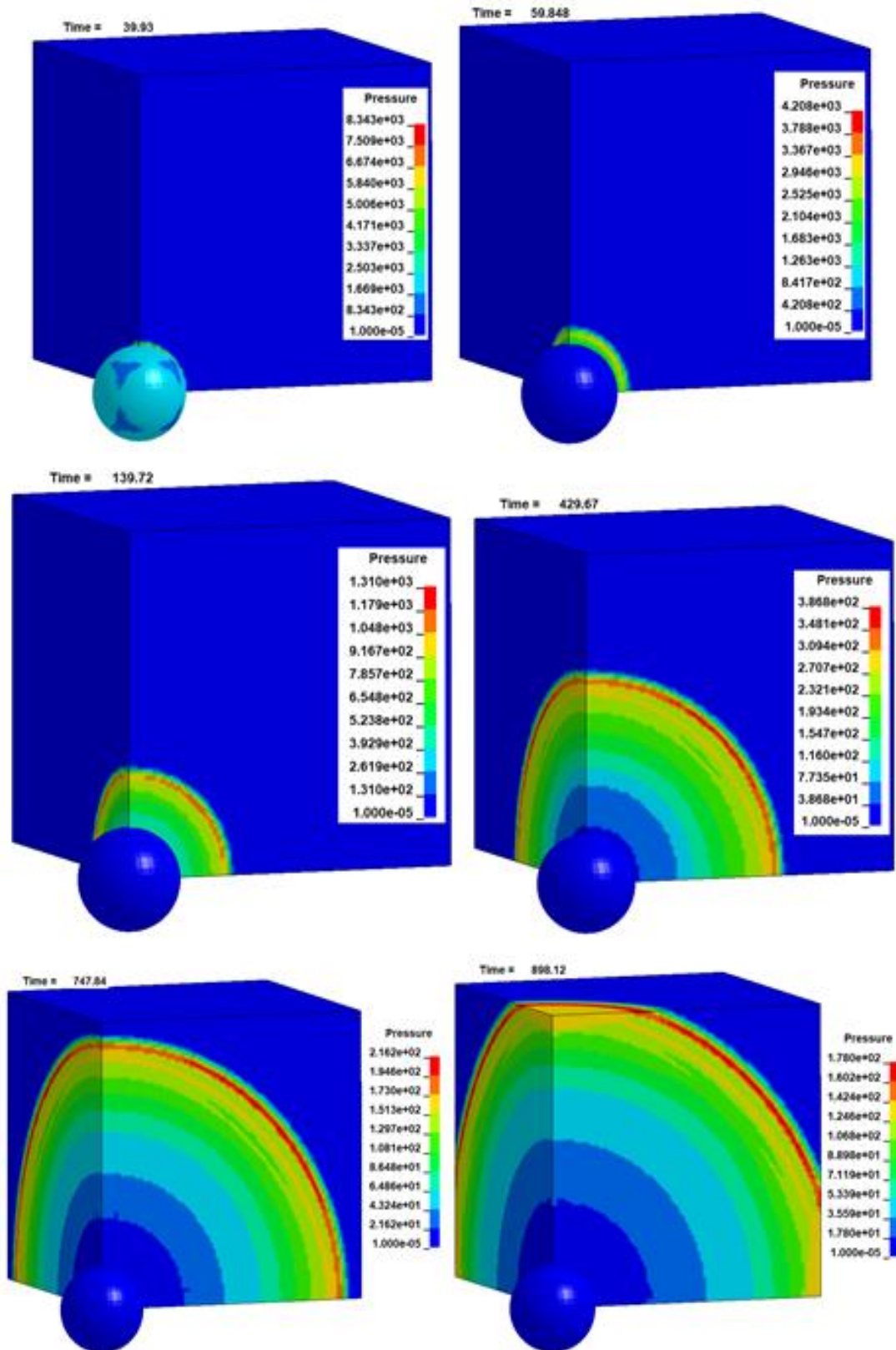
Pri diskretizaciji eksploziva nastojalo se dobiti približno jednak broj konačnih elemenata kako bi se eliminirali utjecaji velike razlike u broju (veličini) konačnih elemenata.

Na slici 6.25 prikazani su diskretizirani modeli podvodne eksplozije s eksplozivnim nabojem oblika kugle i oblika kocke.

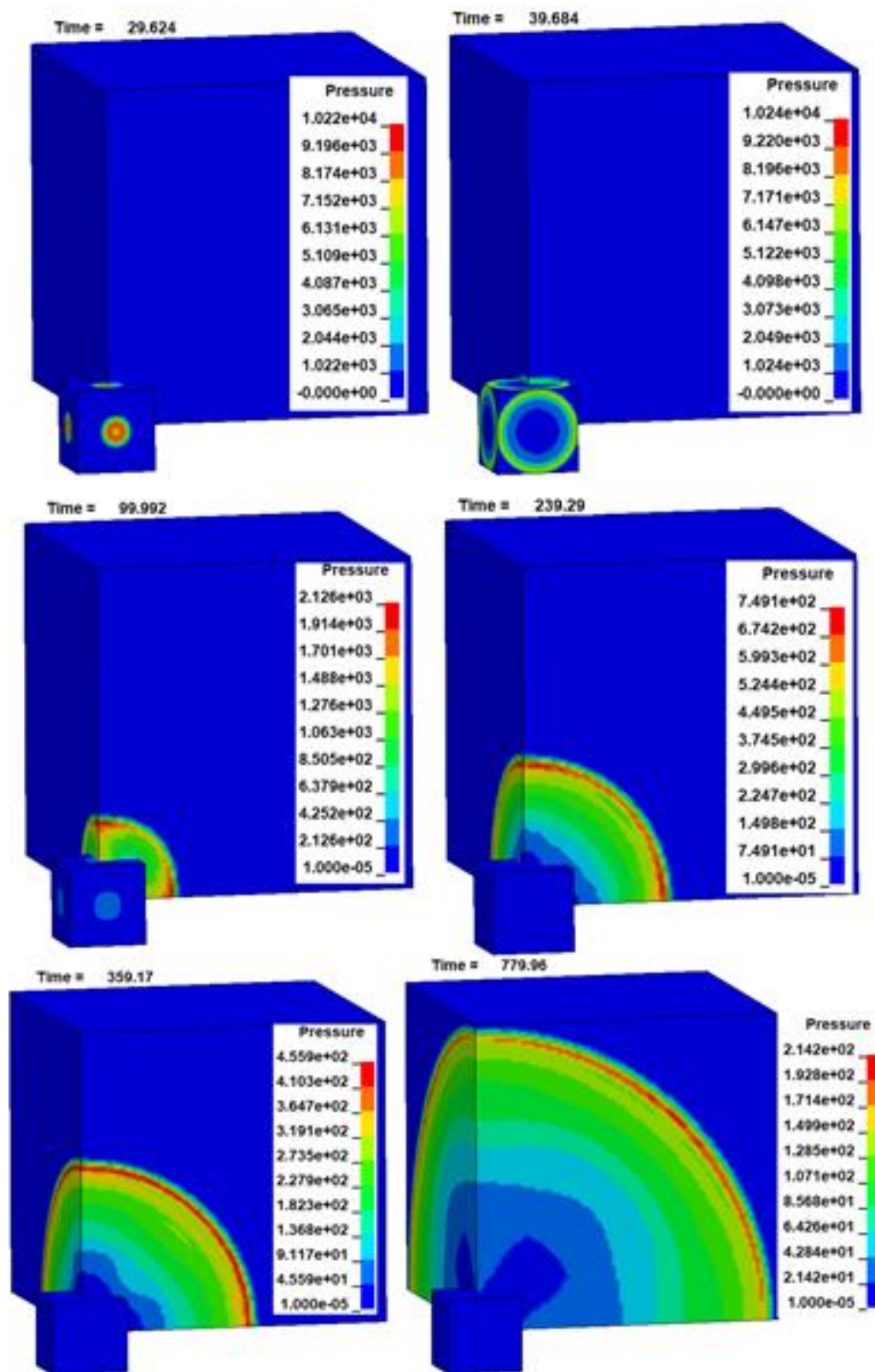


Slika 6.25 Numerički modeli podvodne eksplozije s različitim oblikom eksplozivnog naboja, kugla (lijevo) i kocka (desno)

Na slikama 6.26 i 6.27 je širenje udarnog vala u vodi za eksplozivni naboj oblika kugle i oblika kocke.



Slika 6.26 Širenje udarnog vala u modelu s eksplozivnim punjenjem oblika kugle



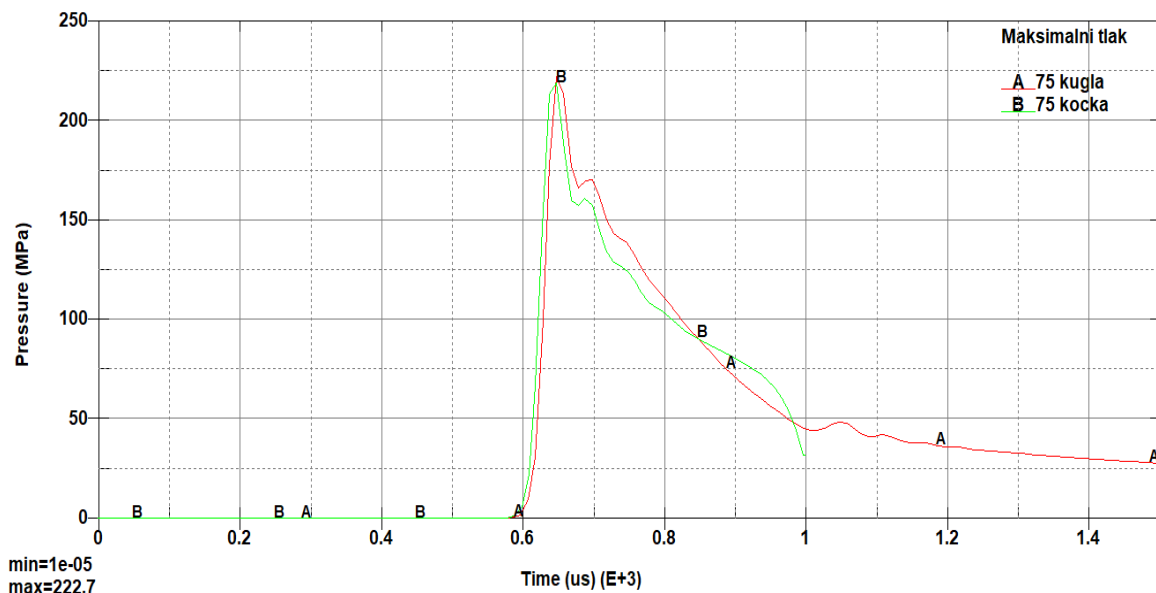
Slika 6.27 Širenje udarnog vala u vodi s eksplozivnim nabojem oblika kocke

Na slikama je prikazano širenje detonacijskog udarnog vala u eksplozivnom punjenju (brzina zadana u ulaznim podacima 7840 m/s). Na slici 6.26 se vidi, kod eksplozivnog punjenja oblika kugle kako detonacijski val dolazi na površinu kugle u isto vrijeme jer je jednaka udaljenost od središta eksplozije. Na slici 6.27 se vidi, kod eksplozivnog punjenja oblika kocke, kako detonacijski val dolazi do najbližih točaka na ploham kocke, širi se na kompletne plohe i na kraju dolazi do vrhova kocke. Također se vide po bojama skale tlakova neke razlike u početnom vremenu u raspodjeli tlakova.

Nakon detonacije eksplozivnog naboja detonacijski val se širi radijalno u eksplozivnom naboju. Dolaskom detonacijskog vala na vanjske rubove eksplozivnog naboja energija se prenosi na vodu. Nakon predaje energije eksplozivni naboj ostaje u zadanoj geometriji bez promjene oblika.

Nakon izvršenog proračuna modela u računalnom programu LS Dyna dobiveni su izlazni podaci, od kojih su preuzeti rezultati dijagrami tlak – vrijeme u konačnim elementima vode broj 75, kao što je naznačeno na dijagramu i slici 6.25, za potrebe istraživanja.

Kao primjer, na slici 6.28 prikazani su dijagrami promjene tlaka u vremenu za eksplozivni naboj oblika kugle i oblika kocke.

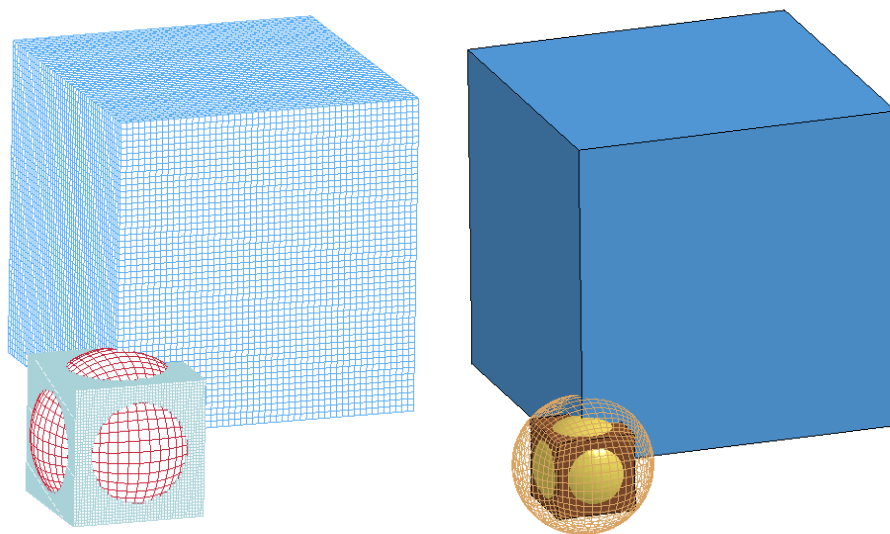


Slika 6.28 Promjena tlaka u vremenu na udaljenosti 1,5 m

Maksimalni tlak udarnog vala podvodne eksplozije za eksplozivni naboj oblika kugle, na udaljenosti od središta eksplozije od 1,5 m, je 222,70 MPa, a za eksplozivni naboj oblika kocke je 219,24 MPa.

Uspoređujući numerički dobivene vrijednosti s vrijednosti tlaka koja je dobivena na eksperimentu (234,40 MPa) i vrijednosti tlaka koja je dobivena pomoću usvojenog empirijskog izraza (210,90 MPa). Vidimo kako se dobiveni numerički rezultati maksimalnog tlaka dobro slažu s rezultatom eksperimenta i rezultatom dobivenim pomoću empirijskog izraza pa se modeli mogu prihvatiti za daljnje istraživanje. Također se vidi kako je vrijednost tlaka bliža vrijednosti dobivenoj eksperimentalno. Manje veličine konačnih elemenata vode (2 cm) i dimenzija volumena vode oblika kocke (1,8x1,8x1,8 m) su dale doprinos točnosti rezultata, što potvrđuje rezultate i zaključke prethodnih istraživanja.

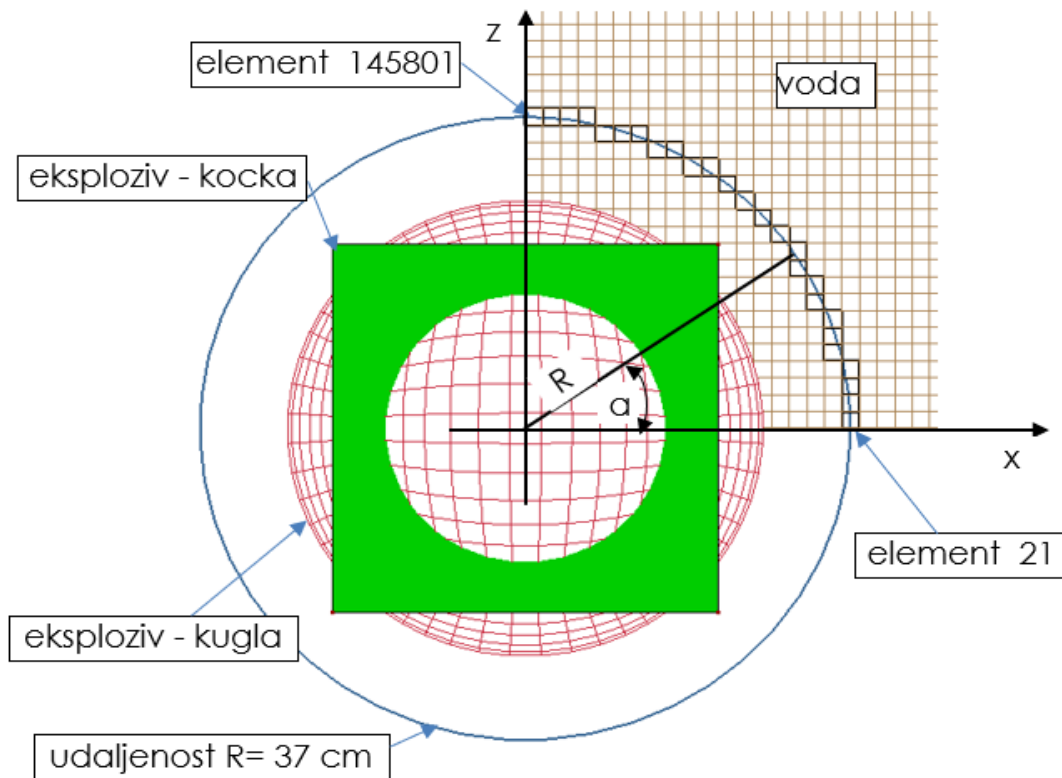
Za usporedbu dijagrama tlaka za eksplozivni naboj oblika kugle i oblika kocke usporedit će se vrijednosti tlaka u elementima uz vanjski rub kugle (anvelope eksplozivnih punjenja) u blizini promjera prostorne dijagonale kocke, promjer kugle je 76 cm, polumjer 38 cm.



Slika 6.29 Prikaz dijela volumena vode i eksplozivnih punjenja (lijevo) i njihove anvelope (desno)

Na slici 6.29 su prikazani oblici eksplozivnih naboj (kugla i kocka) i anvelope (kugla) eksplozivnih naboj. Na slici je volumen vode smanjen na 1x1x1 m radi bolje preglednosti eksplozivnih naboj. Nakon odabira elemenata uzeti su dijagrami tlak – vrijeme i očitane vrijednosti maksimalnih tlakova udarnog vala. Pri odabiru konačnih

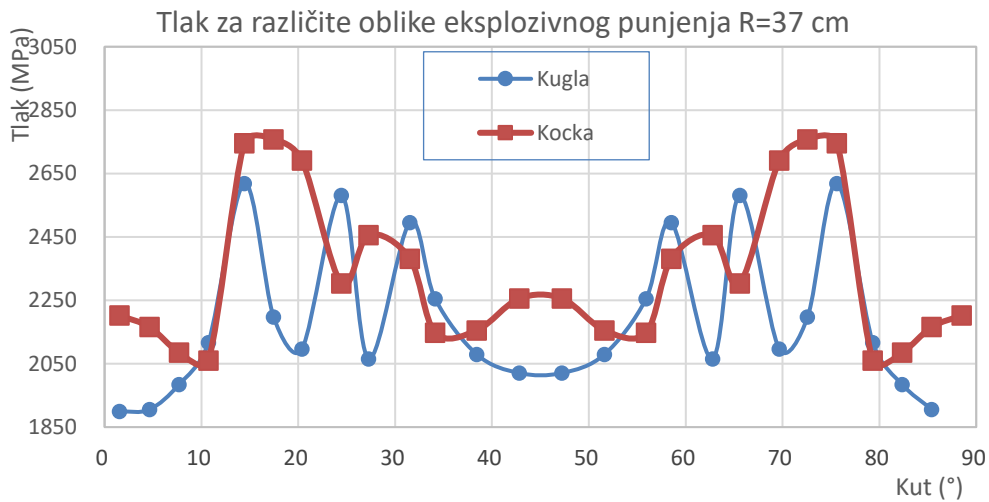
elemenata, koji se nalazi na presjeku anvelope (kugle) i ravnine x-z, konačni elementi su odabrani stepenasto preko kojih prolazi presječna kugle i ravnine x - z. Treba napomenuti kako je tlak na čitavom konačnom elementu jednake vrijednosti tako da je važno da presječna prolazi bilo kojim dijelom najbližeg elementa, vidjeti sliku 6.30.



Slika 6.30 Prikaz konačnih elemenata na kojima je odabrana vrijednost tlaka

Na slici 6.30 prikazana je presječna anvelope i ravnine x-z na kojoj su odabrani konačni elementi za pripremu dijagrama i tablice. Odabrana udaljenosti je 37 cm (središte konačnog elementa 19), očitane su maksimalne vrijednosti tlaka na frontu udarnog vala. Vrijednost radijusa treba shvatiti kao vrijednost 37 cm ili najbližu vrijednost, koja se dobije kao udaljenost od središta koordinatnog sustava do središta određenog konačnog elementa. Temeljem rezultata numeričkog postupka pripremljeni su dijagrami i tablica.

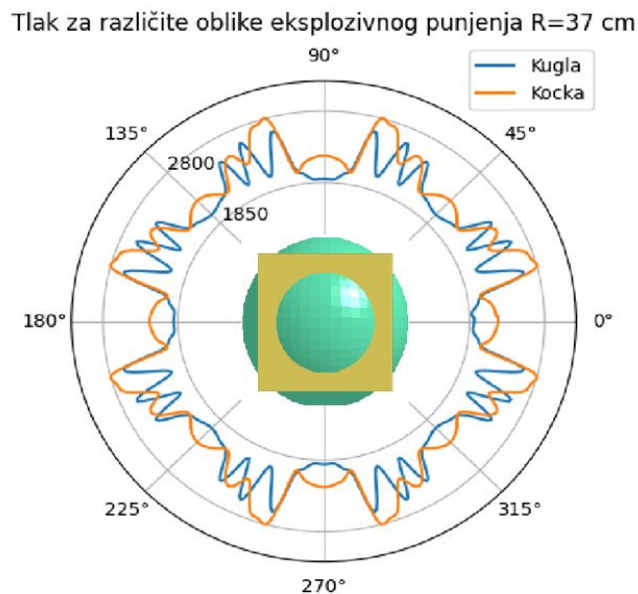
Na slici 6.31 prikazana je ovisnost tlaka i kuta između radijusa i osi x, počevši od osi x prema vertikali (os y) za  $\frac{1}{4}$  područja, koje je obuhvaćeno modelom.



Slika 6.31 Tlak za eksplozivni naboj oblika kugle i kocke na udaljenosti 37 cm

Na slici 6.31 prikazana je promjena tlaka na udaljenosti od cca 37 cm od središta eksplozije u funkciji kuta, za eksplozivni naboj oblika kugle (plava) i za eksplozivni naboj oblika kocke (crvena).

Na slici 6.32 prikazana je ovisnost tlaka o kutu u polarnom koordinatnom sustavu za kompletan model, 360°.



Slika 6.32 Promjena tlaka lak za eksplozivne naboje oblika kugle i kocke

U tablici 6.12 prikazane su vrijednosti tlaka, za eksplozivni naboj oblika kocke i oblika kugle, u funkciji kuta te odstupanja ( $\Delta$ ) tlakova, na udaljenosti od 37 cm.

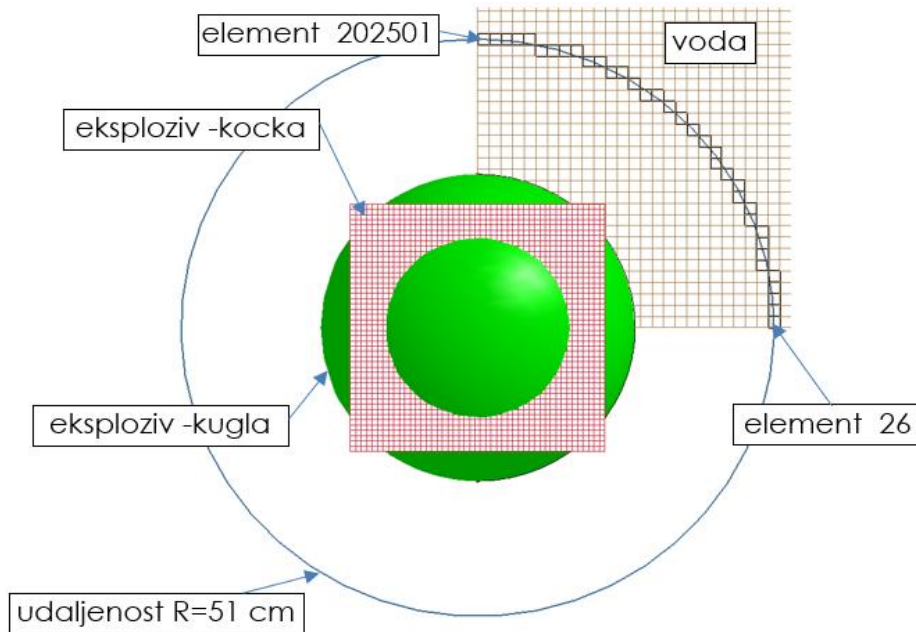


Tablica 6.12 Tlak za eksplozivni naboj oblika kugle i kocke na udaljenosti od 37 cm

Element	Udaljenost središta elementa		Radijus	Kut	Tlak		$\Delta$
	x	z			Kugla	Kocka	
	(cm)	(cm)			(MPa)	(MPa)	
19	37	1	37,01	1,5489	1899,2	2202,4	-16,0
8119	37	3	37,12	4,6378	1905,6	2165,8	-13,7
16219	37	5	37,34	7,7000	1985,0	2085,8	-5,1
24319	37	7	37,66	10,7186	2116,9	2060,0	2,7
32418	35	9	36,14	14,4281	2618,9	2746,0	-4,9
40518	35	11	36,69	17,4560	2197,6	2758,0	-25,5
48618	35	13	37,34	20,3868	2097,0	2691,0	-28,3
56717	33	15	36,25	24,4564	2581,4	2303,3	10,8
64817	33	17	37,12	27,2692	2065,6	2456,2	-18,9
72916	31	19	36,36	31,5202	2495,8	2381,3	4,6
81016	31	21	37,44	34,1318	2255,2	2148,2	4,7
89115	29	23	37,01	38,4375	2079,5	2155,5	-3,7
97214	27	25	36,80	42,8191	2020,7	2255,9	-11,6
105313	25	27	36,80	47,2265	2020,7	2255,9	-11,6
113412	23	29	37,01	51,6081	2079,5	2155,5	-3,7
121511	21	31	37,44	55,9139	2255,2	2148,2	4,7
121510	19	31	36,36	58,5254	2495,8	2381,3	4,6
129609	17	33	37,12	62,7765	2065,6	2456,2	-18,9
129608	15	33	36,25	65,5893	2581,4	2303,3	10,8
137707	13	35	37,34	69,6589	2097,0	2691,0	-28,3
137706	11	35	36,69	72,5896	2197,6	2758,0	-25,5
137705	9	35	36,14	75,6176	2618,9	2746,0	-4,9
145804	7	37	37,66	79,3271	2116,9	2060,0	2,7
145803	5	37	37,34	82,3457	1985,0	2085,8	-5,1
145802	3	37	37,12	85,4078	1905,6	2165,8	-13,7
145801	1	37	37,01	88,4967	1899,2	2202,4	-16,0

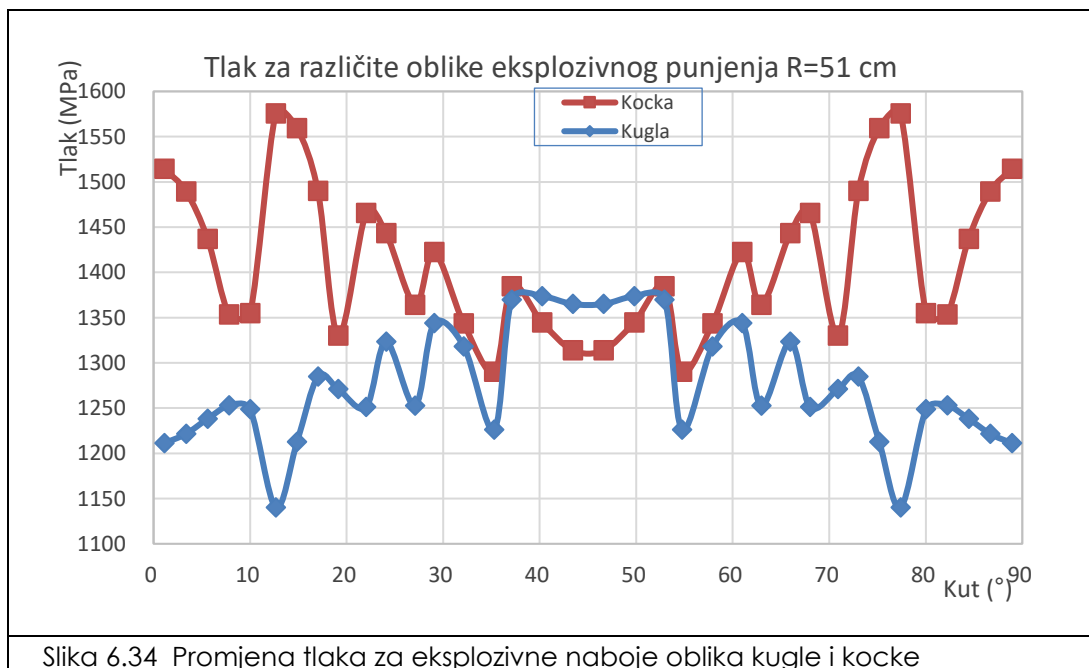
Nadalje, po istoj metodologiji, je odabrana udaljenosti od 51 cm (središte konačnog elementa 26) i očitane su maksimalne vrijednosti tlaka na fronti udarnog vala u odabranim elementima i pripremljeni su dijagrami tablica.

Na slici 6.33 prikazani su eksplozivni naboji i konačni elementi na koji se nalaze najbliže udaljenosti od 51 cm.



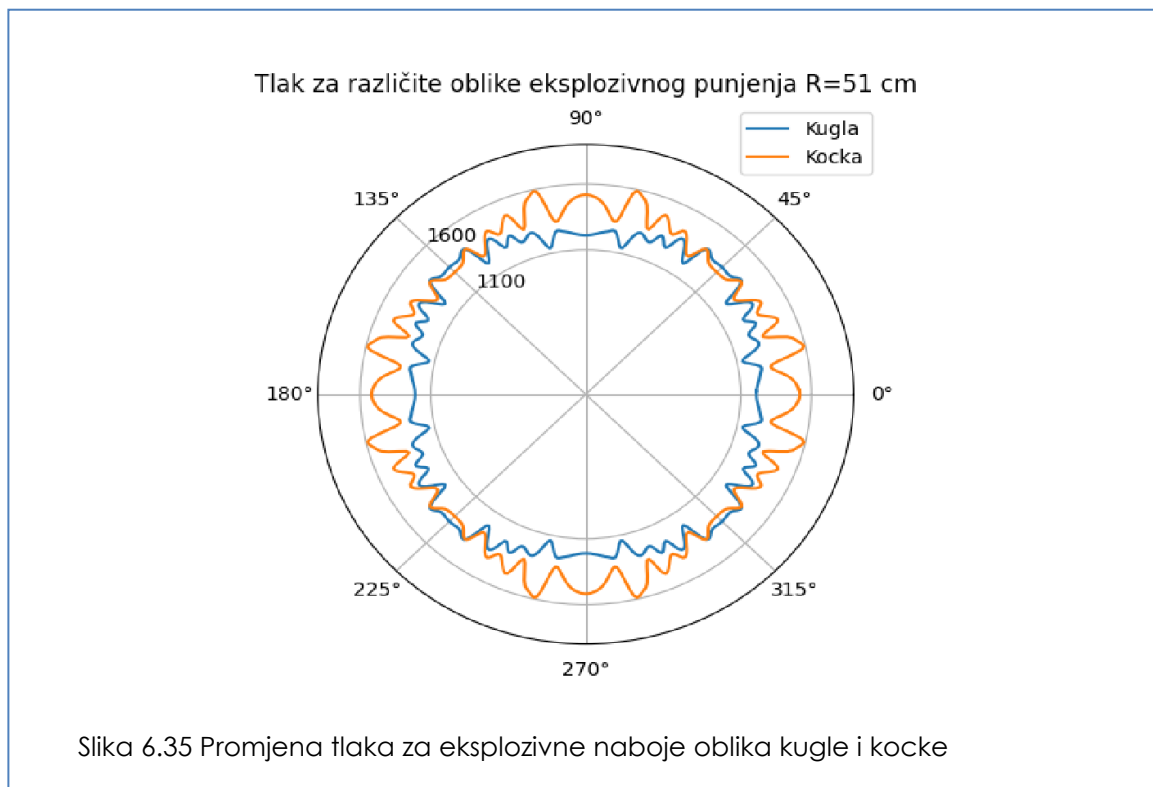
Slika 6.33 Prikaz konačnih elemenata na kojima je odabrana vrijednost tlaka

Na slici 6.34 prikazan je dijagram maksimalnog tlaka za eksplozivni naboj oblika kugle (plavo) i oblika kocke (crveno) u elementima na udaljenosti od središta eksplozije oko 51 cm pod kutom kojeg spojnica ishodišta koordinatnog sustava i središta elementa zatvara s osi x, za modelirano područje odnosno  $\frac{1}{4}$  globalnog područja.



Slika 6.34 Promjena tlaka za eksplozivne naboje oblika kugle i kocke

Na slici 6.35 prikazana je ovisnost tlaka i kuta u polarnom koordinatnom sustavu za kompletan model podvodne eksplozije 360°.



U tablici 6.13 prikazane su vrijednosti tlaka, za eksplozivne naboje oblika kocke i oblika kugle, u funkciji kuta te odstupanja ( $\Delta$ ) tlakova, na udaljenosti od 51 cm.

Tablica 6.13 Tlak za eksplozivne naboje oblika kugle i kocke na udaljenosti od 51 cm

Element	Udaljenost središta elementa		Radijus (cm)	Kut (°)	Tlak		Δ %
	x	z			Kugla	Kocka	
	(cm)	(cm)			(MPa)	(MPa)	
26	51	1	51,01	1,1239	1211,2	1514,5	-25,0
8126	51	3	51,09	3,3682	1221,5	1489,3	-21,9
16226	51	5	51,24	5,6022	1238,2	1437,0	-16,1
24326	51	7	51,48	7,8193	1252,8	1353,4	-8,0
32426	51	9	51,79	10,0131	1248,5	1354,8	-8,5
40525	49	11	50,22	12,6590	1140,0	1575,7	-38,2
48625	49	13	50,70	14,8662	1212,6	1559,3	-28,6
56725	49	15	51,24	17,0292	1284,6	1489,8	-16,0
64825	49	17	51,87	19,1433	1270,9	1330,0	-4,7
72924	47	19	50,70	22,0224	1251,0	1465,4	-17,1
81024	47	21	51,48	24,0877	1323,2	1443,1	-9,1
89123	45	23	50,54	27,0858	1252,5	1363,9	-8,9
97223	45	25	51,48	29,0693	1343,8	1422,2	-5,8
105322	43	27	50,77	32,1413	1318,1	1343,3	-1,9
113421	41	29	50,22	35,2903	1226,0	1290,1	-5,2
121521	41	31	51,40	37,1117	1369,7	1384,5	-1,1
129620	39	33	51,09	40,2568	1373,5	1344,5	2,1
137719	37	35	50,93	43,4309	1364,9	1313,9	3,7
145818	35	37	50,93	46,6148	1364,9	1313,9	3,7
153917	33	39	51,09	49,7889	1373,5	1344,5	2,1
162016	31	41	51,40	52,9340	1369,7	1384,5	-1,1
162015	29	41	50,22	54,7553	1226,0	1290,1	-5,2
170114	27	43	50,77	57,9044	1318,1	1343,3	-1,9
178213	25	45	51,48	60,9763	1343,8	1422,2	-5,8
178212	23	45	50,54	62,9598	1252,5	1363,9	-8,9
186311	21	47	51,48	65,9579	1323,2	1443,1	-9,1
186310	19	47	50,70	68,0232	1251	1465,4	-17,1
194409	17	49	51,87	70,9023	1270,9	1330,0	-4,7
194408	15	49	51,24	73,0165	1284,6	1489,8	-16,0
194407	13	49	50,70	75,1795	1212,6	1559,3	-28,6
194406	11	49	50,22	77,3867	1140	1575,7	-38,2
202505	9	51	51,79	80,0326	1248,5	1354,8	-8,5
202504	7	51	51,48	82,2264	1252,8	1353,4	-8,0
202503	5	51	51,24	84,4435	1238,2	1437,0	-16,1
202502	3	51	51,09	86,6775	1221,5	1489,3	-21,9
202501	1	51	51,01	88,9218	1211,2	1514,5	-25,0

Temeljem provedenih istraživanja i dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Detonacijski val se širi u eksplozivnom punjenju po teoriji udarnog vala i dolazi na najbliže točke od središta, kod kugle istovremeno, a kocke postepeno.
- Maksimalne vrijednosti tlaka u konačnim elementima na udaljenosti 37 cm i 51 cm imaju različite vrijednosti u pojedinim konačnim elementima vode. Maksimalno relativno odstupanje tlaka, na udaljenosti od 37cm, je 28,3 %, a na udaljenosti 51 cm, 38,2 %.
- Maksimalna vrijednost tlaka, na udaljenosti 1,5 m, je za naboj oblika kugle, 222,70 MPa, a za eksplozivni naboj oblika kocke je 219,24 MPa.
- Numerički rezultati tlaka su između vrijednosti dobivene pomoću empirijskog izraza (210,19 MPa) i eksperimentalne vrijednosti (234.40 MPa).
- Za veličinu konačnih elemenata vode od 2 cm, numerički rezultati se dobro slažu s rezultatima dobivenim pomoću empirijskog izraza i eksperimentalno, što potvrđuje dio 1. hipoteze.
- Oblik eksplozivnog punjenja na udaljenosti od 1,5 m nema velik utjecaj na rezultat maksimalnog tlaka, što potvrđuje zaključak istraživanja u 4. poglavlju rada.

## 6.5 Numeričko modeliranje podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode

### 6.5.1 Opis numeričkog postupka i pretpostavke

Prethodno je dan, u 3. poglavlju, kratak fizikalni opis ograničenja podvodne eksplozije slobodnom površinom vode te su dane neke opće empirijske matematičke formulacije za određivanje gornje i donje granice područja kavitacije te tlaka od izravnog tlačnog udarnog vala i negativnog tlaka od neizravnog reflektiranog vlačnog udarnog vala.

Postavlja se: Računalni program LS Dyna ima sposobnost rješavanja zadatke podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode.

Također se pretpostavlja kako ograničenje podvodne eksplozije slobodnom površinom vode utječe na djelovanje na podvodnu građevinu.

Za analizu su usporedno razvijeni numerički modeli podvodne eksplozije u neograničenoj i ograničenoj sredini te su provedene numeričke simulacije u računalnom programu LS Dyna, u cilju istraživanja utjecaja slobodne površine vode na podvodnu eksploziju. Analizirani su dobiveni rezultati numeričkog postupka i rezultati dobiveni pomoću empirijskih izraza kako bi se provjerila i potvrdila ispravnost pretpostavke o sposobnosti modela i računalnog programa LS Dyna.

Modeliranje podvodne eksplozije u ograničenoj i neograničenoj sredini provodi se uz modificirane pretpostavke, koje su prethodno spomenute .

Modeliranje podvodne eksplozije u neograničenoj i ograničenoj sredini provodi se uz pretpostavke homogenosti i izotropnosti eksploziva i vode te simetričnosti kugle eksploziva uronjenog u središte promatranog volumena vode. Zanemaren je atmosferski i hidrostatički tlak, a pretpostavlja se kako je promatrani volumen vode bez mjehurića zraka i ima ujednačenu gustoću i temperaturu. Pretpostavlja se kako su osigurani preduvjeti za istovremenu detonaciju eksplozivnog punjenja. Koriste se dvije ravnine simetrije koje se sijeku i formiraju koordinatne osi što omogućava analizu samo 1/4 prostora vode i eksploziva. Središte kugle eksploziva i promatranog prostora (volumena) vode je u ishodištu koordinatnog sustava. Definiranje interakcije na kontaktu ploha u ravninama simetrije između promatranog dijela prostora i okoline zbog simetričnosti, homogenosti i izotropnosti rješava se zadavanjem rubnih uvjeta.

#### 6.5.2 Empirijski izrazi za izračun tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i eksplozije ograničene slobodnom površinom vode

Empirijski izraz za određivanje vrijednosti tlaka podvodne eksplozije [20] u neograničenoj sredini kao što je već ranije navedeno je:

$$P_m(R) = K_1 \left( \frac{(\sqrt[3]{W})}{R} \right)^{A_1} \text{ (MPa)}, \quad (6.13)$$

gdje je:

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (m),

$W$  - masa eksploziva (kg) i

$K_1$  i  $A_1$  koeficijenti [42].

Empirijski izraz za izračun vrijednosti tlaka podvodne eksplozije u ograničenoj sredini, gdje je ograničenje slobodna površina vode je:

maksimalna vrijednost tlaka od izravnog udarnog vala [20]

$$p_m(x, z) = K_1 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{A_1} \text{ (MPa)}, \quad (6.14)$$

maksimalna negativna vrijednost tlaka od reflektiranog udarnog vala [20]

$$p_m(x, z) = -K_1 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{r_2} \right)^{A_1} \text{ (MPa)}, \quad (6.15)$$

gdje je:

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (m),

$r_2$  - udaljenost od središta eksplozije do slobodne površine vode i od slobodne površine vode do promatrane točke (m) (vidjeti sliku 3.20),

$W$  - masa eksploziva (kg) i

$K_1$  i  $A_1$  - koeficijenti.

Potrebno je napomenuti kako se maksimalna pozitivna vrijednost tlaka i maksimalna negativna vrijednost tlaka pojavljuju u različitim vremenima.

Promjena ukupnog tlaka u vremenu u promatranoj točki A podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode  $p_A(x, y, t)$  može se izračunati, koristeći sljedeće relacije [20] i [15]:

$$p_{max1}(x, z, t) = K_2 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_2} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\theta_1}\right)} \text{ (MPa)}; \quad t_1 = \frac{R}{c}; \quad t \geq t_1, \quad (6.16)$$

$$p_{max2}(x, z, t) = -K_2 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_2} \right]^{A_{12}} e^{-\left(\frac{t-t_2}{\theta_2}\right)} \text{ (MPa)}; \quad t_2 = \frac{r_2}{c}; \quad t \geq t_2, \quad (6.17)$$

$$\theta_1 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_2} \text{ (ms)}, \quad (6.18)$$

$$\theta_2 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_2} \right]^{A_2} \text{ (ms)}, \quad (6.19)$$

gdje su:

$x$  i  $z$  - koordinate promatrane točke (m),

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (m),

$r_2$  - udaljenost od središta imaginarne eksplozije (vidjeti sliku 3.20) do promatrane točke, odnosno od središta eksplozije do slobodne površine vode i od slobodne površine vode do promatrane točke (m),

$t_1$  - vrijeme putovanja izravnog udarnog vala od središta eksplozije do promatrane točke (ms),

$t_2$  - vrijeme putovanja udarnog vala od središta eksplozije do slobodne površine vode i reflektiranog vlačnog vala od slobodne površine vode do promatrane točke (ms),

$c$  – brzina zvuka u vodi (m/s),

$D$  – dubina eksplozivnog punjenja (m),

$\theta$  - koeficijent smanjenja tlaka (ms),

$W$  – masa eksplozivnog punjenja (kg) i

$K_1$ ,  $K_2$ ,  $A_1$  i  $A_2$  – koeficijenti udarnog vala [20], [53] i [50].

Ukupna vremenska promjena tlaka u točki A sastoji se od tlaka izravnog tlačnog udarnog vala koji dolazi izravno iz centra eksplozije na udaljenosti  $r_1$  i negativnog tlaka reflektiranog udarnog tlačnog vala od slobodne površine vode na udaljenosti  $r_2$ , koji dolazi kasnije.

U ovom radu za potrebe proračuna usvojene su sljedeće vrijednosti koeficijenata:  $K_1 = 52,39$  i  $A_1 = 1,13$  te  $K_2 = 0,092$  i  $A_2 = -0,185$  [18 i 44].

Usvojeni koeficijenti ( $K_1$  i  $A_1$ ) uzeti su iz literature Cole, za masu eksploziva 136,08 kg, oblika kugle. Eksploziv oblika kugle i mase eksploziva 136,08 kg koristi se u numeričkom modelu. Ostali koeficijenti su uzeti iz literature [44].

Posebna pažnja je posvećena odabiru mjernih jedinica i usklađivanju mjernih jedinica numeričkih rezultata (MPa i  $\mu$ s) i mjernih jedinica koje se koriste u empirijskim izrazima. Utjecaj atmosferskog i hidrostatičkog tlaka u empirijskim izrazima je zanemaren kao i kod numeričkih modela.

### 6.5.3 Osnovni elementi numeričkih modela podvodne eksplozije

Modeliranje podvodne eksplozije u računalnom programu LS Dyna zahtjeva primjenu prethodno definiranih i navedenih vrijednosti određenih parametara vode i eksploziva te zraka kao i ostale elemente, potrebne za realizaciju numeričke simulacije [69], [70], [15] i [43]:

**ZRAK** MAT\_NULL: 009

RO=0,00128; Gustoća  $\rho=0,00128$  g/cm<sup>3</sup>;

EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL C<sub>4</sub>= C<sub>5</sub>=0,4;

HOURGLASS QM=1,0 E-06;

Promatrano područje zraka: oblika kvadra, a dimenzije su, za smjer x i y, kao i dimenzije vode, a u smjeru z je visina 1 m.



Mjerne jedinice za unos podataka u računalni program LS Dyna su:

cm, g i  $\mu$ s (mikro sekunda (us)).

Utvrđivanje razlike maksimalnog tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj i ograničenoj sredini slobodnom površinom vode, provedeno je korištenjem po tri modela podvodne eksplozije.

Modeli se razlikuju po dubini podvodne eksplozije, koje su: 6,1 m (20 ft); 12,2 m (40 ft) i 19,8 m (65 ft), eksplozivni naboj, eksploziv TNT, masa 136,08 kg (300 lb) oblika kugle, polumjer kugle je  $R_{ep}=27,11$  cm, veličine su preuzete iz literature, Cole [3]. Promatrani volumeni vode: 5x3x6,1 m; 5x3x12,2 m i 5x3x19,8 m, sloj zraka iznad vode je visine 1 m, gustoća diskretizacije eksploziva je 6, prema postavkama programske diskretizacije kugle.

Sloj zraka iznad vode je unesen u računalni program prema uputama izrađivača programa. Računalni program LS Dyna se sastoji od tri dijela: definiranje modela, rješavanje zadaće i analiza rezultata. U prvom dijelu definira se numerički model, a sastoji se od dva dijela. U prvom dijelu se unose geometrijski elementi pojedinih dijelova modela (eksploziv, voda, zrak, beton) i gustoća i oblik mreže pojedinih elemenata. Zatim se unose karakteristike materijala (MAT), parametri jednadžbe stanja (engl. EOS), (engl. HOURGLASS, SECTION (ELFORM (engl. EQ.11))): (engl. 1 point ALE multi - material element), za eksploziv, vodu i zrak), dijelovi modela (engl. PART) povezuje (engl. ELFORM), jednadžbu stanja, materijal, hourglass, za eksploziv, vodu i zrak). Nakon završetka unosa i povezivanja elemenata modela, model se testira pomoću naredbe Model Chek. Ako je nešto pogrešno uneseno ili pogrešno unesena veza elemenata, pojavljuje se greška. Kad je prvi dio završen pristupa se drugom dijelu unosa podataka, koji je neovisan od prvog dijela, koji je u zasebnoj aplikaciji.

Odabire se aplikacija (engl. Application), odabire se od ponuđenih zadaća (eng. ALE Setup) u kojem se unose jedinice mjere, pojedini materijali i grupe materijala, veze materijala, karakteristike i EOS materijala, kroz nazivne brojeve, volumene pojedinih materijala, kontrolu simulacije, vrijeme trajanja simulacije, položaj eksploziva i dr. Zatim se unose rubni uvjeti zahvaćajući mišem sve čvorove vanjskih ploha (ovojnice), propusne, nepropusne plohe i sl. Ukoliko je interakcija s betonom, unosi se beton kroz materijal (Lagrangeov materijal), u prvom dijelu. U drugom dijelu se ulazi u poseban dio unosa, gdje se unosi interakcija ALE grupe materijala (eksploziv,

voda i zrak) (engl. *MASTER*) i betona (engl. *SLAVE*) i unose se elementi njihove interakcije. Ovi podaci se prihvaćaju, zatim se vraćamo u *ALE Setup* i odabiremo „Done“ i aplikacija sve te unesene podatke obradi, provede dio pripremnih proračuna (spregne elemente) i stvori neke druge *Keyworde* u *Keyword Manegeru* (engl. *ALE, BOUNDARY, CONTROL, DATANASE, INCLUDE, INITAL, KEYWORD, SET i TITLE*). Izlazni dokumenti su: *ls\_ale.k, ls\_ale\_model.k i ls\_ale\_vf.k*. Nakon završetka prvog dijela unose se podaci u drugi dio, zasebni dio programa, koji rješava zadaću (engl. *RUN*). Važno je istaći pri unosu podataka, greške se ne mogu popravljati, posebno u drugom dijelu, već se ponovno unose podaci. Ovdje je ukratko opisan unos ulaznih podataka i kompleksnost programa. Unos podataka je vrlo složen i dugotrajan, sasvim različit od drugih programa slične namjene.

Za potrebe istraživanja razvijeni su sljedeći numerički modeli:

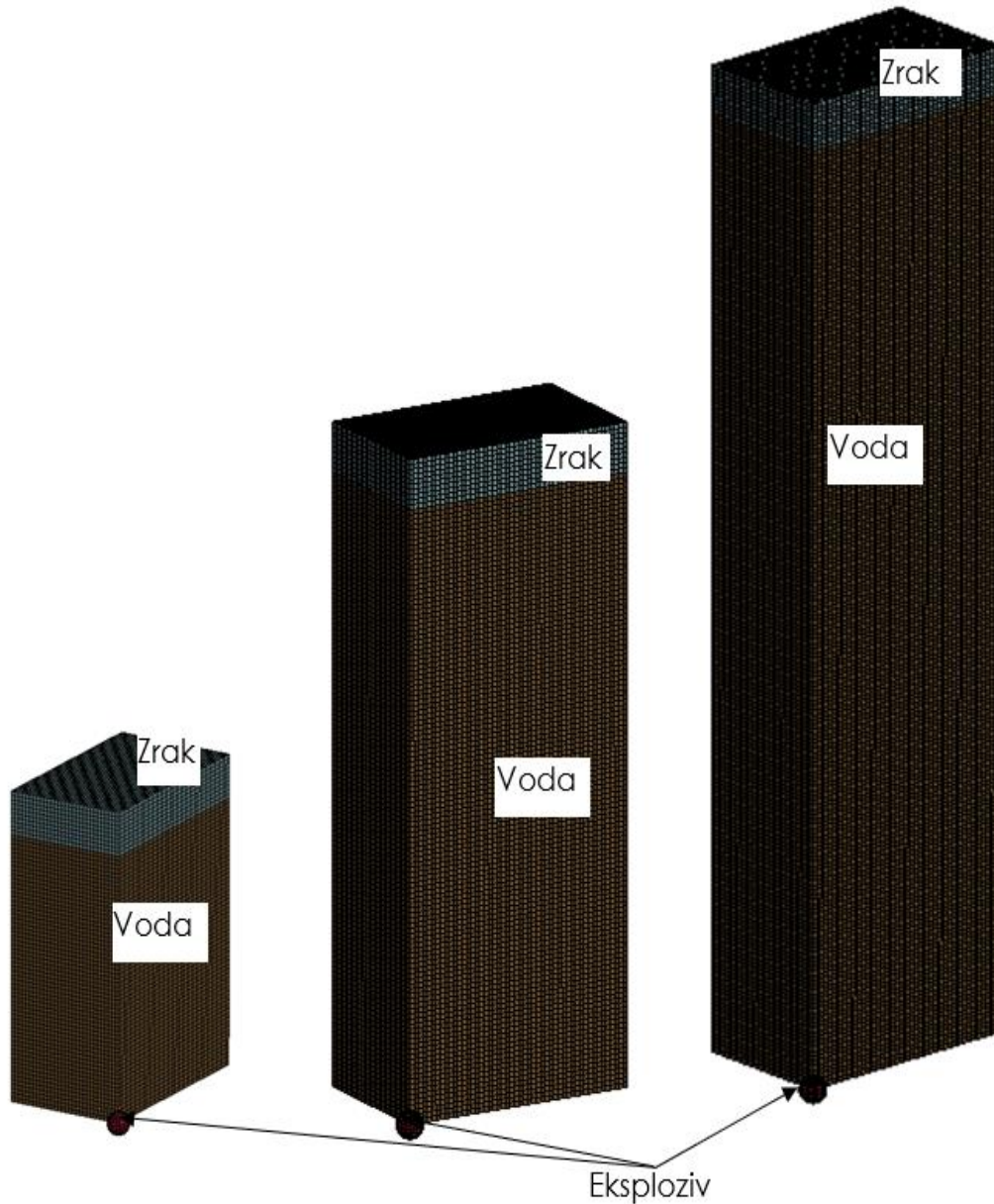
- Model 31 - Volumen vode: kvadar 5x3x6,1 m, konačni elementi vode 10×10x10 cm, 91500 elemenata vode, neograničena sredina,
- Model 32 - Volumen vode: kvadar 5x3x6,1 m, konačni elementi vode i zraka 10×10x10 cm, 106500 elemenata vode i zraka, ograničena sredina,
- Model 33 – Volumen vode: kvadar 5x3x12,2 m, konačni elementi vode 10×10x10 cm, 183000 elemenata vode, neograničena sredina,
- Model 34 – Volumen vode: kvadar 5x3x12,2 m, konačni elementi vode i zraka 10×10x10 cm, 198000 elemenata vode i zraka, ograničena sredina,
- Model 35 – Volumen vode: kvadar 5x3x19,8 m, konačni elementi vode 10×10x10 cm, 297000 elemenata vode, neograničena sredina i
- Model 36 – Volumen vode: kvadar 5x3x19,8 m, konačni elementi vode i zraka 10×10x10 cm, 312000 elemenata vode i zraka, ograničena sredina.

Numerički rezultati dobiveni na modelima podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i modelima podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode se koriste za istraživanje utjecaja ograničenja.

Modeli podvodne eksplozije u neograničenoj sredini, kao što je prethodno spomenuto, razlikuju se u tome što nemaju sloj zraka iznad vode nego propusnu graničnu plohu pa nema refleksije udarnog vala. Modeli se razvijaju paralelno kako bi se utvrdile razlike u eksplozivnom polju odnosno utjecaj ograničenja.

Razvijeni modeli kako je prethodno spomenuto imaju jednake dimenzije u smjeru osi x, x=5 m, u smjeru y, y=3 m, a u smjeru z imaju različite visine 6,1 m; 12,2 m i 19,8 m. Veličina konačnih elemenata vode i zraka je 10x10x10 cm, za sve modele.

Modeli za eksploziju u neograničenoj sredini neće biti prikazani na slici, a modeli eksplozije ograničene slobodnom površinom vode 32, 34 i 36 su prikazani na slici 6.36.

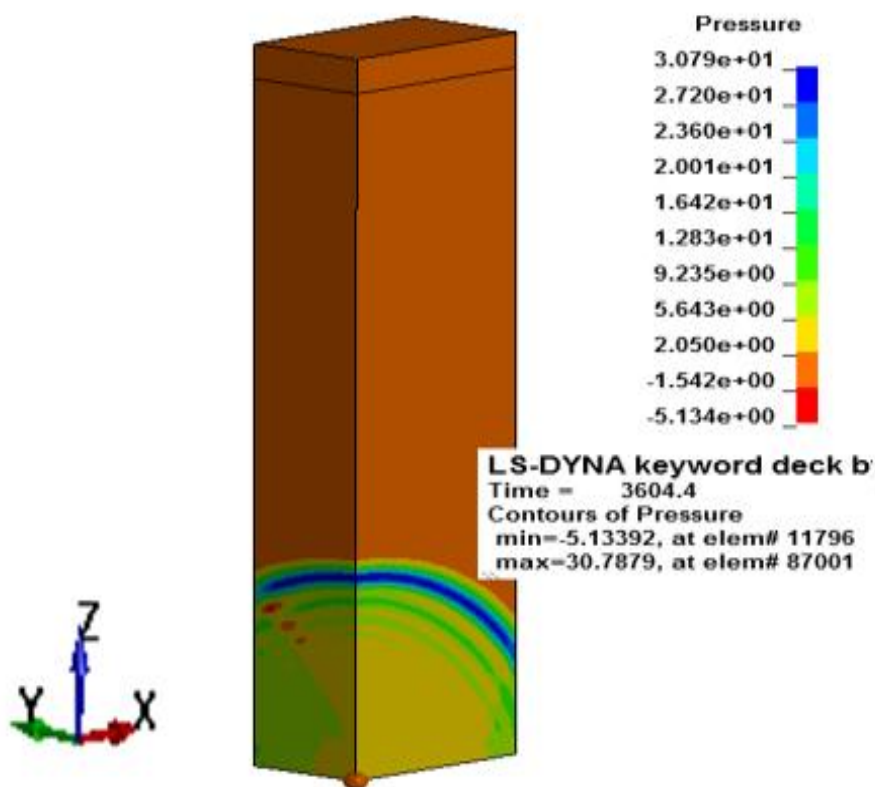


Slika 6.36 Numerički modeli podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode

Na slici 6.36 prikazani su opisani numerički modeli podvodne eksplozije kod kojih je ograničenje slobodnom površinom vode (modeli 32, 34 i 36). Na slici se vidi prostor vode, eksploziv i prostor zraka iznad površine vode. Ishodište koordinatnog sustava je u središtu eksplozivnog punjenja.

Širenje udarnog vala je identično kao kod eksplozije u neograničenoj sredini sve dok udarni val ne dosegne slobodnu površinu vode od koje se reflektira.

Na slici 6.37 prikazano je širenje fronta udarnog vala nakon eksplozije u prostoru vode.



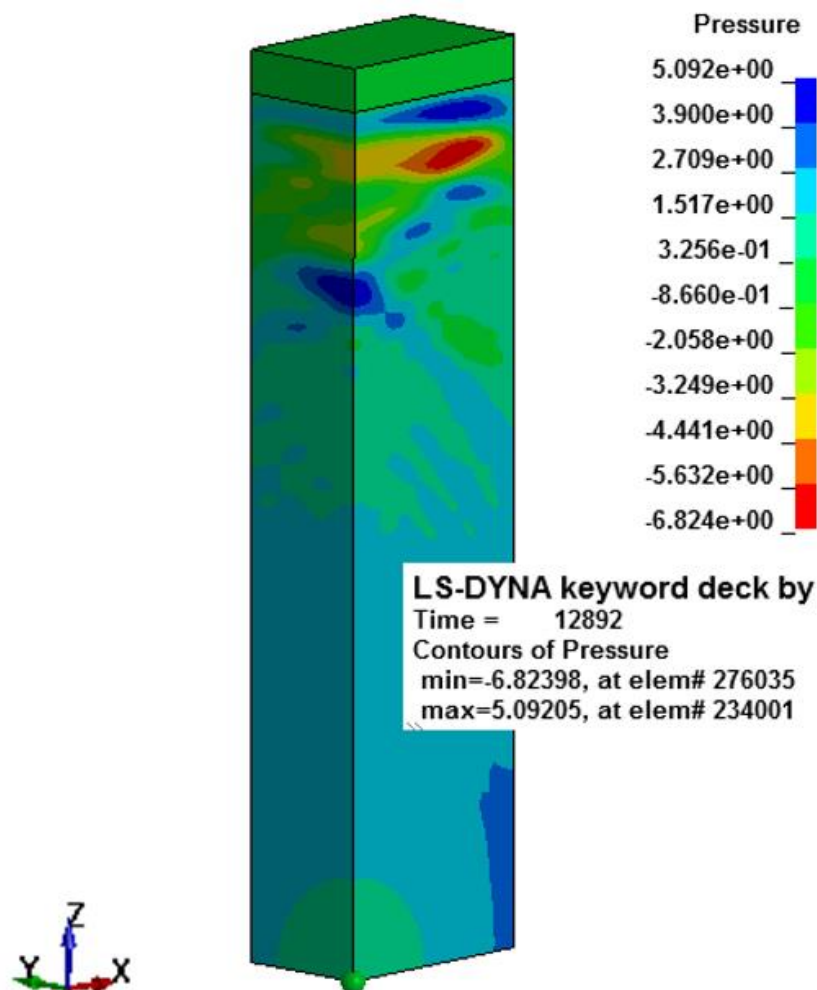
Slika 6.37 Širenje udarnog vala podvodne eksplozije u vodi

Kao što je prethodno spomenuto na slici se vidi kako se fronta udarnog vala širi sferno u promatranom prostoru vode, a u smjeru +x i +y slobodno prolazi kroz propusne plohe, na udaljenosti od 5 odnosno 3 m, od središta eksplozije, bez refleksije.

Tlak udarnog vala u nekoj promatranoj točki naglo raste pri dolasku fronta izravnog udarnog vala, a sve točke u vodi će u određenom trenutku imati maksimalnu vrijednost tlaka od izravnog udarnog vala, a tek nakon refleksije udarnog vala od granične plohe voda – zrak u promatranoj točki pojavljuje se negativni tlak od reflektiranog udarnog vala.

Vrijeme dolaska fronta udarnog vala na slobodnu vodenu površinu ili kontaktnu plovu voda – zrak može se približno izračunati iz poznate udaljenosti od središta eksplozije do promatrane točke na slobodnoj površini vode i brzine zvuka u vodi tj. brzine širenja udarnog vala u vodi.

U trenutku kad fronta udarnog vala dosegne slobodnu površinu vode udarni val se reflektira u prostor vode, što je prikazano na slici 6.38.



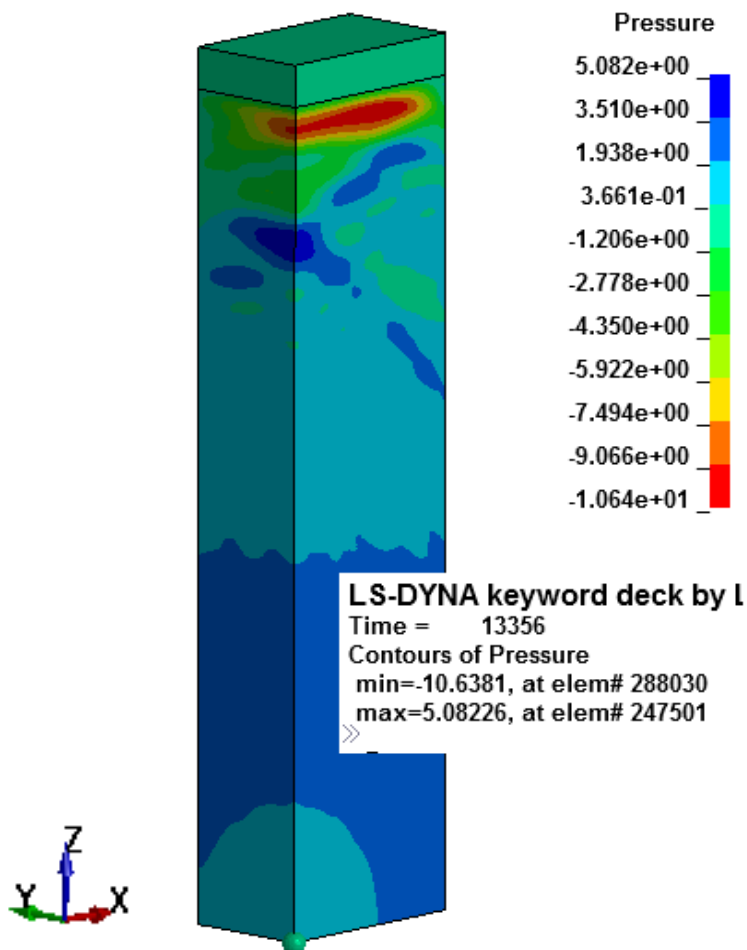
Slika 6.38 Refleksija udarnog vala od slobodne površine vode

Nakon udara izravnog vala u kontaktnu plovu voda – zrak, val se reflektira i reflektirani udarni val postaje vlačni s negativnim tlakom koji propagira u prostor vode identičnom brzinom kao i izravni udarni tlačni val.

Vrijeme dolaska fronta reflektiranog udarnog vala u promatranu točku također se može približno izračunati iz poznate udaljenosti, koja obuhvaća zbroj udaljenosti od

središta eksplozije do plohe refleksije i udaljenosti od plohe refleksije do promatrane točke, i brzine zvuka u vodi tj. brzine širenja udarnog vala u vodi, što je opisano u 3. poglavlju.

Na slici 6.39, ispod slobodne površine vode, prikazano je područje kavitacije u kojem je tlak negativan i niži od tlaka vodene pare (crveno).



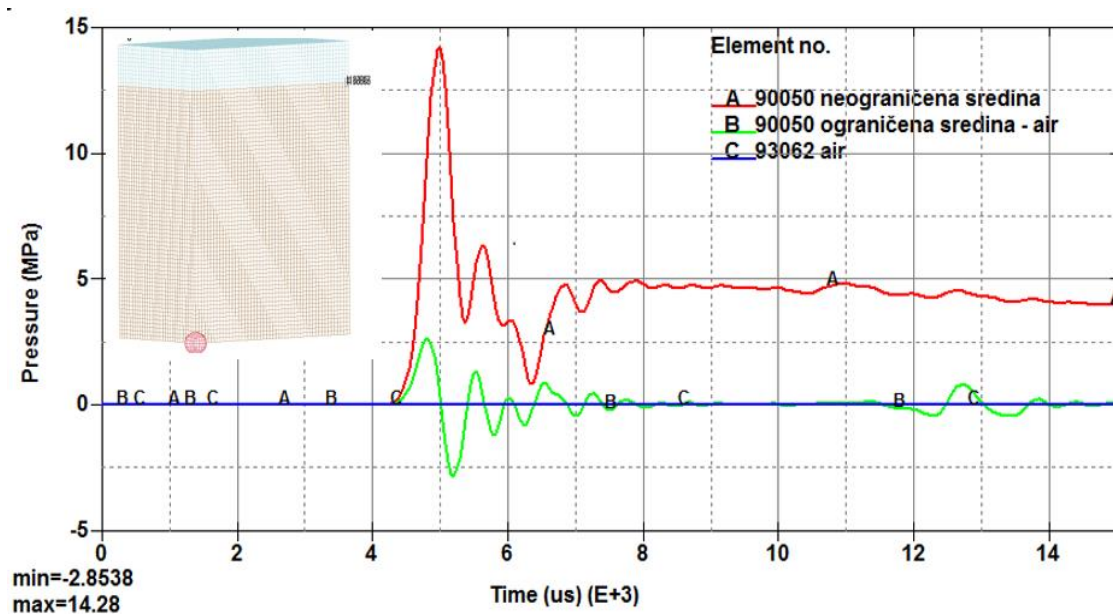
Slika 6.39 Formiranje područja kavitacije i širenje udarnog reflektiranog vala u vodi nakon refleksije

#### 6.5.4 Utjecaj slobodne površine vode na vrijednost tlaka

Nakon provedenih numeričkih simulacija na navedenim modelima i proračuna pomoću empirijskih izraza, nadalje su prezentirani dobiveni rezultati.

Na slici 6.40 prikazani su dijagrami promjene tlaka u elementu 90050 za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini i u ograničenoj sredini slobodnom površinom vode, za model u kojem je dubina eksplozije 6,1 m. Dubine eksplozivnog punjenja preuzete su, kao što je prethodno spomenuto iz literature (6,1 m (20 ft))[3]. Element 90050 se nalazi u vodi na kontaktu sa zrakom ( $x=5,0$ ;  $y=0$ ;  $z=6,1$ ).

Svakako treba istaći kako postoji mogućnost odabira konačnog elementa za usporedbu tlakova u bilo kojem elementu zadanog područja, što je kasnije i prikazano za neke elemente.



Slika 6.40 Promjene tlaka u vremenu u smjeru propusne plohe i ograničenja slobodnom površinom vode i zraka iznad vode

Na dijagramima na slici 6.40 se vidi kako udarni val za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini kad dosegne propusnu graničnu plohu (NON REFLECTING), val se širi u zadanom vremenu i nema refleksije vala, dijagram tlaka A.

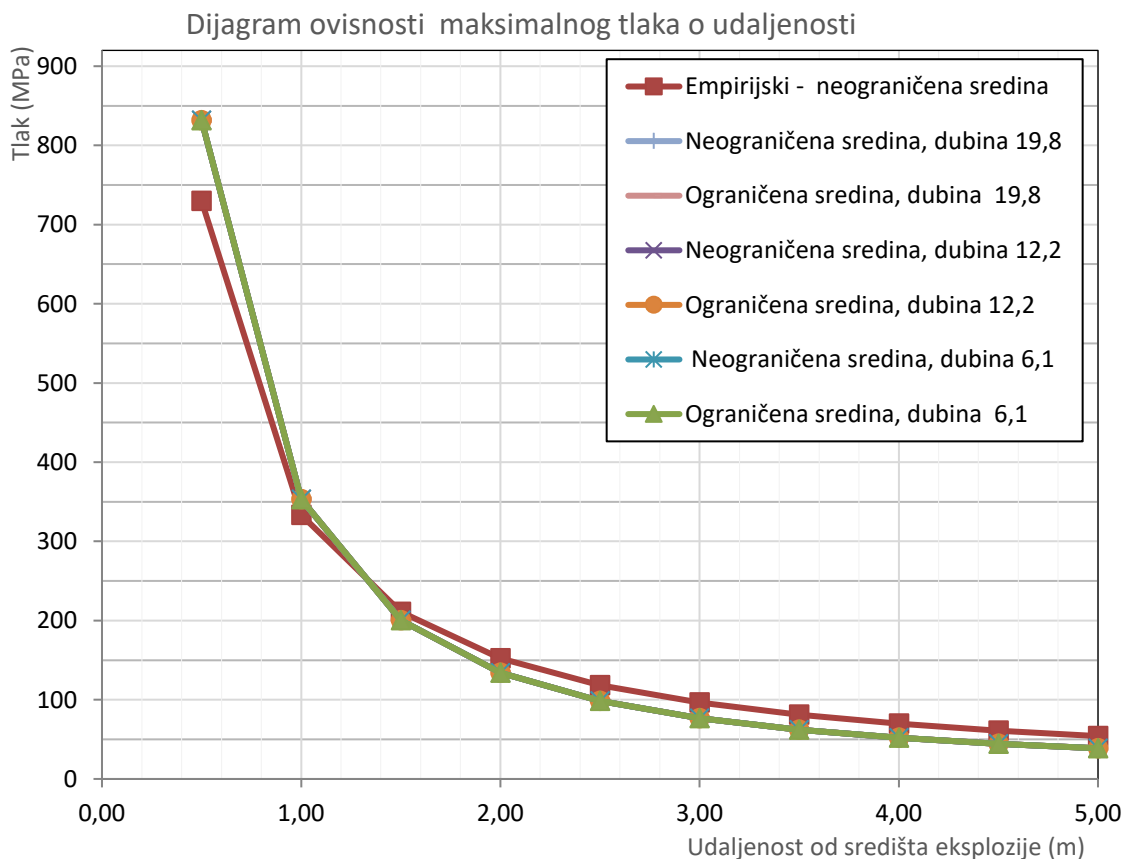
Kad udarni val podvodne eksplozije u ograničenoj sredini kad dosegne slobodnu površinu vode reflektira se odnosno odbija od granične plohe voda - zrak u prostor vode kao negativni tlak koji neutralizira dio pozitivnog tlaka, a u ovom primjeru tlak u određenom trenutku postaje negativan, što je vidljivo na dijagramu B.

Na dijagramu je pored tlakova u elementu 90050, koji se nalazi u vodi, prikazan i dijagram promjene tlaka, u vremenu, u elementu 93062 koji se nalazi u zraku iznad

razine vode. Vidljivo je kako je tlak u elementu zraka, jednak nuli kao i svim ostalim elementima zraka. Visina sloja zraka iznad vodene površine u modelu je 1 m, što daje prihvatljive očekivane rezultate i nema potrebe povećanja visine sloja zraka.

Nadalje su prikazani dijagrami maksimalnog tlaka na određenim udaljenostima na temelju rezultata dobivenih na numeričkim modelima u neograničenoj sredini i za podvodnu eksploziju u ograničenoj sredini te rezultati dobiveni pomoću empirijskih izraza (izrazi 6.13 i 6.14).

Na slici 6.41 prikazani su dijagrami maksimalnog tlaka dobiveni na numeričkim modelima i pomoću empirijskih izraza. Prikazani rezultati tlaka su dobiveni, na osi x, ( $z=0$  i  $y=0$ ) odnosno udaljenostima 0,5 do 5,0 m, s korakom od 0,5 m.



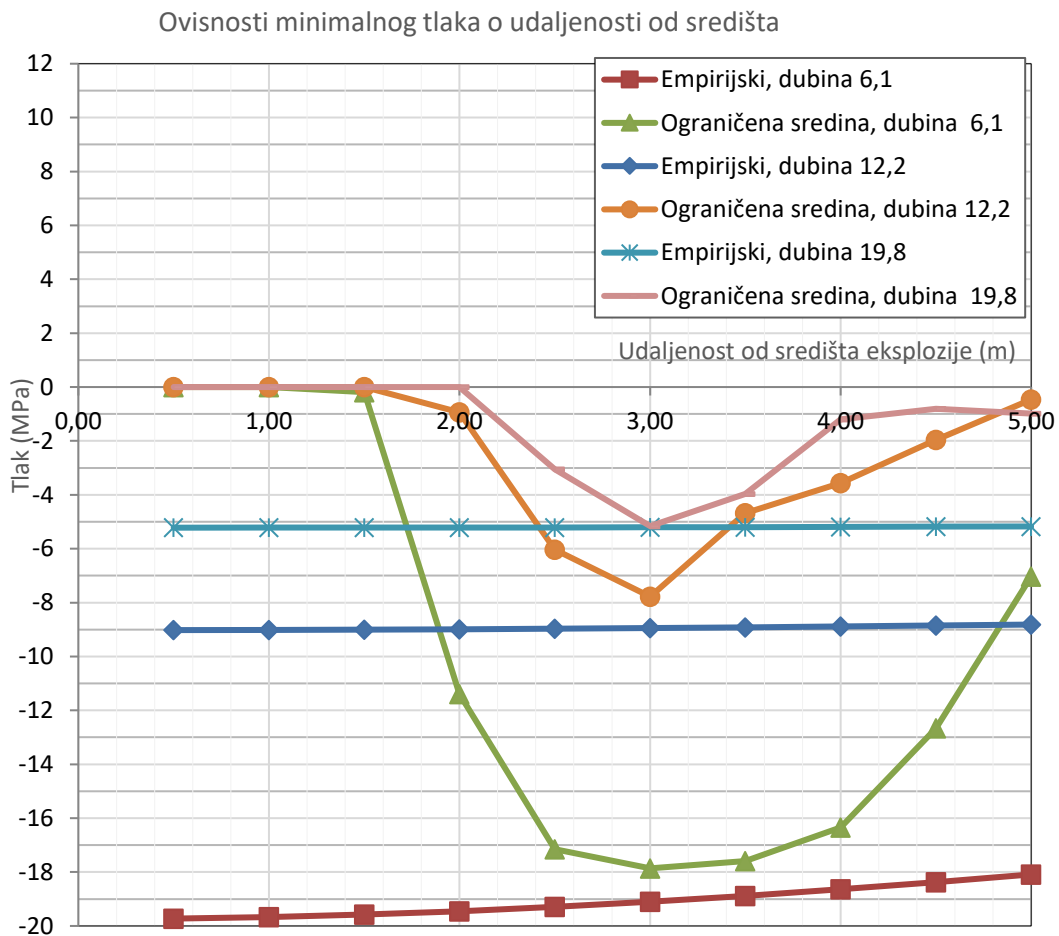
Slika 6.41 Dijagrami ovisnosti maksimalnog tlaka o udaljenosti od središta eksplozije

Na slici 6.41 vidi se kako su odstupanja maksimalnog tlaka u elementima na horizontalnoj osi, osi x, na različitim udaljenostima, zanemariva. Također se može uočiti malo odstupanje rezultata dobivenih na numeričkim modelima i rezultata dobivenih



pomoću empirijskih izraza. Ovakvo odstupanje rezultata je očekivano zbog utjecaja veličine konačnih elemenata (10x10x10 cm) i redukcije promatranog prostora vode od kocke na kvadar presjeka 3x5 m. Zbog neznatnog odstupanja svi dijagrami maksimalnog tlaka se preklapaju osim dijagrama dobivenog pomoću empirijskog izraza za neograničenu sredinu.

Na slici 6.42 prikazani su dijagrami negativnog tlaka, od reflektiranog vlačnog vala, dobiveni pomoću numeričkih modela i empirijskog izraza (izraz 6.15) za ograničenu sredinu slobodnom površinom vode.

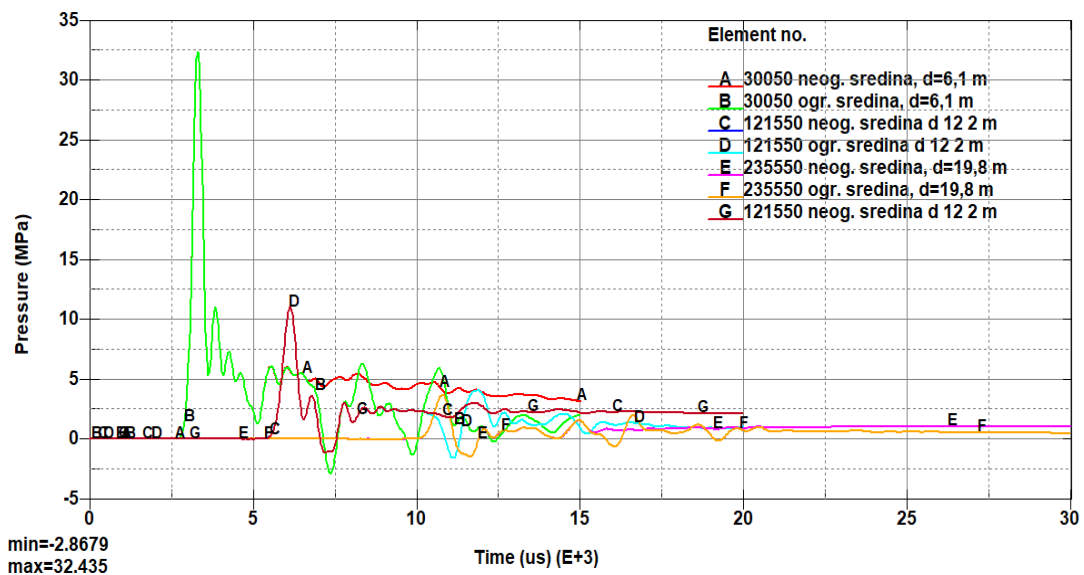


Slika 6.42 Dijagrami ovisnosti negativnog tlaka o udaljenosti od središta eksplozije

Numerički rezultati tlaka su dobiveni na udaljenostima od 0,5; do 5,0 m s korakom od 0,5 m, na osi x, ( $z=0$  i  $y=0$ ). Pregledom dijagrama na slici 6.42 vidljivo je kako vrijednosti negativnih tlakova dobivene pomoću empirijskih izraza imaju veće vrijednosti od negativnih tlakova dobiveni pomoću numeričkih modela. Dijagrami dobiveni pomoću empirijskih izraza imaju skoro konstantnu vrijednost, dok dijagrami dobiveni pomoću numeričkih modela imaju značajne promjene vrijednosti. Također je vidljivo kako je

negativni tlak najveći za najmanju dubinu podvodne eksplozije od 6,1 m, a najmanji za najveću dubinu podvodne eksplozije od 19,8 m. Što znači kako se vrijednost negativnog tlaka od reflektiranog vlačnog vala odnosno utjecaj ograničenja podvodne eksplozije slobodnom površinom vode smanjuje s povećanjem dubine eksplozivnog punjenja.

Na slici 6.43 prikazani su dijagrami promjene tlaka u vremenu na dubini 4 m za svih šest analiziranih numeričkih modela podvodne eksplozije u ograničenoj i neograničenoj sredini za različite dubine eksplozije (6,1 m; 12,2 m i 19,8 m). Elementi 30050, 121550 i 235500 se nalaze na istoj dubini, kod svih modela, ( $x=5$  i  $y=0$ ).

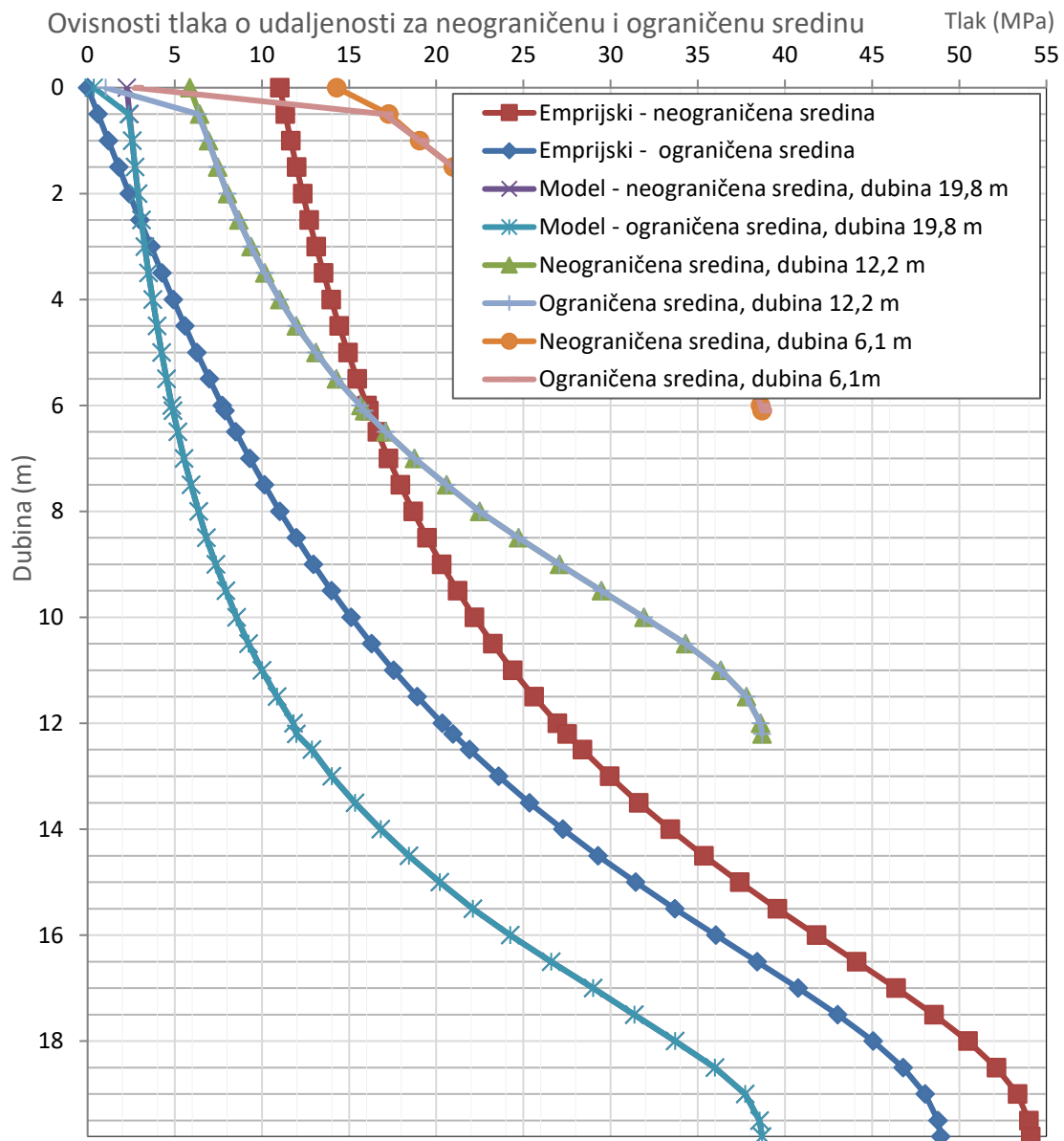


Slika 6.43 Usporedni prikaz promjene tlaka na dubini 4 m za različite dubine eksplozije

Na slici 6.43 se vidi kako s porastom dubine eksplozije maksimalna pozitivna i negativna vrijednost tlaka se smanjuje, u promatranom elementu. Dijagrami tlaka za neograničenu i ograničenu sredinu za određenu dubinu se poklapaju u dijelu maksimalnog tlaka i sve do dolaska fronte reflektiranog udarnog vlačnog vala u promatrani element.

Nakon toga tlak u neograničenoj sredini se blago smanjuje, a za ograničenu sredinu u trenutku dolaska reflektiranog udarnog vala tlak naglo opada i postaje negativan. Različita su vremena pojave izravnog udarnog vala i reflektiranog vala zbog različitih udaljenosti od središta eksplozije na različitim dubinama. Također se vidi razlika vremena trajanja simulacije za različite dubine zato što je odabrano različito vrijeme trajanja zbog mogućnosti prikaza reflektiranog vala na različitim dubinama.

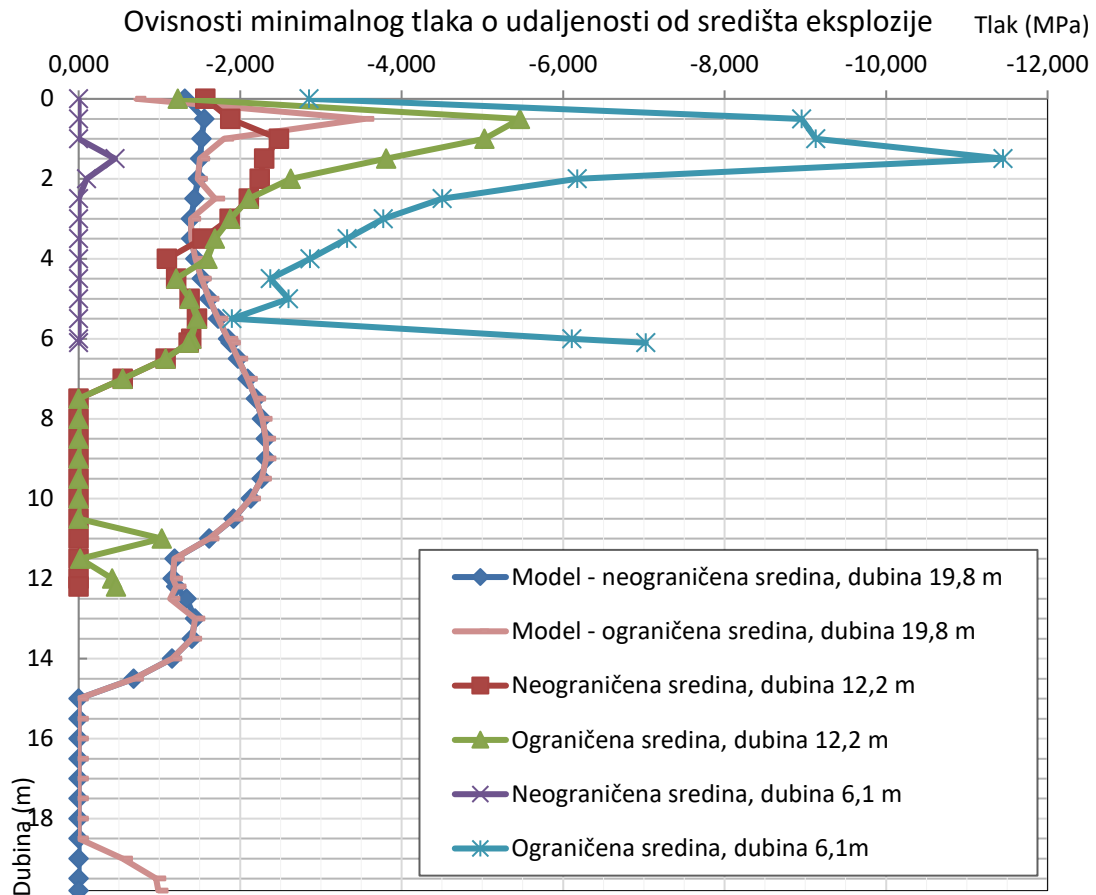
Na slici 6.44 prikazani su dijagrami maksimalnog tlaka dobiveni na numeričkim modelima i temeljem empirijskih izraza (izrazi 6.16 i 6.19), za dubine eksploziva 6,1 m, 12,2 m i 19,8 m. Prikazani su rezultati tlaka dobiveni u elementima koji se nalaze na vertikalnom bridu promatranog područja vode ( $x=5$  m i  $y=0$  m),  $z$  se povećava od 0 do 19,5 i 19,8 m s korakom 0,5 m.



Slika 6.44 Dijagrami promjene tlaka u elementima na različitim dubinama

Pregledom dijagrama na slici 6.44, za dubinu eksplozije 19,8 m, vidi se kako su vrijednosti maksimalnog tlaka dobivene pomoću empirijskih izraza veće od rezultata dobivenih numeričkim postupkom. Također se vidi veća vrijednost tlaka na površini vode za manje dubine zbog manje udaljenosti eksplozije od površine.

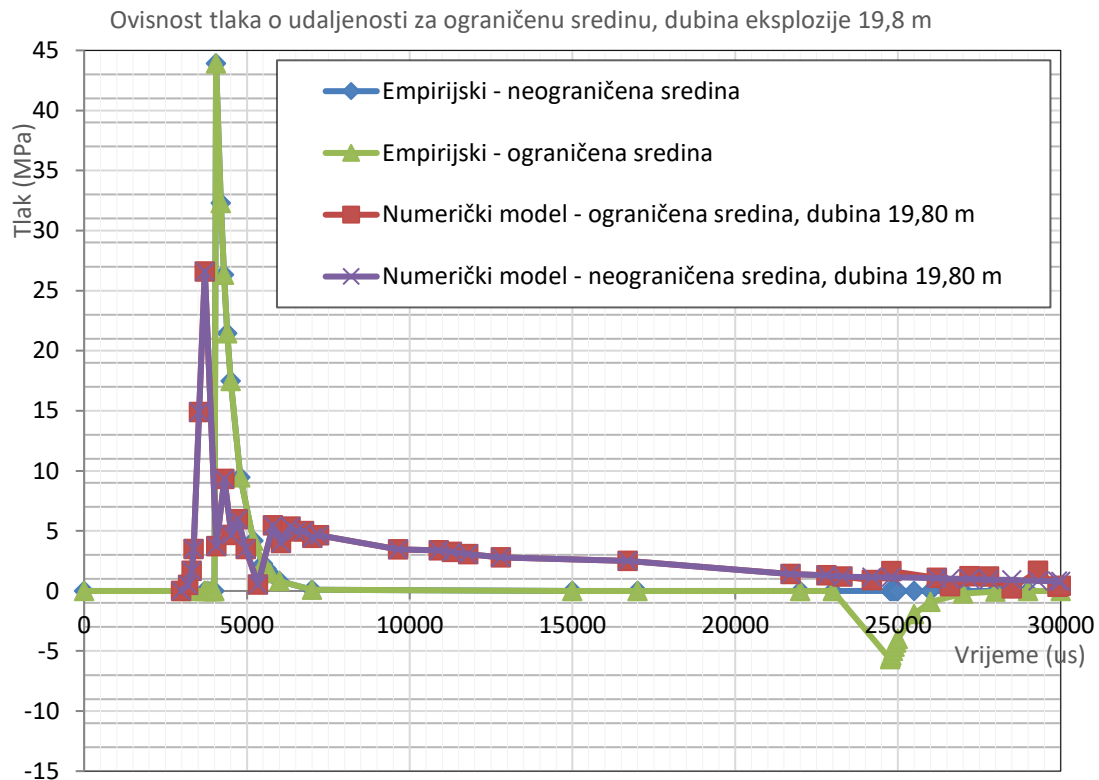
Na slici 6.45 prikazani su dijagrami negativnog tlaka dobiveni pomoću numeričkih modela za podvodnu eksploziju u neograničenoj i ograničenoj sredini slobodnom površinom vode. Prikazani su rezultati tlaka dobiveni u elementima koji se nalaze na vertikalnom bridu promatranog područja vode ( $x=5,00$  m i  $y=0,00$  m) i od  $z=0$  do 19,5 m i 19,8 m, s korakom od 0,5 m.



Slika 6.45 Dijagrami promjene minimalnog tlaka na različitim dubinama

Pregledom dijagrama na slici 6.45 vidljivo je kako je negativni tlak najveći za najmanju dubinu podvodne eksplozije od 6,1 m, a najmanji za najveću dubinu podvodne eksplozije od 19,8 m. Što znači kako se vrijednost negativnog tlaka odnosno utjecaj ograničenja podvodne eksplozije slobodnom površinom vode smanjuje s povećanjem dubine eksplozivnog naboja.

Na slici 6.46 prikazani su dijagrami promjene tlaka u vremenu dobiveni pomoću numeričkih modela i empirijskih izraza (izrazi 6.16 - 6.19) za podvodnu eksploziju u neograničenoj i ograničenoj sredini slobodnom površinom vode, za model u kojem je dubina eksploziva 19,8 m. Prikazani su rezultati tlaka dobiveni u elementu 48050 koji se nalaze na vertikalnom bridu promatranog područja vode ( $x=5$  m,  $y=0$  m,  $z=3,3$  m), odnosno na dubini 16,5 m.

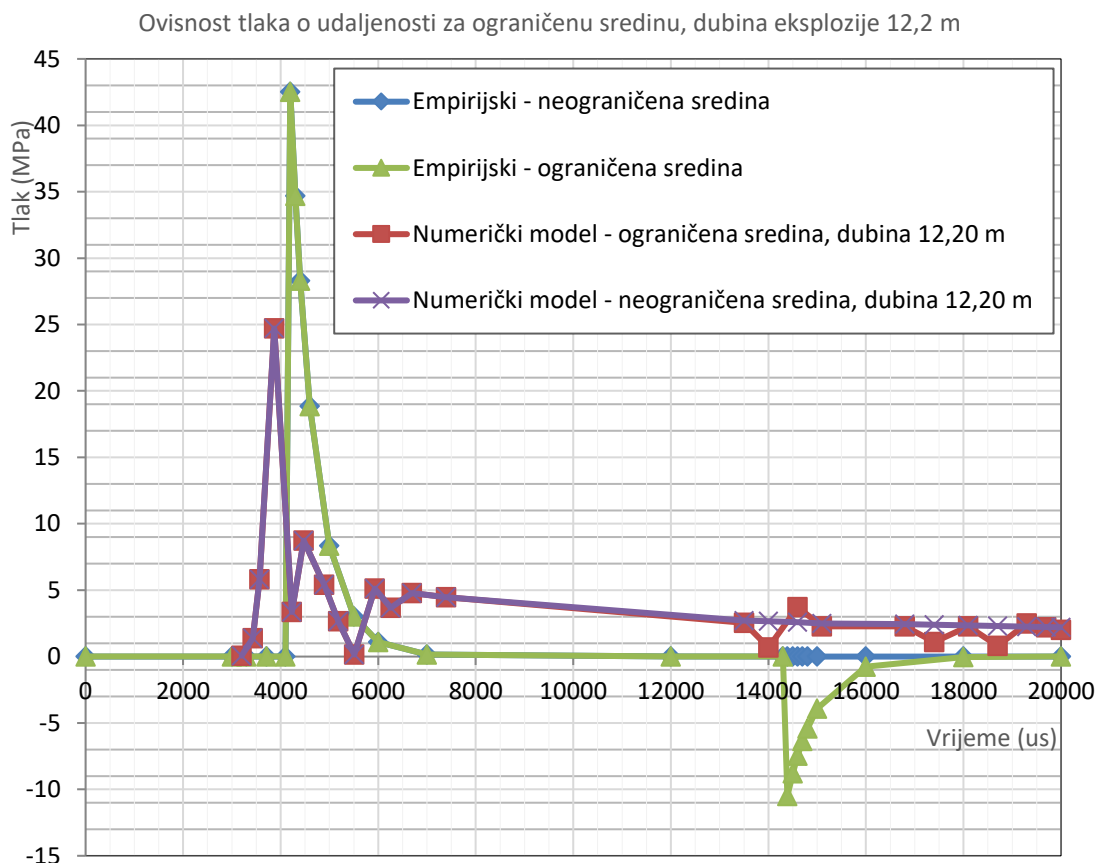


Slika 6.46 Dijagram promjene tlaka u elementu 48050, dubina eksploziva 19,80 m

Na slici 6.46 vidi se kako su vrijednosti tlaka dobivene pomoću empirijskih izraza veće od vrijednosti tlaka dobivenih na numeričkim modelima. Vrijednosti tlaka dobivenih pomoću empirijskih izraza za neograničenu i ograničenu sredinu se slažu do trenutka pojave reflektiranog udarnog vala, kad tlak za model s ograničenjem naglo pada i postaje negativan. To se može primijetiti i na dijagramima dobivenim pomoću numeričkih modela za neograničenu i ograničenu sredinu.

Tlak na dijagramu numeričkog modela, za ograničenu sredinu, u trenutku dolaska reflektiranog udarnog vlačnog vala u element se smanjuje ali smanjenje nije dovoljno veliko za pojavu negativnog tlaka, za razliku od dijagrama tlaka za ograničenu sredinu dobivenog pomoću empirijskog izraza.

Na slici 6.47 prikazani su dijagrami promjene tlaka u vremenu dobiveni pomoću numeričkih modela i empirijskih izraza (izrazi 6.16 - 6.19) za podvodnu eksploziju u neograničenoj i ograničenoj sredini slobodnom površinom vode, u kojem je dubina eksploziva 12,2 m.



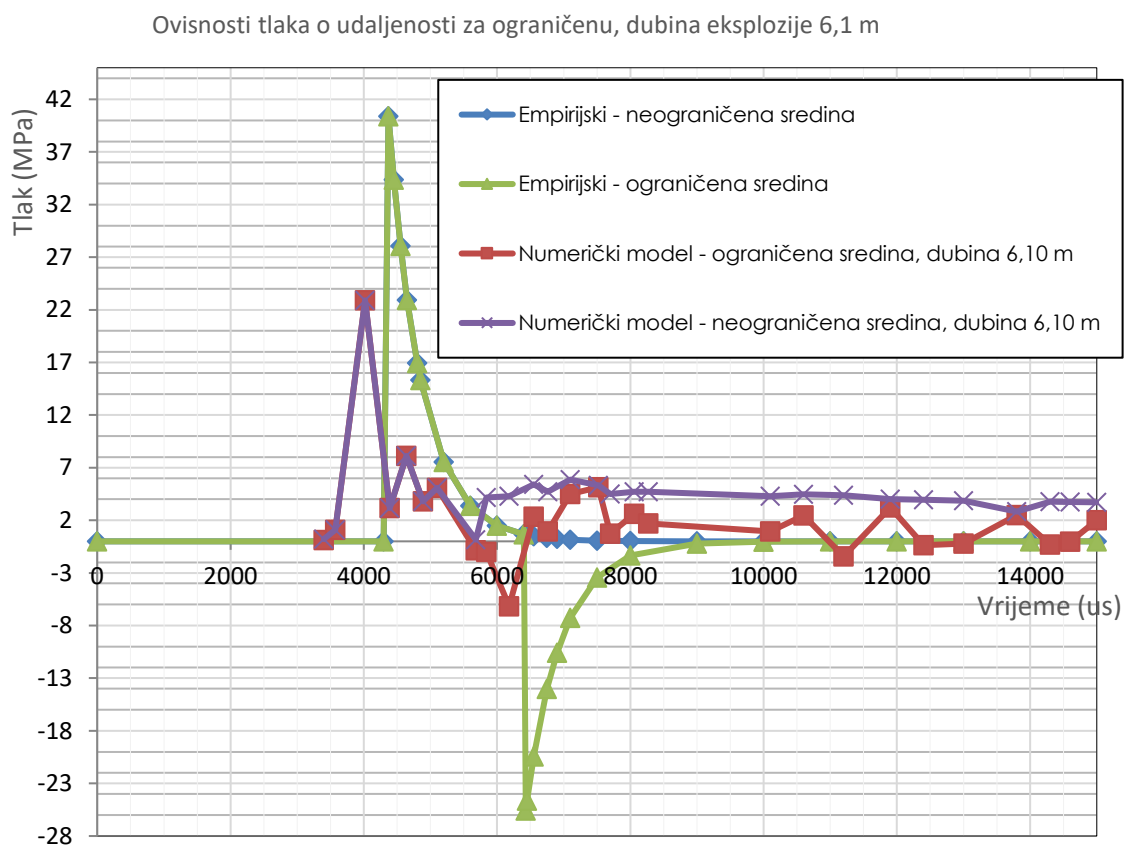
Slika 6.47 Dijagram promjene tlaka u elementu 54050, dubina eksploziva 12,2 m

Prikazani su rezultati tlaka dobiveni u elementu 54050 koji se nalaze na vertikalnom bridu promatranog područja vode ( $x=5,00$  m,  $y=0,00$  m i  $z=8,50$  m), odnosno na dubini 3,70 m.

Na slici 6.47 vidi se, pored spomenutih činjenica navedenih uz opis slike 6.46, je vrijednost negativnog tlaka veća.

Tlak za model s ograničenjem naglo pada i postiže minimalnu vrijednost 0,145 MPa. Također se može primijetiti kako je vrijeme između maksimalnog i negativnog tlaka kraće nego za dubinu eksplozije 19,8 m.

Na slici 6.48 prikazani su dijagrami promjene tlaka u vremenu dobiveni pomoću numeričkih modela i empirijskih izraza za podvodnu eksploziju u neograničenoj i ograničenoj sredini slobodnom površinom vode, za model dubine eksploziva 6,1 m. Prikazani su rezultati tlaka dobiveni u elementu 5450 koji se nalazi na vertikalnom bridu promatranog područja vode ( $x=5,00$  m;  $y=0,00$  m;  $z=2,00$  m), odnosno na dubini 4,1 m.



Slika 6.48 Dijagram promjene tlaka u vremenu u elementu 6050, dubina eksploziva 6,1 m

Na slici 6.48 vidi se daljnje povećanje negativne vrijednosti tlaka i smanjenje vremena između maksimalne pozitivne i negativne vrijednosti tlaka. Tlak za ograničeni numerički model naglo pada i postiže negativnu vrijednost - 6,17 MPa. Također se može primijetiti smanjenje vremena između maksimalnog i minimalnog tlaka sa smanjenjem dubine eksplozije s 12,2 m na 6,1 m.

Također treba istaći kako dijagrami dobiveni pomoću numeričkih modela imaju više promjena tlaka, nakon postizanja ekstremnih vrijednosti, od dijagrama dobivenih pomoću empirijskih izraza koji nakon postizanja vrijednosti monotono padaju ili rastu.

Fizikalno pojašnjenje, maksimalna vrijednost tlaka iziskuje maksimalno sabijanje čestica vode u sloju na fronti vala, a iza fronte uzrokuje naglo razrjeđenje pa zbog inercije nastaju daljnja gibanja čestica vode što uzrokuje naknadne promjene tlaka pa i utroška energije, koje nisu prikazane u empirijskim izrazima.

Temeljem analize dobivenih rezultata numeričkim modelima i usporedbom s rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza te s opisom fizikalnih pojava pri djelovanju podvodne eksplozije u eksplozivnom polju može se zaključiti kako računalni program LS Dyna ima sposobnost rješavanja predmetne zadaće. Rezultati istraživanja i zaključak potvrđuju dio 1. hipoteze.

Dobiveni numerički rezultati imaju određena prihvatljiva i opravdana odstupanja od rezultata dobivenih pomoću empirijskih izraza, što potvrđuje ispravnost modela i numeričkog proračuna, podvodne eksplozije u ograničenoj sredini u računalnom programu LS Dyna.

Temeljem opisanih rezultata istraživanja vidi se kako ograničenje podvodne eksplozije slobodnom površinom vode, do određene dubine eksplozije, može reflektiranim udarnim vlačnim valom, nakon određenog vremena, dati doprinos djelovanju na podvodnu građevinu, koja je već bila izložena tlačnom izravnom udarnom valu. Ako je podvodna građevina već oštećena nakon djelovanja udarnog tlačnog vala onda se naknadno djelovanje reflektiranog udarnog vlačnog vala može tretirati kao djelovanje udarnog opterećenja na već oštećenu konstrukciju. U tom slučaju, utjecaj ograničenja podvodne eksplozije slobodnom površinom vode naknadnim djelovanjem reflektiranog vlačnog vala, manje vrijednosti, može prouzročiti kolaps već oštećene konstrukcije [38].

## 6.6 Numeričko modeliranje podvodne eksplozije ograničene dnom

### 6.6.1 Opis numeričkog postupka i pretpostavke

Kratak fizikalni opis ograničenja podvodne eksplozije dnom dan je u 3. poglavlju te su navedene neke empirijske matematičke formulacije za određivanje tlaka od izavnog tlačnog vala i neizravnog reflektiranog tlačnog vala.



Postavlja se pretpostavka: Računalni program LS Dyna ima sposobnost rješavanja zadaće podvodne eksplozije ograničene dnom.

Također se pretpostavlja kako ograničenje podvodne eksplozije dnom utječe na djelovanje na podvodnu građevinu.

U radu su nadalje usporedno razvijeni numerički modeli podvodne eksplozije u neograničenoj i ograničenoj sredini dnom, te su provedene numeričke simulacije u računalnom programu LS Dyna, u cilju istraživanja utjecaja ograničenja podvodne eksplozije dnom.

Analizirani su dobiveni rezultati numeričkog postupka i rezultati dobiveni pomoću empirijskih izraza kako bi se provjerila i potvrdila ispravnost modela i modeliranja podvodne eksplozije ograničene dnom, u računalnom programu LS Dyna.

Modeliranje podvodne eksplozije u ograničenoj i neograničenoj sredini provodi se uz identične pretpostavke, koje su prethodno spomenute.

#### 6.6.2 Empirijski izrazi za izračun tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i eksplozije ograničene dnom

Empirijski izraz za određivanje vrijednosti tlaka podvodne eksplozije [20] u neograničenoj sredini, ovdje će se navesti kako bi ova cjelina bila kompletna je:

$$P_m(R) = K_1 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{A_1} \text{ (MPa)}, \quad (6.20)$$

gdje je:

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (m),

$W$  - masa eksploziva (kg) i

$K_1$  i  $A_1$  koeficijenti [42].

Empirijski izraz za izračun vrijednosti tlaka podvodne eksplozije u ograničenoj sredini, gdje je ograničenje dno je:

maksimalna vrijednost tlaka od izravnog udarnog vala [20]

$$P_m(x, z) = K_1 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^{A_1} \text{ (MPa)}, \quad (6.21)$$

maksimalna negativna vrijednost tlaka od reflektiranog udarnog vala [20]

$$P_m(x, z) = K_1 \left( \frac{\sqrt[3]{W}}{r_3} \right)^{A_1} \text{ (MPa)}, \quad (6.22)$$

gdje je:

$R$  - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (m),

$r_3$  - udaljenost od središta eksplozije do dna i od dna do promatrane točke (m),

$W$  - masa eksploziva (kg) i

$K_1$  i  $A_1$  koeficijenti.

Potrebno je napomenuti kako se maksimalna vrijednost tlaka od izavnog udarnog vala i maksimalna vrijednost tlaka od reflektiranog vala pojavljuju se u različitim vremenima.

Promjena ukupnog tlaka u vremenu u promatranoj točki A podvodne eksplozije ograničene dnom  $p_A(x, y, t)$  može se izračunati, koristeći sljedeće relacije [20] i [15]:

$$p_{max1}(x, z, t) = K_2 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_2} e^{-\left(\frac{t-t_1}{\theta_1}\right)} \text{ (MPa)} ; t_1 = \frac{R}{c} ; t \geq t_1 \quad (6.23)$$

$$p_{max3}(x, z, t) = K_2 \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_3} \right]^{A_2} e^{-\left(\frac{t-t_3}{\theta_2}\right)} \text{ (MPa)} ; t_3 = \frac{r_3}{c} ; t \geq t_3 \quad (6.24)$$

$$\theta_1 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{R} \right]^{A_2} \text{ (ms)}, \quad (6.25)$$

$$\theta_3 = K_2 W^{\frac{1}{3}} \left[ \frac{W^{\frac{1}{3}}}{r_3} \right]^{A_2} \text{ (ms)}, \quad (6.26)$$

gdje je:

$x$  i  $z$  - koordinate promatrane točke (m),

$R$ - udaljenost od središta eksplozije do promatrane točke (m),

$r_3$ - udaljenost od središta imaginarne eksplozije (vidjeti sliku 3.24) do promatrane točke, odnosno od središta eksplozije do dna i od dna do promatrane točke (m),

$t_1$  – vrijeme putovanja izavnog udarnog vala od središta eksplozije do promatrane točke (ms),

$t_3$ – vrijeme putovanja udarnog vala od središta eksplozije do dna i reflektiranog vala od dna do promatrane točke (ms)

$c$  – brzina zvuka u vodi (m/s),

$D$  – dubina eksplozivnog punjenja (m),

$\theta$  - koeficijent smanjenja tlaka (ms),

$W$  – masa eksplozivnog punjenja (kg) i

$K_1, K_2, A_1$  i  $A_2$  – koeficijenti udarnog vala [20], [53] i [50].

Ukupna vremenska promjena tlaka u točki A sastoji se od tlaka izravnog tlačnog udarnog vala koji dolazi izravno iz centra eksplozije, na udaljenosti  $r_1$  i tlaka reflektiranog udarnog tlačnog vala od dna, na udaljenosti  $r_2$ , koji dolazi kasnije.

U ovom radu za potrebe proračuna usvojene su sljedeće vrijednosti koeficijenata [20 i 42]:  $K_1 = 52,4$  i  $A_1 = 1,13$  te  $K_2 = 0,092$  i  $A_2 = -0,185$ .

Usvojeni koeficijenti ( $K_1$  i  $A_1$ ) uzeti su iz literature Cole, za masu eksploziva 136,08 kg, oblika kugle. Eksploziv oblika kugle i mase 136,08 kg se koristi se u numeričkom modelu. Ostali koeficijenti su uzeti iz literature [44].

Posebna pažnja je posvećena odabiru mjernih jedinica i usklađivanju mjernih jedinica numeričkih rezultata (MPa i  $\mu$ s) i mjernih jedinica koje se koriste u empirijskim izrazima. Utjecaj atmosferskog i hidrostatičkog tlaka u empirijskim izrazima je zanemaren kao i geometrijske neravnine dna. Usvojeno je ravno dno i mehaničke karakteristike krutog tla s potpunom refleksijom udarnog vala, kao kod empirijskih izraza.

### 6.6.3 Osnovni elementi numeričkih modela podvodne eksplozije

Modeliranje podvodne eksplozije ograničene dnom u računalnom programu LS Dyna zahtjeva definiranje vrijednosti određenih parametara vode, eksploziva i zraka te ostale elemente, potrebne za realizaciju numeričke simulacije, ulazne vrijednosti pojedinih parametara su prethodno spomenute, a za čvrsto dno (dolomit), korišteni su sljedeći parametri.

#### **Dolomit**

MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC\_(TITLE) (003)

Gustoća  $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ ;

Modul elastičnosti  $E = 38600 \text{ MPa}$ ;

Poissonov koeficijent  $\nu = 0,28$  i

Granica popuštanja  $33,8 \text{ MPa}$ .

Modeli podvodne eksplozije u neograničenoj sredini, kao što je prethodno spomenuto, razlikuju se u tome što nemaju dno ispod stupca vode nego propusnu graničnu plohu pa nema refleksije udarnog vala i val se slobodno širi nakon prolaska kroz graničnu plohu promatranog područja.

Za potrebe istraživanja ovisnosti maksimalnog tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i sredini ograničenoj dnom, korišteno je više modela. Modeli se razlikuju po udaljenosti eksploziva od dna i rubnim uvjetima. Treba istaći kako je tijekom ovog kao i ostalih istraživanja generirano više skupina različitih modela, a u radu će biti prezentirani samo neki modeli i rezultati.

Modeli u neograničenoj sredini su razvijeni za usporedbu dobivenih rezultata s rezultatima za modele u ograničenoj sredini u cilju procjene utjecaja ograničenja podvodne eksplozije dnom.

Širenje udarnog vala podvodne eksplozije ograničene dnom je identično kao kod eksplozije u neograničenoj sredini sve dok udarni val ne dosegne dno od kojeg se reflektira. Tlak u promatranoj točki naglo raste pri dolasku fronte izravnog udarnog vala u točku, a sve točke u vodi će u određenom trenutku imati maksimalnu vrijednost tlaka od izravnog udarnog vala, a tek nakon refleksije udarnog vala od dna – tla u promatranoj točki pojavljuje se reflektirani tlačni val od dna.

Djelovanje podvodne eksplozije u ograničenoj sredini (dno) provedeno je se u više faza, na više različitih modela, kako bi se istražile određene pretpostavke, nakon analize dobivenih rezultata rezultati su uspoređeni s rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza i tako provjerila sposobnost računalnog programa i modela te dale smjernice za praktičnu primjenu. U literaturi [3] Cole su navedeni eksperimentalni rezultati i empirijski izrazi, koji se koriste u ovim istraživanjima.

Kod svih promatranih modela volumeni vode su: 5x3x6,1; 5x3x12,2 i 5x3x19,8 m, eksploziv TNT, mase  $W=136,08$  kg, radijus eksplozivnog naboja u obliku kugle  $R_{ep}=27,11$  cm. Dimenzije su slične modelima, koje su korištene za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode. Veličina konačnih elemenata vode i tla je 10x10x10 cm, gustoća diskretizacije eksploziva je 6. Istraživanjem je potvrđeno kako broj konačnih elemenata eksploziva nema utjecaj na rezultate tlaka.

Granične plohe, koje prolaze kroz eksploziv, koje omogućavaju korištenje simetrije, su granice sa sprječanim pomacima, u smjeru normale na granične plohe.

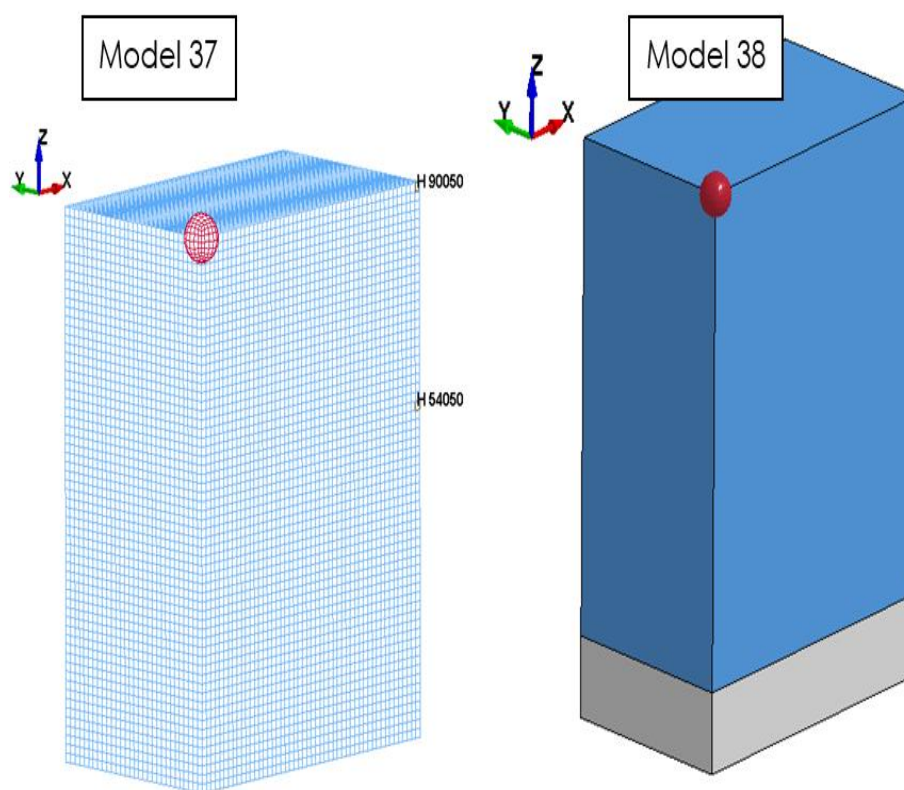
U prvoj fazi istraživanja istražen je utjecaj ograničenja dna na tlak u eksplozivnom polju.

Promatrana su dva modela podvodne eksplozije prvi model je podvodna eksplozija u neograničenoj sredini, a drugi model je eksplozija u ograničenoj sredini gdje ograničenje predstavlja kruto dno.

Za potrebe istraživanja razvijeni su sljedeći numerički modeli:

- Model 37 - Volumen vode: kvadar 5x3x6,1 m, konačni elementi vode 10×10x10 cm, 91500 elemenata vode, neograničena sredina i
- Model 38 - Volumen vode: kvadar 5x3x6,1 m + 1 m tla, konačni elementi vode i tla 10×10x10 cm, 106500 elemenata vode i tla, ograničenje dnom.

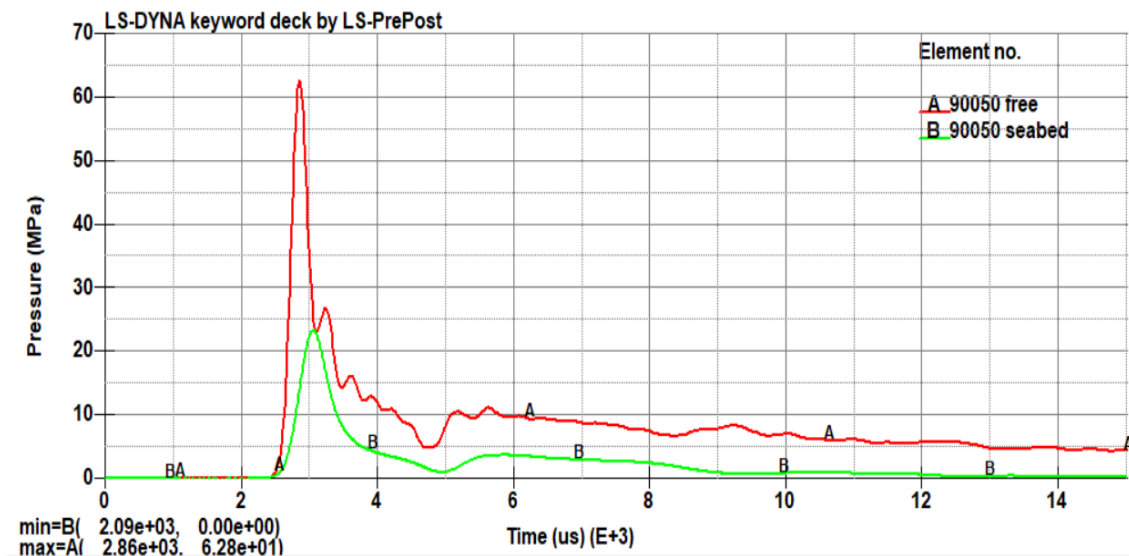
Modeli 36 i 37 su prikazani na slici 6.49.



Slika 6.49 Numerički modeli podvodne eksplozije u slobodnoj i ograničenoj sredini dnom

U prvom modelu je promatrana eksplozija u neograničenoj sredini, s propusnim graničnim ploham, bez refleksije udarnog vala, prema vanjskom prostoru. Drugi model ispod vode ima dno, sloj tla debljine 1,00 m, gdje je materijal dna u drugom modelu čvrsto tlo stijena – dolomit.

Na slici 6.50 prikazani su dijagrami promjene tlaka u elementu 90050 ( $x=5,0$  m;  $y=0,0$  m;  $z=0,0$  m), za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini i ograničenu dnom.



Slika 6.50 Dijagram promjene tlaka u elementu 90050 za različite modele

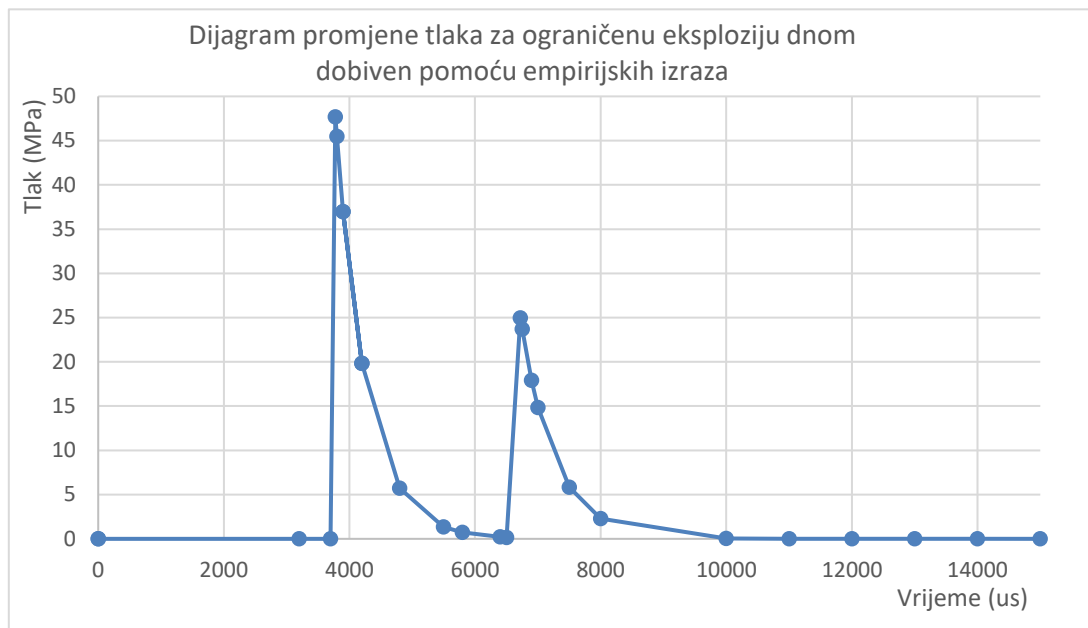
Na slici 6.50 prikazane su promjene tlaka u promatranom elementu 90050, za eksploziju u neograničenoj sredini (dijagram A) i dijagrami promjene tlaka u vremenu za čvrsto stjenovito dno – dolomit (dijagram B).

Element 90050 se nalazi na desnom vertikalnom bridu modela prikazan je slici 6.49, na modelu 37. Koordinate su dane u koordinatnom sustavu čije ishodište je u središtu eksplozivnog naboja, a dno je ispod eksploziva na udaljenosti od 6,1 m, u negativnom smjeru osi z, vidjeti sliku 6.49.

Pregledom dijagrama može se primijetiti kako je maksimalna vrijednost tlaka veća kod eksplozije u neograničenoj sredini od maksimalnih vrijednosti tlaka kod podvodne eksplozije u ograničenoj sredini zbog utjecaja reflektiranog vala od dna.

Maksimalna vrijednost tlaka u ograničenoj sredini dnom se pojavljuje nešto kasnije nego maksimalna vrijednost tlaka kod podvodne eksplozije u neograničenoj sredini. Za usporedbu dobivenih rezultata na numeričkim modelima koriste se rezultati dobiveni pomoću empirijskih izraza za eksploziju ograničenu dnom (izrazi 6.23 – 6.26).

Proveden je proračun tlaka pomoću empirijskog izraza u točki A ( $x=5,0$  m;  $y=0,0$  m;  $z=-2,5$  m), u ovisnosti od vremena u ograničenoj sredini, dijagram je prikazan na slici 6.51.



Slika 6.51 Dijagram promjene tlaka u točki A ( $x=5,0$  m;  $y=0,0$  m;  $z=-2,5$  m)

Pregledom dijagrama promjene tlaka u vremenu na slici 6.51 možemo primijetiti kako u promatranu točku prvo dolazi izravni udarni tlačni val, vrijeme dolaska  $t_1=3777$   $\mu$ s, maksimalna vrijednost tlaka 47,695 MPa, a potom dolazi reflektirani udarni tlačni val, vrijeme dolaska  $t_2=6722$   $\mu$ s, maksimalna vrijednost tlaka 24,867 MPa.

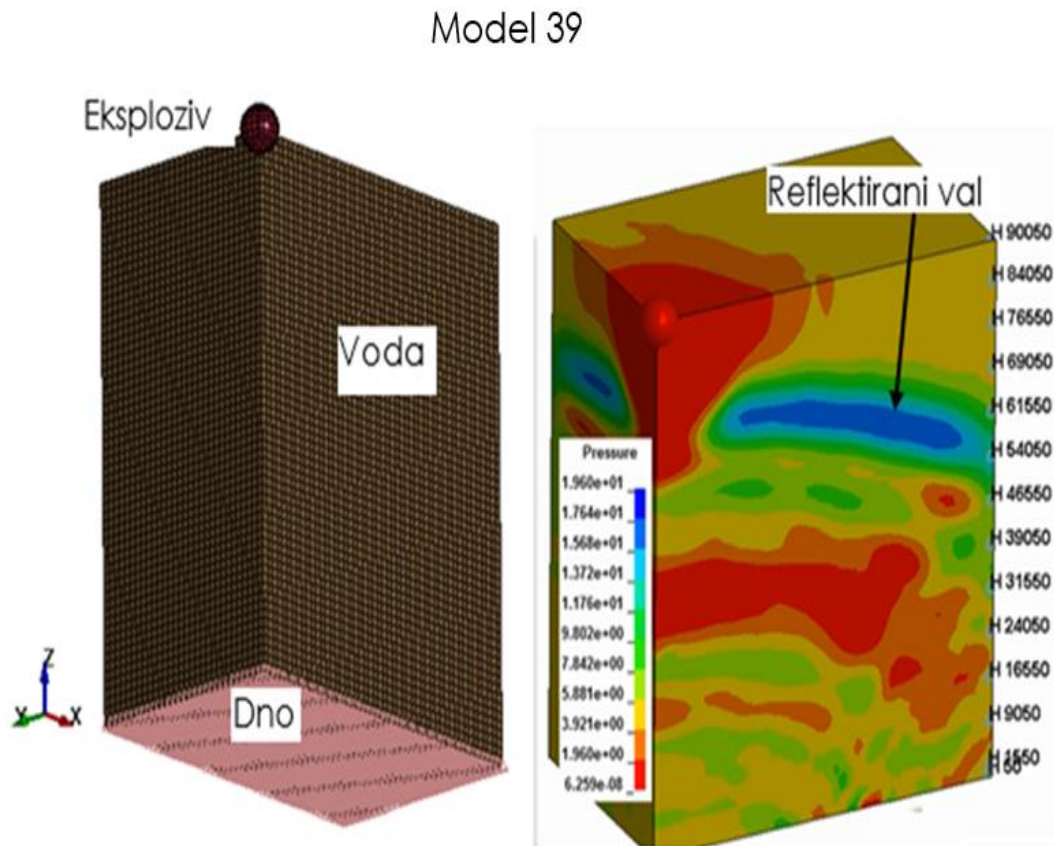
Usporedbom dijagrama promjene tlaka dobivenog numerički u elementu 90050 na slici 6.49 i dijagrama dobivenog pomoću empirijskog izraza točki A na slici 6.50 vidi se kako dijagram dobiven numeričkim postupkom ima manju maksimalnu vrijednost tlaka zbog utjecaja refleksije. Na dijagramu tlaka dobivenim numerički na modelu 38 nema naknadnog povećanja tlaka od reflektiranog udarnog vala od dna, što pokazuje nesposobnost modela.

Za daljnju analizu razvijen je numerički model, koji ima sposobnost potpune refleksije vala od dna, a na dnu nema tla ispod plohe vode nego je zadana spriječenost pomaka vode na dnu – nepropusna granična ploha, imaginarno kruto dno, kao rubni uvjet. Ova pretpostavka je primijenjena kod proračuna pomoću empirijskih izraza.

Model za eksploziju ograničenu dnom je:

- Model 39 - Volumen vode: kvadar  $5 \times 3 \times 6,1$  m, konačni elementi vode  $10 \times 10 \times 10$  cm, 91500 elemenata vode, spriječen pomak dna.

Na slici 6.52 prikazan je model 39 s rubnim uvjetom na donjoj plohi vode.



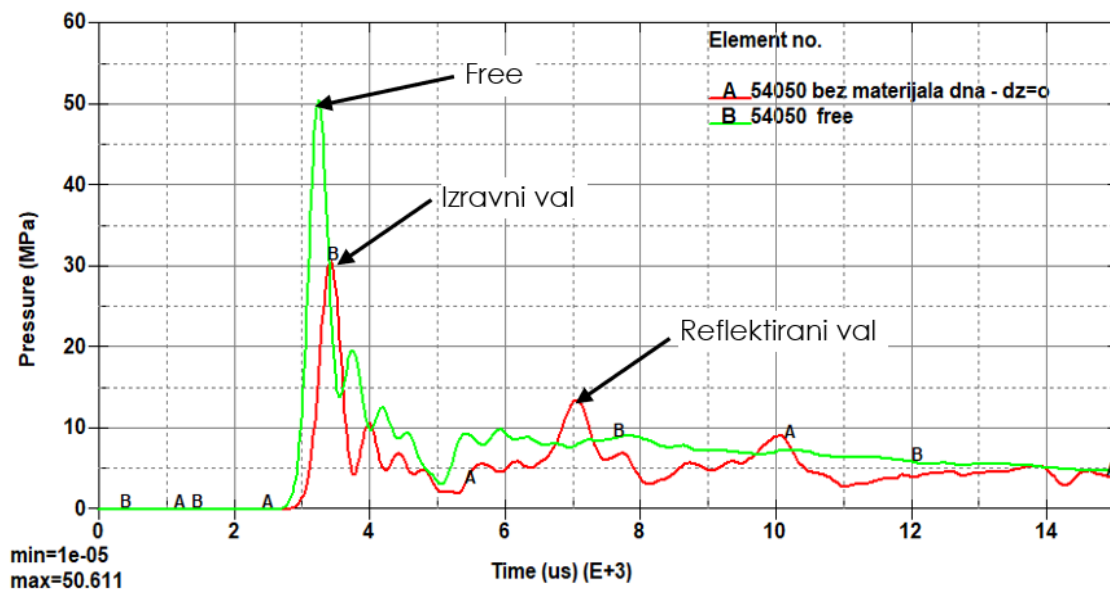
Slika 6.52 Numerički modeli podvodne eksplozije u ograničenoj sredini sa spriječenim pomakom dna

Na slici 6.52, lijevo, na modelu 39 prikazana je donja ploha vode, na kojoj je spriječen pomak donje plohe vode pa je kao rubni uvjet zadan vertikalni pomak jednak nuli,  $dz=0$  (BOUNDARY\_SPC\_SET (0; 0;1)).

Na desnom dijelu slike prikazana je propagacija reflektiranog tlačnog udarnog vala od dna, koji prolazi kroz element 54050 ( $x=5,0$  m;  $y=0,0$  m;  $z=-2,5$  m), na desnom bridu promatranog područja vode oblika kvadra.

Na slici 6.53 prikazani su dijagrami promjene tlaka u vremenu, u elementu 54050, za model 37 podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i za model 39 podvodne eksplozije s ograničenjem vertikalnog pomaka donje plohe vode, na kontaktu s dnom, što osigurava refleksiju udarnog vala.





Slika 6.53 Dijagram promjene tlaka u elementu 54050 za različite modele

Na slici 6.53 prikazani su dijagrami tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj sredini (B) i dijagram tlaka podvodne eksplozije ograničene dnom (A), u promatranom konačnom elementu 54050.

Maksimalni tlak podvodne eksplozije ograničene dnom (30,77 MPa) je manji od podvodne eksplozije u neograničenoj sredini (50,61 MPa), zbog utjecaja reflektiranog udarnog vala, koji umanjuje maksimalnu vrijednost tlaka i povećava tlak u trenutku dolaska reflektiranog udarnog vala. U elementu 54050, za podvodnu eksploziju ograničenu dnom, najprije dolazi izravni udarni val u vremenu  $t_1 = 3410 \mu\text{s}$ , taj tlak ima najveću vrijednost 30,776 MPa, zatim s vremenskim odmakom dolazi reflektirani udarni val u vremenu  $t_2 = 7030 \mu\text{s}$ , maksimalni tlak je 13,40 MPa.

Uspoređujući dijagram tlaka dobiven pomoću empirijskih izraza prikazan na slici 6.51 i dijagram tlaka dobiven numeričkim postupkom na slici 6.53, maksimalni tlak od izravnog vala dobiven pomoću empirijskih izraza (47,695 MPa) je veći od tlaka dobivenog numerički (30,776 MPa). Nadalje, također je veći tlak od reflektiranog udarnog vala dobiven pomoću empirijskog izraza (24,867 MPa) od tlaka dobivenog numerički (13,40 MPa). Vremena dolaska vala su kraća kod numeričkog postupka.

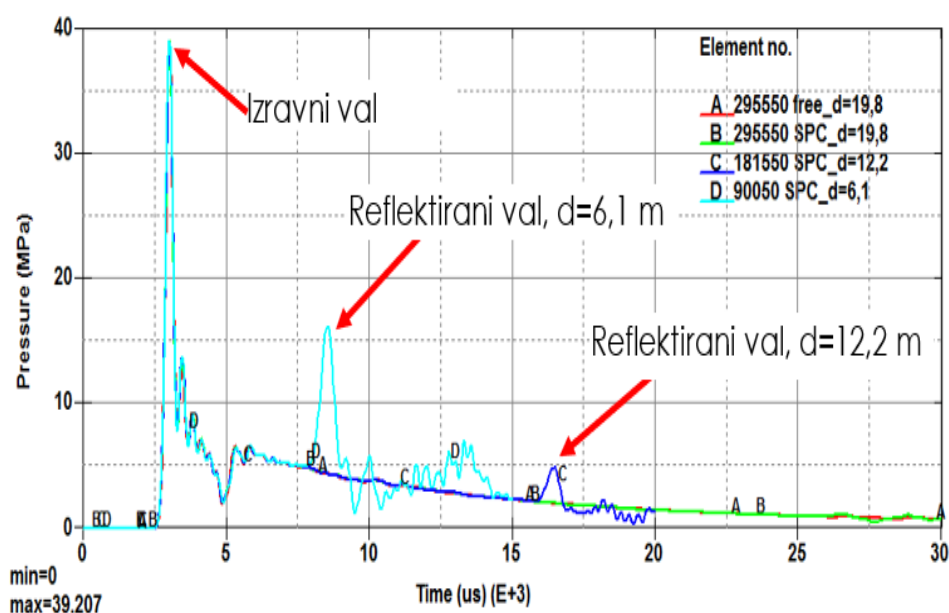
Temeljem analize dobivenih rezultata može se zaključiti kako računalni program na modelu 39 ima sposobnost refleksije udarnog vala od dna. Ovakav model daje zasigurno veću vrijednost tlaka od reflektiranog vala nego što je kod mekanog tla,

model je približniji za čvrsta i kruća tla. U svakom slučaju pri inženjerskom proračun na ovaj način se dobiva maksimalna vrijednost tlaka što povećava sigurnost građevine. Što se tiče vrste tla, kod proračuna djelovanja podvodne eksplozije na obalnu građevinu, ako poznajemo vrstu tla, treba istaći kako je taj podatak promjenjiv zbog utjecaja hidrodinamike, na morsko ili riječno dno (struja, rad mora, nanos, ispiranje, erozija, ...). Ovi procesi su izraženiji na područjima, gdje se smanjuje dubina i uz podvodne građevine. Stoga se ovaj model predlaže kod proračuna utjecaja dna na djelovanje podvodne eksplozije.

U sljedećoj fazi istraživanja, istražuje se utjecaj dubine na veličinu tlaka od reflektiranog udarnog vala od dna. Pretpostavlja se kako se s povećanjem dubine odnosno udaljenosti o središta eksplozije do dna utjecaj dna smanjuje. Pored razvijenih i prezentiranih modela kod kojih je udaljenost središta eksploziva od dna 6,1 m, kao što je već navedeno, razvijeni su modeli, kod kojih je udaljenost središta eksploziva od dna 12,2 m i 19,8 m, i to:

- Model 40 - Volumen vode: kvadar 5x3x12,2 m, konačni elementi vode 10×10x10 cm, 183000 elemenata vode, spriječen pomak dna i
- Model 41 - Volumen vode: kvadar 5x3x19.8 m, konačni elementi vode 10×10x10 cm, 297000 elemenata vode, spriječen pomak dna.

Na slici 6.54 prikazane su promjene tlaka u elementima, 295 550 ( $d=19,8$  m), 181550 ( $d=12,2$  m) i 90050 ( $d=6,1$  m), gdje su koordinate elemenata ( $x=5$  m;  $Y=0$  m;  $z=0$  m).



Slika 6.54 Dijagrami promjene tlaka u elementima 295550, 181550 i 90050

Prikazan je dijagram tlaka za eksploziju u neograničenoj sredini za udaljenost eksploziva od dna 19,8 m (A), zatim dijagrami tlaka za model s ograničenim pomakom donje plohe vode za modele, kod kojih je udaljenost eksploziva od dna 19,8 m (B), 12,2 m (C) i 6,1 m (D).

Tlak za neograničenu eksploziju i eksploziju ograničenu dnom, za dubinu od 19,8 m, se u cijelosti poklapa, jer nema izraženog utjecaja refleksije udarnog vala kao ni skoka tlaka uslijed djelovanja reflektiranog udarnog tlačnog vala od dna.

Na dijagramima promjene tlaka za udaljenost eksploziva od dna 12,2 m i 6,1 m vidljivi su nagli porasti tlaka zbog utjecaja reflektiranog udarnog tlačnog vala od dna.

Nadalje se vidi kako je tlak za dubinu od 6,1 m veći nego za dubinu od 12,2 m.

Trenutak naglog porasta tlaka ovisi o udaljenost eksploziva od dna odnosno o duljini puta kojeg mora prijeći udarni val, za veću udaljenost eksploziva od dna veća je duljina puta, što zahtijeva duže vrijeme, a manja je vrijednost tlaka. Dobiveni rezultati pokazuju kako se vrijednost tlaka od reflektiranog udarnog tlačnog vala smanjuje s povećanjem udaljenosti eksplozivnog punjenja od dna.

Predložen je model s većom refleksijom udarnog vala od dna, tj. kruće tlo. Treba ponovno istaknuti kako je taj model pouzdaniji jer, kako je već spomenuto, zbog hidrodinamičkih procesa vrsta dna se mijenja pa može biti mekano nekoherentno tlo (nanos pijeska šljunka ili mulja) ili ispiranjem nanosa tlo može biti kruće (stijena).

Na temelju provedenih istraživanja mogu se potvrditi pretpostavke o sposobnosti razvijenog modela i računalnog programa te o utjecaju dna na opterećenje podvodne građevine. Rezultati istraživanja i zaključak potvrđuju dio 1. hipoteze.

Numerički proračun i dane napomene, koje su rezultat istraživanja podvodne eksplozije, nakon provedene verifikacije mogu se koristiti pri praktičnom inženjerskom proračunu i projektiranju pouzdanih i mehanički otpornih obalnih i hidrotehničkih građevina kao i infrastrukture, koji su potencijalni ciljevi terorističkih napada.

## 6.7 Numeričko modeliranje podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i dnom

Kratak fizikalni opis ograničenja podvodne eksplozije slobodnom površinom vode i dnom te su dani empirijski izrazi za određivanje vrijednosti tlaka u vremenu za izravni udarni val i reflektirane udarne valove u 3. poglavlju. Prethodno su zasebno pripremljeni numerički modeli, provedeno modeliranje i istraživanje podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode, a posebno ograničene dnom.

Postavlja se pretpostavka: Računalni program LS Dyna ima sposobnost rješavanja zadaća podvodne eksplozije ograničene istovremeno slobodnom površinom vode i dnom.

Pretpostavlja se kako ograničenje podvodne eksplozije slobodnom površinom vode i dnom utječe na opterećenje podvodne građevine.

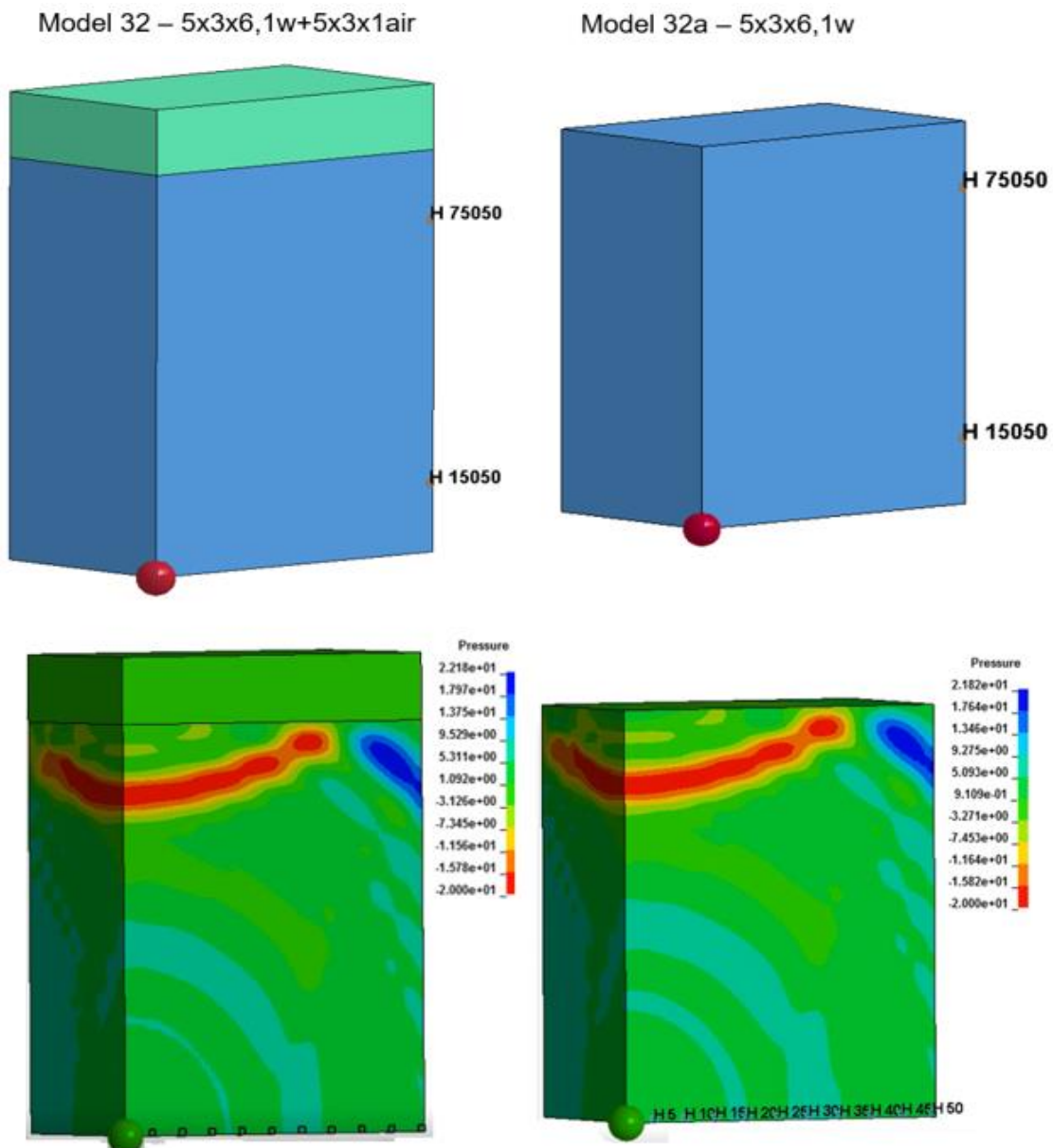
Za potrebe ovog istraživanja, usporedno su razvijeni numerički modeli podvodne eksplozije u neograničenoj i ograničenoj sredini, kod kojih je istovremeno ograničenje slobodna površina vode i dno.

Analizirani su rezultati numeričkog postupka i rezultati dobiveni pomoću empirijskih izraza kako bi se provjerila i potvrdila ispravnost modela i modeliranja podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i dnom, u računalnom programu.

Pri modeliranju utjecaja slobodne površine vode cilj je bio utvrditi utjecaj konačnih elemenata zraka iznad slobodne površine vode, na dobivene rezultate promjene tlaka u vremenu. Već je prethodno utvrđen zanemariv utjecaj atmosferskog tlaka na rezultate tlaka, budući da su tlakovi generirani podvodnom eksplozijom nekoliko redova veličina veći. Stoga se ispitao i usporedio model s konačnim elementima zraka iznad slobodne površine vode i bez njih. Rubni uvjet u oba modela je bila slobodna površina vode.

Za provjeru su korišteni sljedeći numerički modeli:

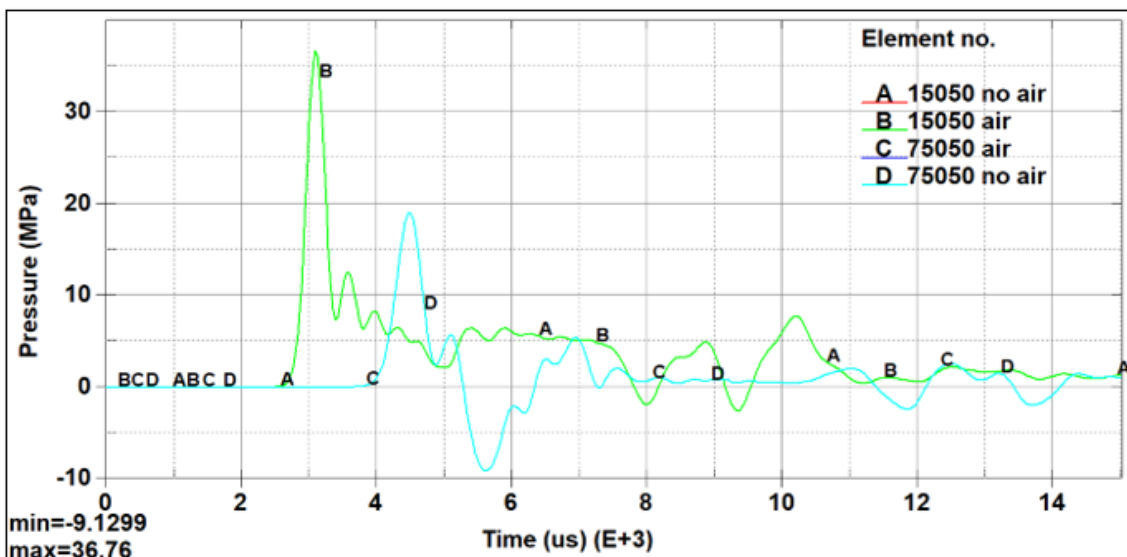
- Model 32 - Volumen vode: kvadar 5x3x6,1 m, volumen zraka 5x3x1 m, konačni elementi vode i zraka 10x10x10 cm, 106500 elemenata vode i zraka, ograničena sredina i
- Model 32a - Volumen vode: kvadar 5x3x6,1 m, konačni elementi vode 10x10x10 cm, 9150 elemenata vode, slobodna površina vode, ograničena sredina.



Slika 6.55 Modeli podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode

Na slici 6.55, na gornjem dijelu slike, prikazan je ranije razvijeni model 32 i zamjenski reducirani model 32a, koji je razvijen za potrebe potvrde prethodno spomenute tvrdnje. Na modelu 32 iznad površine vode modeliran je sloj zraka debljine 1 m, dok kod modela 32a iznad površine vode nema sloja zraka, ali s istim rubnim uvjetom (slobodna površina vode). Na modelima su prikazani konačni elementi 15550 i 75050 u kojima je analizirana promjena tlaka u modelima 32 i 32a.

Na donjem dijelu slike prikazane su disperzije udarnog vlačnog vala, nakon refleksije udarnog tlačnog vala, od slobodne površine vode, za model 32 lijevo i model 32a desno, u približno jednakom vremenu. Vidljiva je sličnost raspodjele tlakova u prostoru vode, a tlak u zraku u modelu 32 je jednak nuli.



Slika 6.56 Dijagrami tlaka podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode

Na slici 6.56 prikazani su usporedni dijagrami promjene tlaka u elementima 15050 (dijagrami B i C) i 75050 (dijagrami A i D), za model 32 (dijagrami B i C) i 32a (dijagrami A i D). Vidljivo je kako su dijagrami promjene tlaka u vremenu potpuno identični i u potpunosti se preklapaju u promatranom vremenu, od 0 do 15 000  $\mu$ s.

U oba ova slučaja dobiveni su identični rezultati za tlakove u vodi.

Na temelju dobivenih rezultata istraživanja može se zaključiti kako rezultati numeričke simulacije daju jednake rezultate za model sa slojem zraka iznad vode kao i model sa slobodnom površinom vode bez sloja zraka iznad vode, što potvrđuje 5. hipotezu.

Ova je činjenica značajna budući da se vrijeme proračuna modela 32a u odnosu na model 32 smanjuje za 9,02 %, broj konačnih elemenata za 16,12 % i veličina izlaznih podataka za 25,1 %.

Za ograničenje podvodne eksplozije dnom, u prethodnom dijelu poglavlja je također korišten rubni uvjet u kojem se umjesto tla postavlja rubni uvjet koji sprječava pomak i

reflektira udarni val, u vertikalnom smjeru (os z) i dobiju se rezultati refleksije udarnog vala od dna, koji odgovaraju rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza, za kruta tla. Ovaj način zadavanja utjecaja dna je korišten tijekom istraživanja načina osiguranja refleksije udarnog vala od dna te pripreme i provjere modela.

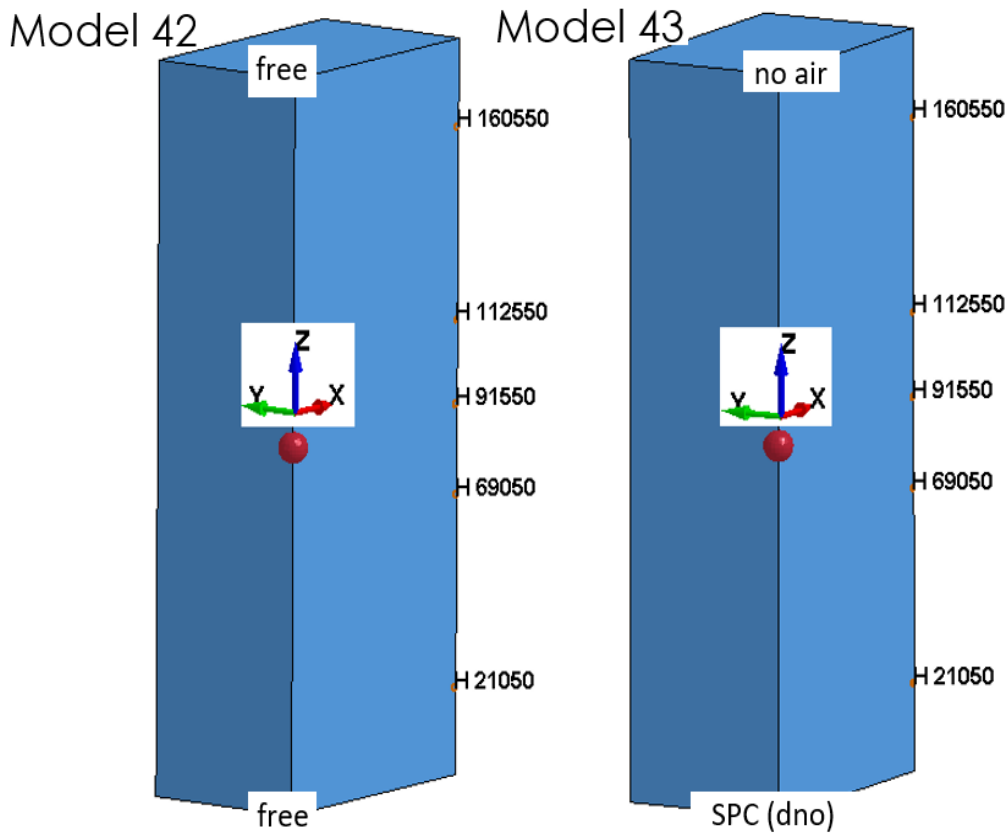
Spomenuti načini zadavanja rubnih uvjeta omogućavaju numeričko rješavanje zadaće i značajno pojednostavljuju modeliranje podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i dnom jer nema konačnih elemenata zraka i konačnih elemenata tla te njihovih složenih modela materijala i jednadžbi stanja, što značajno smanjuje potrebne kapacitete računala pri rješavanju ovih složenih zadaća te omogućava jednostavnije modeliranje.

Sukladno navedenom, kod modela je na donjoj graničnoj plohi vode postavljen rubni uvjet koji sprječava vertikalni pomak i reflektira udarni val, kao zamjena za tlo, a na gornjoj plohi umjesto sloja zraka zadan je rubni uvjet slobodne površine vode. Rezultati ovog modela će poslužiti za analizu utjecaja ograničenja slobodnom površinom vode i dnom, odnosno na veličinu reflektiranih udarnih valova podvodne eksplozije. U prvoj fazi istraživanja istražen je utjecaj istovremenog ograničenja podvodne eksplozije slobodnom površinom vode i dnom na tlak u eksplozivnom polju. Promatrana su dva modela podvodne eksplozije, prvi model je podvodna eksplozija u neograničenoj sredini, a drugi model je podvodna eksplozija u ograničenoj sredini slobodnom površinom vode i dnom.

Za potrebe istraživanja u prvoj fazi razvijeni su sljedeći modeli:

- Model 42 - Volumen vode: kvadar 5x3x12,2 m, konačni elementi vode 10×10x10 cm, 183000 elemenata vode, neograničena sredina i  
Model 43 - Volumen vode: kvadar 5x3x12,2 m, konačni elementi vode 10×10x10 cm, 183000 elemenata vode, spriječen pomak dna i ploha u kontaktu sa zrakom – zadan je rubni uvjet slobodne površine vode.

Modeliranjem rubnih uvjeta, na modelu 43, na gornjoj i donjoj graničnoj plohi smanjuje se broj konačnih elemenata i raznih podataka o materijalima (zrak i tlo), što omogućava smanjenje potrebne memorije računala i ubrzava proces numeričkog proračuna i modeliranje većih modela u programu LS Dyna.

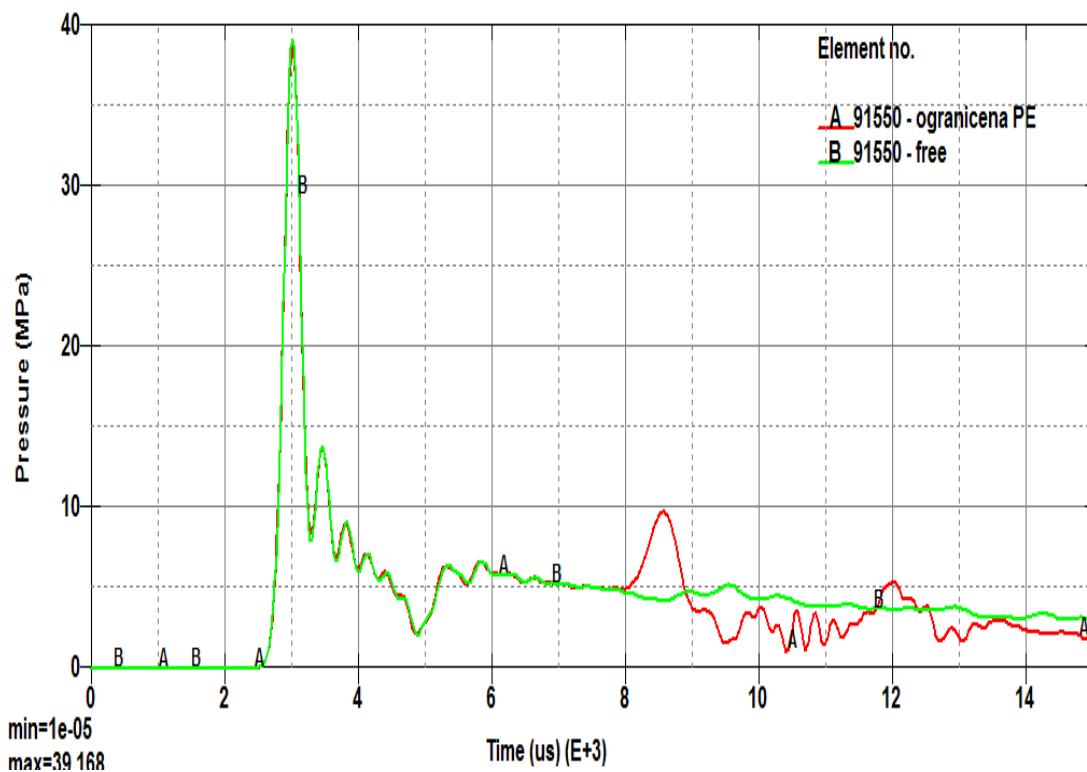


Slika 6.57 Modeli podvodne eksplozije u slobodnoj i u ograničenoj sredini

Na slici 6.57, lijevo je model 42 podvodne eksplozije u neograničenoj sredini, bez ograničenja, a desno je model 43 podvodne eksplozije koja je ograničena slobodnom površinom vode i dnom. U ovim modelima eksploziv se nalazi u ishodištu koordinatnog sustava na dubini od 6,1 m, a isto toliko je udaljenost od središta eksploziva do dna.

Na slici 6.58 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka u elementu 91550 ( $x=5$  m;  $y=0$  m;  $z=0$  m), na desnom bridu, položaj elementa 90050 prikazan je na slici 6.57.



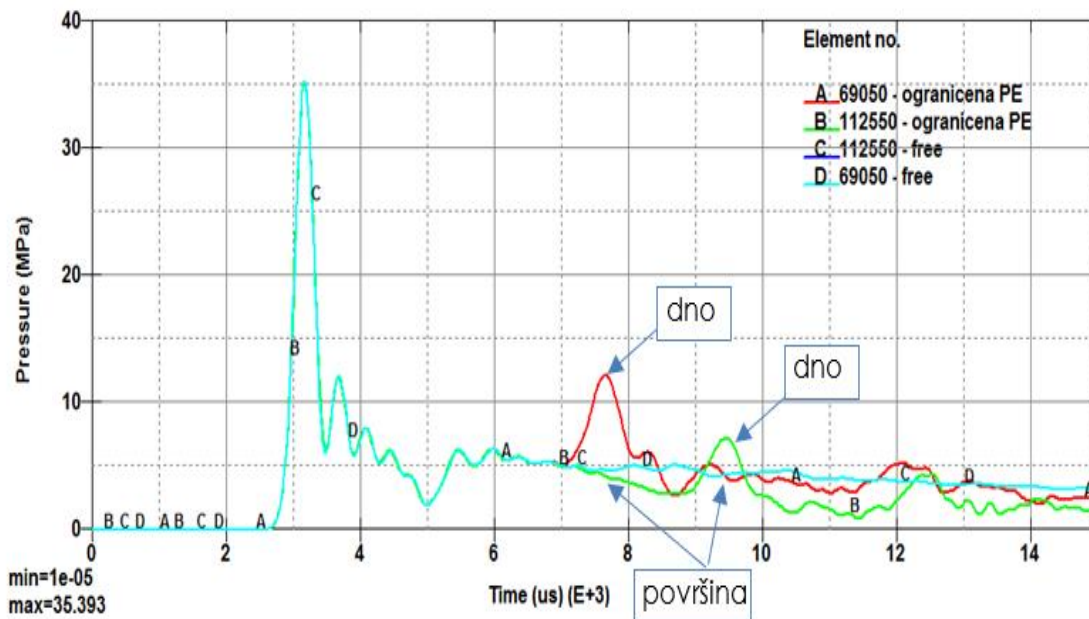


Slika 6.58 Dijagrami promjene tlaka u elementu 90050 za ograničenu i eksploziju u neograničenoj sredini

Na slici 6.58 prikazani su dijagrami promjene tlaka u elementu 90050, za eksploziju u neograničenoj sredini (dijagram B) i za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom (dijagram A).

Dijagrami tlaka se poklapaju za podvodnu eksploziju u neograničenoj i u ograničenoj sredini do trenutka  $t=8000 \mu\text{s}$ . Zatim se za podvodnu eksploziju u ograničenoj sredini naglo povećava tlak, u odnosu na dijagram podvodne eksplozije u neograničenoj sredini. Kod ovog dijagrama, obzirom na položaj elementa (u simetriji os x) očekuje se istovremeni dolazak reflektiranog udarnog tlačnog vala od slobodne površine vode i reflektiranog udarnog tlačnog vala od dna, u trenutku cca  $t=8000 \mu\text{s}$ .

Na slici 6.59 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka u elementima 69050 ( $x=5 \text{ m}$ ,  $y=0 \text{ m}$ ,  $z=-1,5 \text{ m}$ ) i 112550 ( $x=5 \text{ m}$ ,  $y=0 \text{ m}$ ,  $z=1,5 \text{ m}$ ), elementi su simetrični na os x, položaj elemenata prikazan je na slici 6.57.



Slika 6.59 Dijagrami promjene tlaka u elementima 69050 i 112550

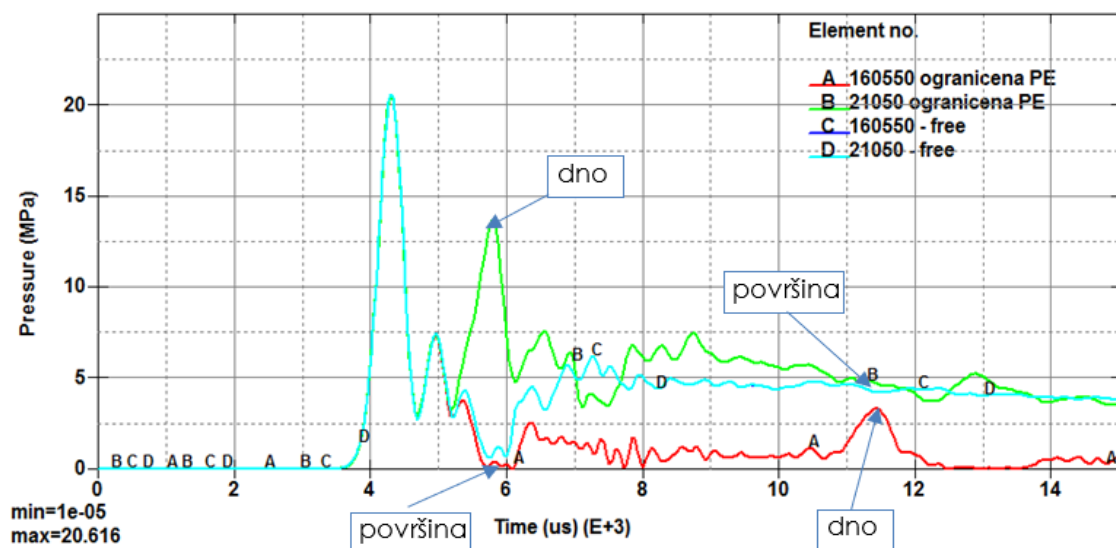
Na slici 6.59 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka za eksploziju u neograničenoj sredini (dijagrami C i D) i za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dna (dijagrami A i B).

Pregledom dijagrama (A, B, C i D) može se primijetiti kako je maksimalna vrijednost tlaka od izravnog udarnog vala jednaka kod podvodne eksplozije u neograničenoj i u ograničenoj sredini, za elemente 69050 i 112550, i dijagram tlaka se poklapa, do trenutka cca  $t=7000 \mu\text{s}$ .

Dijagram (A) vremenske promjene tlaka, u elementu 69050 naglo raste, u trenutku cca  $t=7000 \mu\text{s}$ , nakon dolaska reflektiranog udarnog tlačnog vala od dna, a zatim u trenutku cca  $t=9500 \mu\text{s}$  lagano pada zbog dolaska reflektiranog vlačnog vala od slobodne površine vode.

Dijagram (B) promjene tlaka podvodne eksplozije, u elementu 112550 u trenutku cca  $t=7000 \mu\text{s}$  postepeno pada, nakon dolaska reflektiranog udarnog vlačnog vala od slobodne površine vode, a zatim naglo raste zbog dolaska reflektiranog tlačnog udarnog vala od dna, u trenutku cca  $t=9500 \mu\text{s}$ .

Na slici 6.60 prikazani su dijagrami promjene tlaka u elementima 21050 ( $x=5 \text{ m}$ ;  $y=0$ ;  $z=-4,6 \text{ m}$ ) i 160550 ( $x=5 \text{ m}$ ;  $y=0 \text{ m}$ ;  $z=4,6 \text{ m}$ ), na desnom bridu modela, elementi su simetrični na horizontalnu ravninu, položaj elemenata prikazan je na slici 6.57.



Slika 6.60 Dijagrami promjene tlaka u elementima 21050 i 160550

Dijagrami na slici 6.60 prikazuju vremenske promjene tlaka za eksploziju u neograničenoj sredini (dijagrami C i D) i za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom (dijagrami A i B).

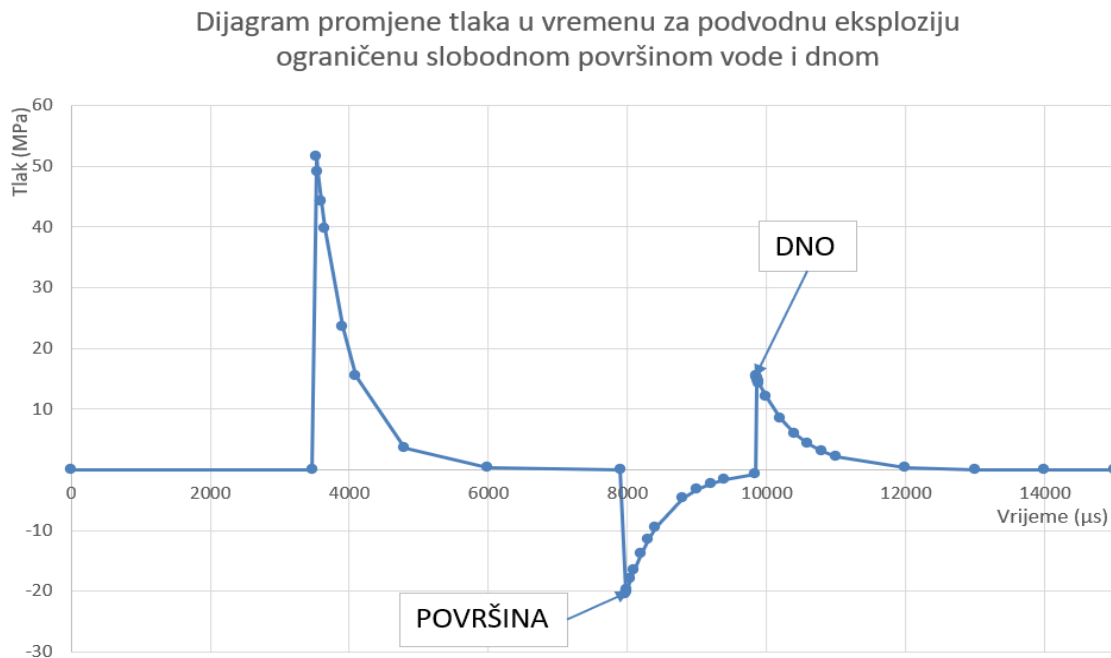
Pregledom dijagrama (A, B, C i D) vidljivo je kako maksimalna vrijednost tlaka od izavnog udarnog vala jednaka kod podvodne eksplozije u neograničenoj i u ograničenoj sredini i dijagrami tlaka se poklapaju, do trenutka cca  $t=5100 \mu s$ . Očekivana je istovremenost izmjena povećanja i smanjenja tlaka u dijagramima vremenske promjene tlaka u elementima 21050 i 160550 jer se nalaze na jednakoj udaljenosti od središta eksplozije, simetrično na os x, vidjeti sliku 6.57. Element je 21050 bliže dnu, a element 160550 je bliže slobodnoj površini vode.

Dijagram (A) vremenske promjene tlaka podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i dnom u trenutku cca  $t=5100 \mu s$  pada, a zatim raste zbog dolaska reflektiranog tlačnog vala od dna, u odnosu na dijagram podvodne eksplozije u neograničenoj sredini, u trenutku cca  $t=11400 \mu s$ .

Dijagram (B) vremenske promjene tlaka podvodne eksplozije ograničene dnom i slobodnom površinom vode, u trenutku cca  $t=5100 \mu s$ , tlak naglo raste zbog dolaska reflektiranog tlačnog vala od dna, a zatim opada zbog dolaska reflektiranog tlačnog vala od slobodne površine vode, u trenutku cca  $t=11400 \mu s$ .

Za usporedbu dobivenih rezultata numeričkim simulacijama na modelima u računalnom programu LS Dyna koristit će se rezultati dobiveni pomoću empirijskih izraza za eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom.

Koristeći analitičke izraze proveden je proračun vremenske promjene tlaka u točki C ( $x=5,0$  m;  $y=0$  m;  $z=-2,5$  m), za podvodnu eksploziju u ograničenoj sredini, koji je prikazan na slici 6.61.



Slika 6.61 Dijagram promjene tlaka u točki C, dobiven empirijskim izrazima

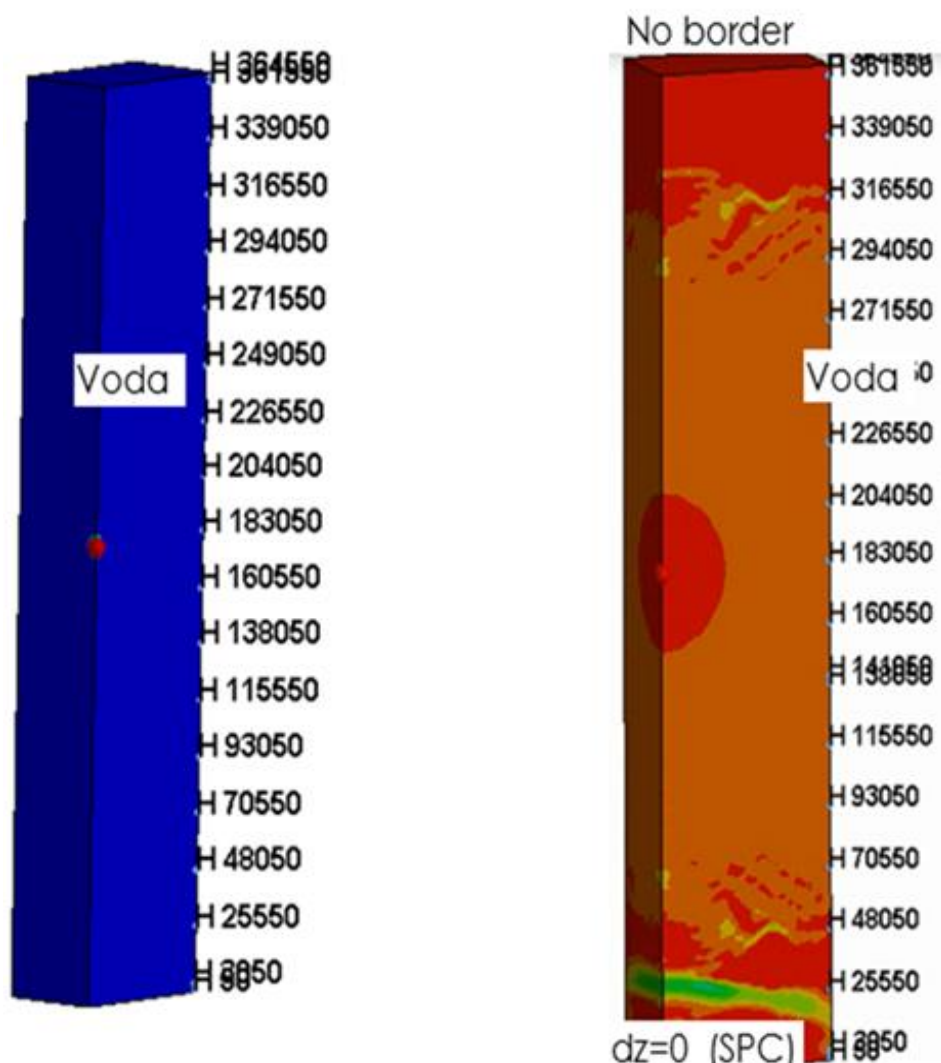
Pregledom dijagrama promjene tlaka u vremenu na slici 6.61 možemo primijetiti kako u promatrani element prvo dolazi izravni udarni tlačni val, vrijeme dolaska  $t_1=3527$   $\mu$ s, maksimalna vrijednost tlaka 51,53 MPa, a potom dolazi reflektirani vlačni udarni val od slobodne površine vode, vrijeme dolaska  $t_2=7980$   $\mu$ s, maksimalna negativna vrijednost tlaka 20,48 MPa, a nakon toga dolazi reflektirani udarni tlačni val od dna, vrijeme dolaska 9854  $\mu$ s, maksimalna vrijednost 15,45 MPa.

Usporedbom dijagrama vremenske promjene tlaka u elementu 69050 prikazanih na slici 6.59 (numerički postupak) i slici 6.61 (empirijski izrazi) vidi se kako su vrijednosti dobivene numeričkim postupkom niže od vrijednosti dobivene pomoću empirijskih izraza. Posebno, treba istaknuti odstupanje vrijednosti tlaka od reflektiranog udarnog vlačnog vala od slobodne površine vode. Tlak dobiven pomoću numeričkog postupka ne postiže negativnu vrijednost. Tlak kod dijagrama dobivenog pomoću empirijskih izraza je nakon postizanja ekstremnih vrijednosti u kraćem intervalu različit od nule, a na ostalim dijelovima je jednak nuli.

U drugoj fazi istraživanja razvijena su dva modela, volumen vode je 5x3x24,40 m, eksploziv kao kod prethodnih modela, modeli se razlikuju po rubnim uvjetima:

- Model 44 - Volumen vode: kvadar 5x3x24,40 m, konačni elementi vode 10x10x10 cm, 366000 elemenata vode, neograničena sredina,
- Model 45 - Volumen vode: kvadar 5x3x24,40 m, konačni elementi vode 10x10x10 cm, 366600 elemenata vode, spriječen pomak dna i ploha u kontaktu sa zrakom – zadan je rubni uvjet slobodne površine vode.

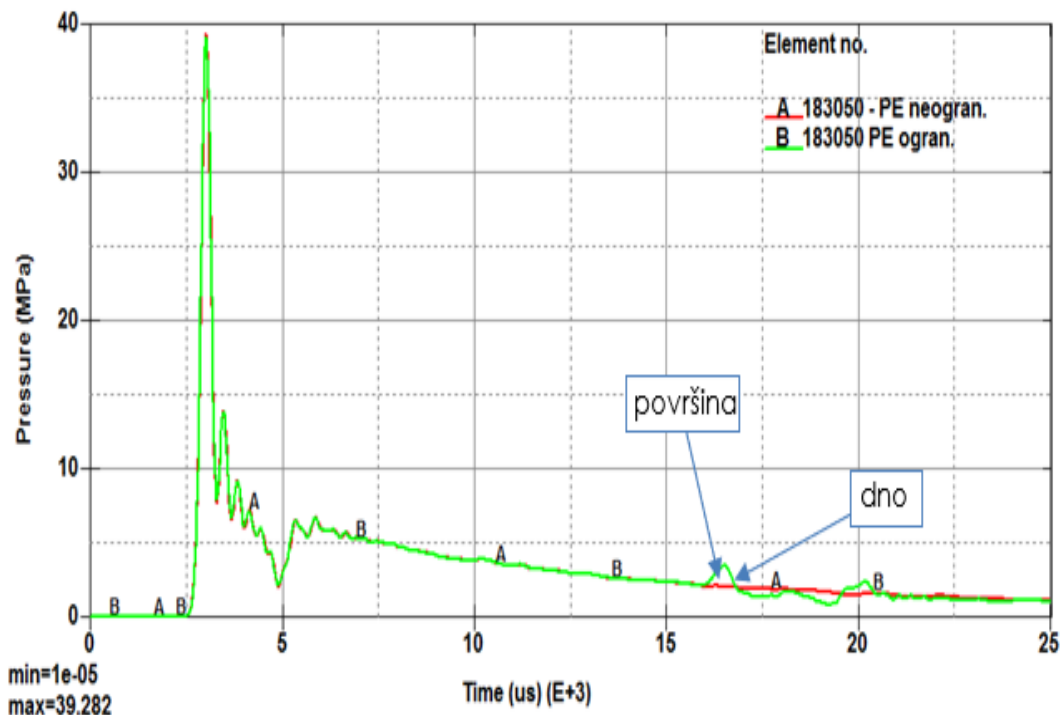
Modeli 44 i 45 su prikazani na slici 6.62.



Slika 6.62 Modeli podvodne eksplozije u slobodnoj i u ograničenoj sredini

Na slici 6.62, lijevo je model 44 podvodne eksplozija u neograničenoj sredini, s propusnim graničnim plohami, a desno je model 45 podvodne eksplozije koja je ograničena slobodnom površinom vode i dnom.

Na slici 6.63 prikazani su dijagrami promjene tlaka u elementu 18350 ( $x=5$  m;  $y=0$ ;  $z=0$  m), na desnom rubu modela, koji se nalazi na osi x, položaj elementa 18350 prikazan je na slici 6.62.



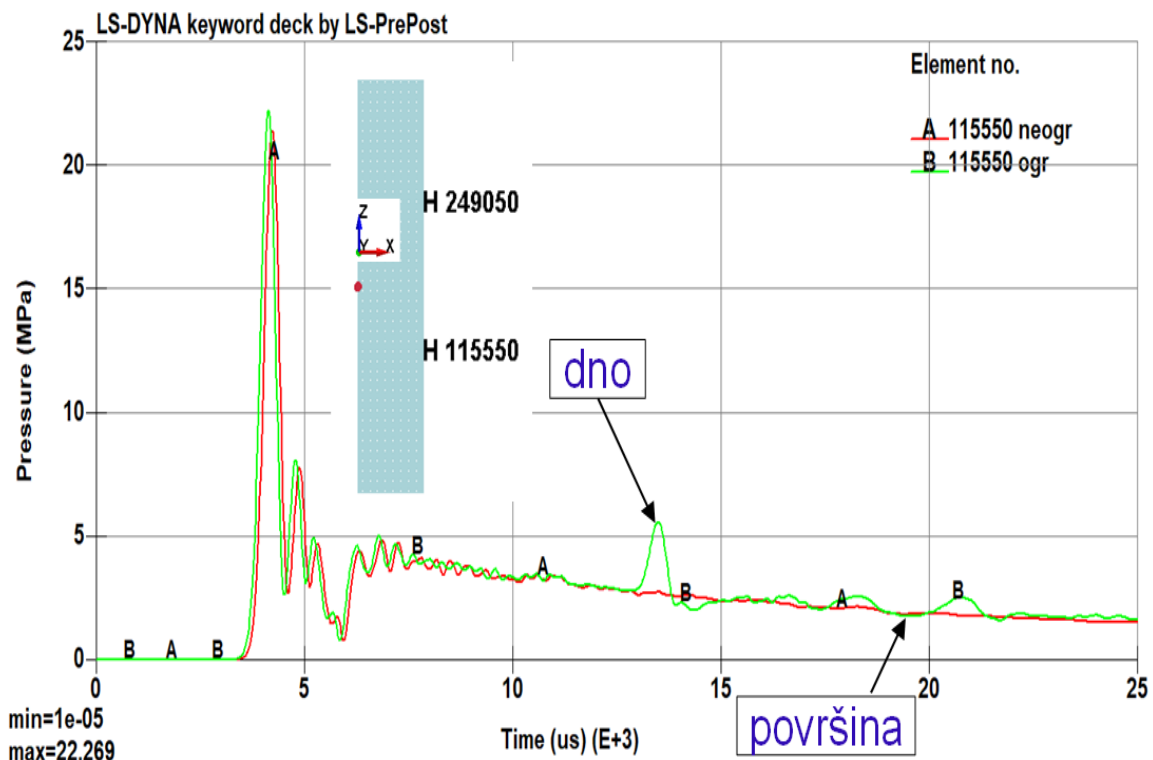
Slika 6.63 Dijagrami promjene tlaka u elementu 183050 za ograničenu i neograničenu eksploziju

Na slici 6.63 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka, u elementu 183050, za eksploziju u neograničenoj sredini (dijagram A) i za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom (dijagram B).

Pregledom dijagrama može se primijetiti kako je maksimalna vrijednost tlaka jednaka kod podvodne eksplozije u neograničenoj i u ograničenoj sredini i dijagram tlaka se poklapa do trenutka  $t=15900$   $\mu$ s, kad dijagram ograničene podvodne eksplozije povećava vrijednost, a zatim pada pa raste, u odnosu na dijagram podvodne eksplozije u neograničenoj sredini.

Kod ovog dijagrama s obzirom na položaj elementa očekuje se skoro istovremeni dolazak reflektiranog udarnog tlačnog vala od slobodne površine vode i reflektiranog udarnog tlačnog vala od dna pa se oni međusobno dijelom poništavaju.

Na slici 6.64 prikazani su dijagrami promjene tlaka u elementu 115550 ( $x=5$  m;  $y=0$  m;  $z=-4,5$  m), na desnom bridu modela.

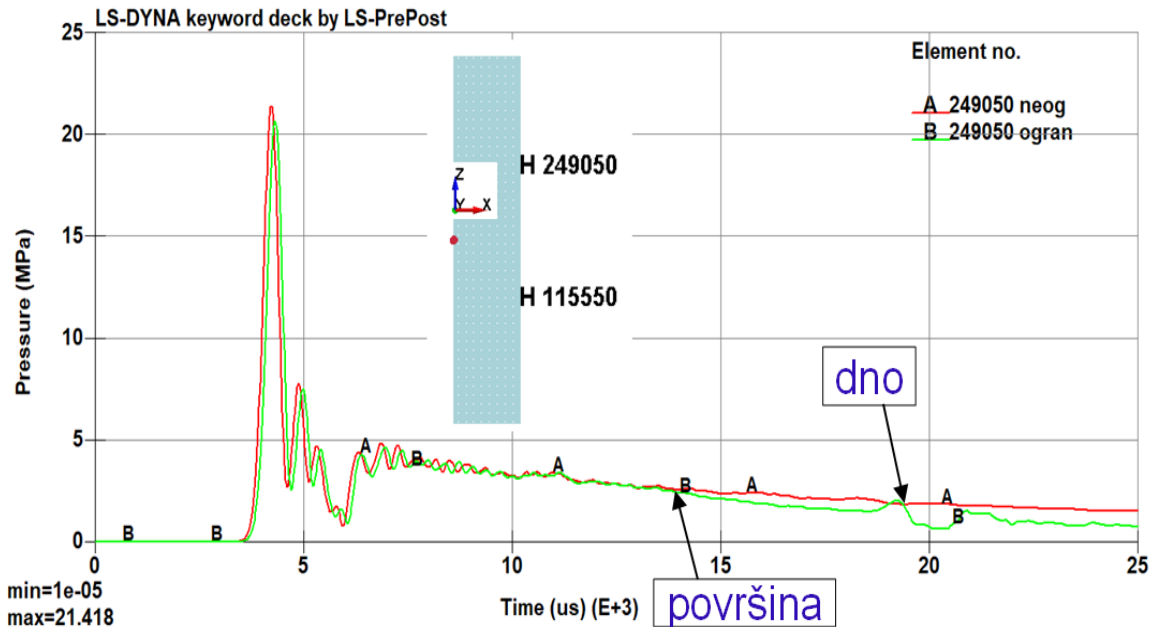


Slika 6.64 Dijagrami vremenske promjene tlaka u elementu 115550

Na slici 6.64 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka, u promatranom elementu 115550, za eksploziju u neograničenoj sredini (dijagram A) i za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom (dijagram B).

Pregledom dijagrama može se primijetiti kako je vrijednost tlaka od izravnog udarnog vala jednaka za podvodnu eksploziju u neograničenoj i u ograničenoj sredini, dijagram tlaka se dijelom poklapa. U trenutku cca  $t=12900$   $\mu$ s, tlak za eksploziju u ograničenoj sredini se naglo povećava zbog dolaska reflektiranog udarnog vala od dna. Zatim, tlak neznatno pada u trenutku cca  $t=19850$   $\mu$ s zbog dolaska reflektiranog vlačnog vala od slobodne površine vode.

Na slici 6.65 prikazani su dijagrami promjene tlaka u elementu 249050 ( $x=5$  m,  $y=0$  m,  $z=4,5$  m), na desnom bridu modela.



Slika 6.65 Dijagrami vremenske promjene tlaka u elementu 249050

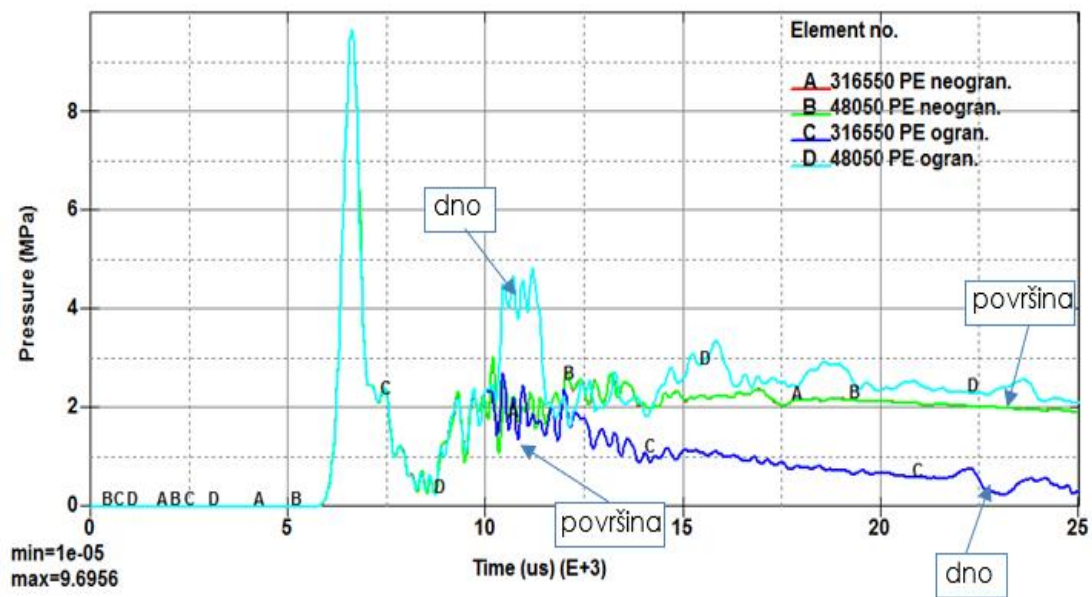
Na slici 6.65 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka, u promatranom elementu 249050, za eksploziju u neograničenoj sredini (dijagram A) i za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom (dijagram B).

Pregledom dijagrama može se primijetiti kako je vrijednost tlaka od izravnog udarnog vala jednaka za podvodnu eksploziju u neograničenoj i u ograničenoj sredini, dijagram tlaka se dijelom poklapa. U trenutku cca  $t=12900 \mu\text{s}$ , tlak za eksploziju u ograničenoj sredini neznatno pada zbog dolaska reflektiranog vlačnog vala od slobodne površine vode. Zatim u trenutku cca  $t=19850 \mu\text{s}$ , tlak se povećava zbog dolaska reflektiranog udarnog vala od dna.

Redoslijed dolaska i veličina reflektiranih valova je očekivana jer je konačnom elementu 249050 bliže slobodna površina vode, a dalje dno, a konačnom elementu 115550 obrnuto. Vremena dolaska reflektiranih valova, kod eksplozije u ograničenoj sredini, se podudaraju samo je razlika u redoslijedu dolaska reflektiranih valova.

Na slici 6.66 prikazani su dijagrami promjene tlaka u elementima 316550 ( $x=5 \text{ m}$ ;  $y=0 \text{ m}$ ;  $z=9 \text{ m}$ ) i 48050 ( $x=5 \text{ m}$ ;  $y=0 \text{ m}$ ;  $z=-9 \text{ m}$ ), na desnom rubu modela, položaj elemenata prikazan je na slici 6.62.





Slika 6.66 Dijagrami promjene tlaka u elementima 316550 i 48050

Na slici 6.66 prikazane su vremenske promjene tlaka u promatranim elementima 316550 i 48050, za eksploziju u neograničenoj sredini (dijagrami A i B) i za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom (dijagrami C i D).

Pregledom dijagrama (A, B, C i D) može se primijetiti kako je maksimalna vrijednost tlaka od izravnog udarnog vala jednaka kod podvodne eksplozije u neograničenoj i u ograničenoj sredini, za elemente 316550 i 48050 dijagram tlaka se poklapa, do trenutka cca  $t=10400 \mu\text{s}$ . Očekivana je istovremenost izmjena u dijagramima promjene tlaka u elementima 316550 i 48050 jer se elementi nalaze na jednakoj udaljenosti od središta eksplozije i ograničenja, vidjeti sliku 6.62.

Dolazak druge promjene tlaka u točkama događa se u trenutku cca  $t=22700 \mu\text{s}$ . Dolazak reflektiranih tlakova ovisi o udaljenosti od slobodne površine vode i dna i opisan je prethodnoj točki.

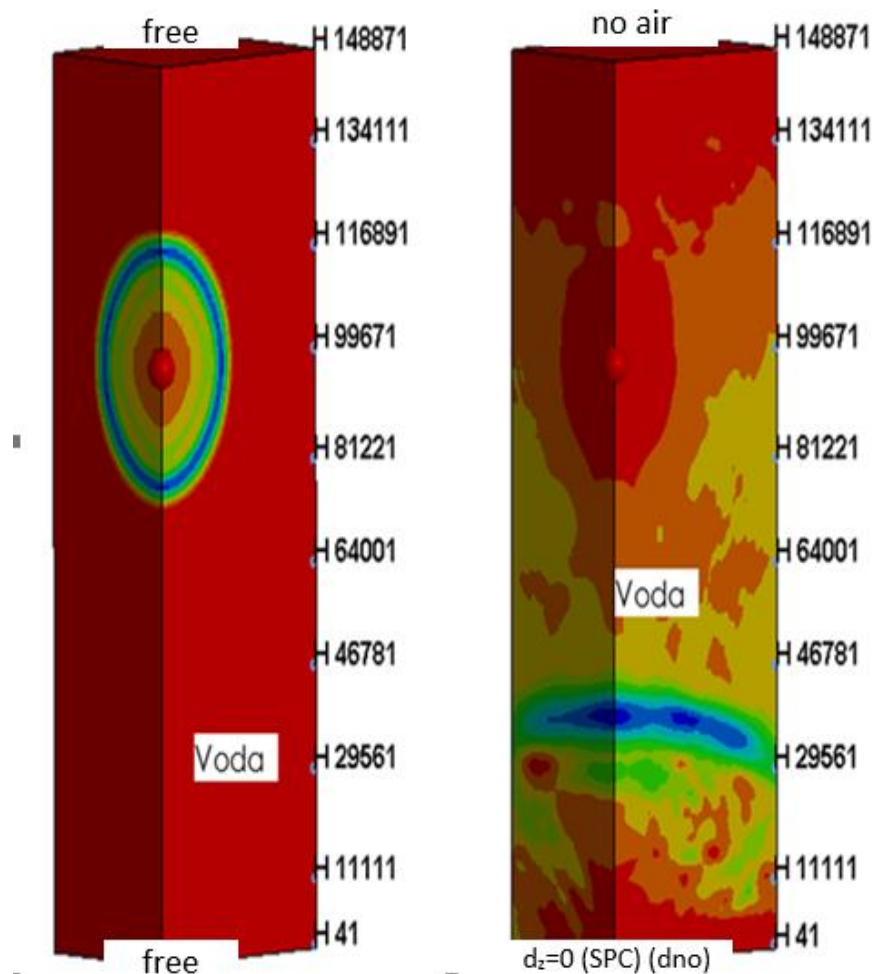
U trećoj fazi istraživanja razvijena su dva nova modela za istraživanje utjecaja ograničenja slobodnom površinom vode i dnom. Prvi model je podvodna eksplozija u neograničenoj sredini, a drugi u ograničenoj sredini slobodnom površinom vode i dnom.

Kod oba modela promatrani volumen vode je  $4,1 \times 3 \times 12,2$  m, položaj eksploziva nije simetričan, u odnosu na površinu i dno, kao kod ostalih modela, Središte eksplozivnog naboja je na dubini  $D=4,1$  m, a udaljeno je  $8,1$  m od dna ( $d=8,1$  m), a modeli su:

- Model 46 - Volumen vode: kvadar  $4,1 \times 3 \times 12,2$  m ( $4,1+8,1$ ) m, konačni elementi vode  $10 \times 10 \times 10$  cm, 150060 elemenata vode, neograničena sredina i
- Model 47 - Volumen vode: kvadar  $4,1 \times 3 \times 12,2$  ( $4,1+8,1$ ) m, konačni elementi vode  $10 \times 10 \times 10$  cm, 150060 elemenata vode, spriječen pomak dna i ploha u kontaktu sa zrakom – zadan je rubni uvjet slobodne površine vode.
- zadan je rubni uvjet slobodne površine vode.

Modeli 46 i 47 su prikazani na slici 6.67.

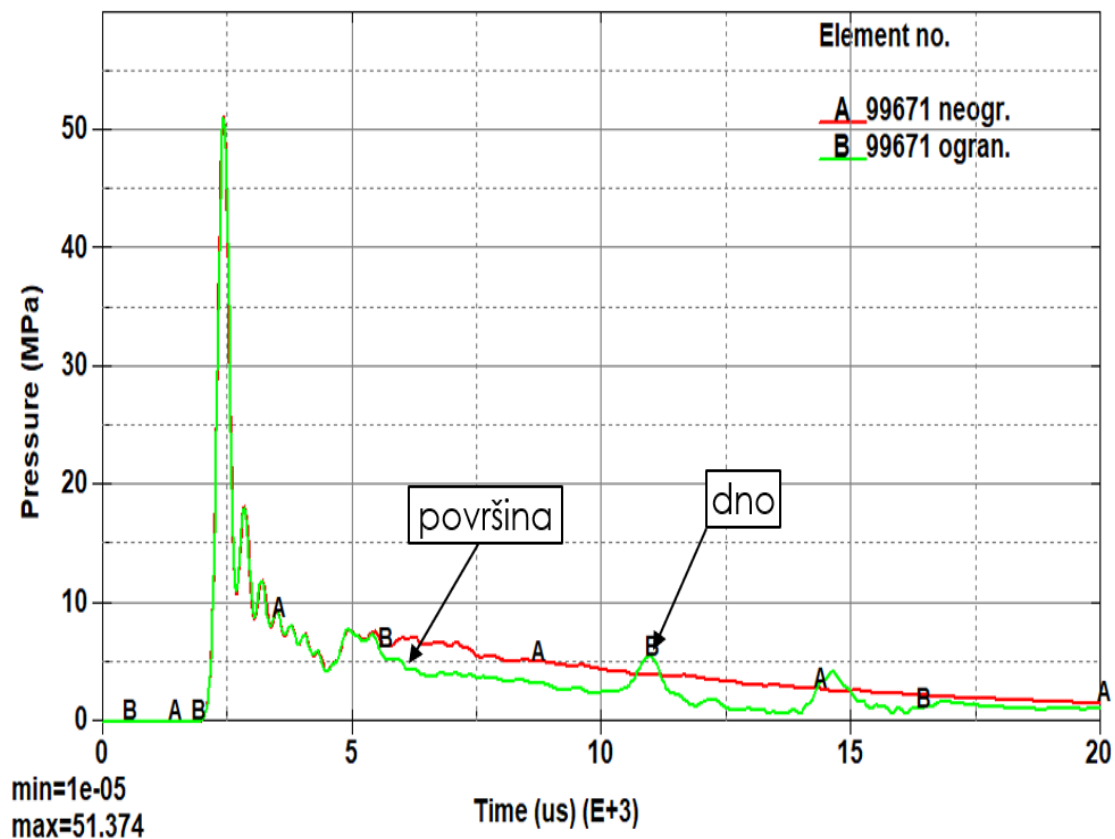
Model 46 – neograničena sredina Model 47 - ograničena sredina



Slika 6.67 Modeli podvodne eksplozije u slobodnoj i u ograničenoj sredini

Na slici 6.67 lijevo je model 46 podvodna eksplozija u neograničenoj sredini, bez ograničenja, a desno je model 47 podvodna eksplozija koja je ograničena slobodnom površinom vode i dnom. Model podvodne eksplozije u ograničenoj sredini ima modelirane rubne uvjete kao i prethodni modeli.

Na slici 6.68 prikazani su dijagrami promjene tlaka u elementu 99671 ( $x=4,1$  m;  $y=0$  m;  $z=0$  m), na osi x, na desnom rubu modela, položaj elementa 99671 prikazan je na slici 6.67.



Slika 6.68 Dijagrami promjene tlaka u elementu 99671 za ograničenu i neograničenu eksploziju

Na slici 6.68 prikazani su dijagrami vremenske promjene tlaka, u elementu 99671, za eksploziju u neograničenoj sredini (dijagram A) i za podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom (dijagram B).

Pregledom dijagrama vremenske promjene tlaka može se primijetiti kako je maksimalna vrijednost tlaka jednaka kod podvodne eksplozije u neograničenoj i u ograničenoj sredini i dijagram tlaka se poklapa do trenutka  $t=5460$   $\mu$ s. Nakon toga, dijagram tlaka ograničene podvodne eksplozije smanjuje vrijednost, u odnosu na

dijagram tlaka podvodne eksplozije u neograničenoj sredini, zbog utjecaja reflektiranog vlačnog vala od slobodne površine vode. Nakon toga u trenutku  $t = 10970 \mu\text{s}$  tlak naglo raste zbog utjecaja reflektiranog tlačnog vala od dna. Zatim, druga refleksija valova od dna, stvara novi tlačni val, u trenutku oko  $14650 \mu\text{s}$ .

Vremenska promjena tlaka, kod nekih modela eksplozije ograničenih slobodnom površinom vode, od reflektiranog udarnog vlačnog vala nije skokovita već postepena ali s dužim intervalom, dok od reflektiranog tlačnog udarnog vala, od dna je skokovit, s naglim prirastom i kraćim vremenom trajanja.

Prema mišljenju autora, ova pojava se pojašnjava činjenicom kako je refleksija od slobodne površine vode uvjetovana stvaranjem područja niskog tlaka, tlaka nižeg od tlaka vodene pare, tj. područja kavitacije koje daje postepenost i amortizaciju refleksije i porasta tlaka, dok kod dna je strogo zadan rubni uvjet na graničnoj plohi sa spriječenim pomakom i refleksija je trenutna i potpuna. Proširenjem sposobnosti računalnog programa i modela tla sigurno bi za mekano tlo porast tlaka bio postepeniji i manji jer bi se dio energije apsorbirao, a refleksija dijelom amortizirala. Temeljem usporedbe numeričkih rezultata i rezultata dobivenih pomoću empirijskih izraza, maksimalne vrijednosti tlaka (izravni i val reflektiran od dna) i minimalnog ili negativnog tlaka (refleksija od slobodne površine vode) primjećuju se značajna odstupanja. U ovim istraživanjima djelovanja podvodne eksplozije u ograničenoj sredini (zrak i/ili voda) nije bio cilj točnost rezultata nego na istraživanju sposobnosti modela i računalnog programa.

Temeljem provedenih istraživanja i usporedbom dobivenih rezultata s rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza potvrđena je sposobnost modela i računalnog programa u numeričkom modeliranju podvodne eksplozije u ograničenoj sredini. Numerički rezultati pokazuju sposobnost refleksije udarnog vala od slobodne površine vode kao vlačnog vala (negativni tlak) i refleksije udarnog vala od dna (pozitivni tlak). Rezultati istraživanja i zaključak potvrđuju dio 1. hipoteze.

Odstupanje numeričkih rezultata i rezultata dobivenih pomoću empirijskih izraza (maksimalne vrijednosti tlaka (izravni i reflektiran val od dna) i minimalnog ili negativnog tlaka (refleksija udarnog vala od slobodne površine vode) javlja se i zbog sljedećih razloga: veličine konačnih elemenata, dimenzije presjeka kvadra

promatranog područja vode, za razliku od numeričkog modela, kod empirijskih izraza refleksija udarnog vala od slobodne površine vode se proračunava ka potpuna refleksija od površine, bez kavitacije i za razliku od numeričkog modela, kod empirijskih izraza promatra se idealno širenje udarnog vala u određenom pravcu (jedne zrake) bez interakcije (interferencije) s ostalim dijelom, već reflektiranih valova u eksplozivnom polju.

Porast tlaka, na dijagramu dobivenim pomoću empirijskih izraza, je s naglašenim skokom i maksimumom u jednom trenutku, vertikalni skok, u jednoj točki, a zatim naglim smanjenjem. Dijagram nema postepeni porast tj. nema prednjeg kraja udarnog vala, što odgovara idealnim uvjetima, a u realnim uvjetima se ne može ostvariti zbog otpora, inercije i drugih faktora.

Potencijalno djelovanje podvodne eksplozije na obalne građevine i hidrotehničke građevine u realnim uvjetima može se očekivati kao djelovanje podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i u ograničenoj sredini slobodnom površinom vode i/ili dnom, ovisno o dubini i udaljenosti eksplozivnog naboja od podvodne građevine.

Podvodne građevine, koje su potencijalna meta djelovanja podvodne eksplozije su uglavnom temeljene na manjim dubinama (pomorske luke i infrastruktura, riječne luke i infrastruktura hidrotehničke građevine, neke brane i sl.).

Također, kod sagledavanja potencijalnog napada treba također analizirati mogućnost transporta određene količine eksploziva te mogućnost i sposobnost postavljanja eksploziva na određenoj dubini i udaljenosti od građevine, što će biti različito za pojedine građevine.

Veličina i promjena tlaka, koji djeluje na podvodnu građevinu, ovisi od vrste, količine i dubine eksplozivnog naboja, te udaljenosti središta eksplozivnog naboja od promatrane točke napada na građevinu kao i udaljenosti od središta eksplozivnog naboja do dna.

Obalne građevine, koje su potencijalna meta djelovanja podvodne eksplozije, su obično vertikalne pa s obzirom na pulsiranje i putanju plinskog mjehura, prema površini vode, njegovo djelovanje je slabije. Djelovanje je bočno, sa zakašnjenjem u odnosu na djelovanje izravnog i reflektiranih udarnih valova, a točka maksimalnog/minimalnog tlaka od plinskog mjehura stalno se pomiče prema površini vode. Tako je ukupno djelovanje u bilo kojoj točki obalne građevine značajno manje od djelovanja udarnog vala.

Dok kod brodova ili podmornica, kod kojih je djelovanje ispod trupa broda, djelovanje plinskog mjehura, naizmjenično, podiže brod gore – tlak i povlači brod dolje - vlak, uvijek na istom dijelu trupa, što lomi trup broda. Formacijska miska sredstva za misko ratovanje (engl. MW - *mine warfare*) imaju hidroakustičke sustave za detekciju, praćenje „pozitivnu identifikaciju“ cilja te aktiviranje eksplozivnog punjenja u točno određenom trenutku, kad podvodna eksplozija ima najveće rušilačke učinke.

U ovom radu je pri numeričkom modeliranju i simulaciji podvodne eksplozije djelovanje plinskog mjehura zanemareno.

Temeljem provedenih istraživanja utvrđeno je kako je djelovanje podvodne eksplozije u ograničenoj sredini nepovoljnije na obalnu građevinu nego što je djelovanje podvodne eksplozije u neograničenoj sredini. Utjecaj izravnog udarnog vala ovisi o udaljenosti eksplozivnog naboja od građevine, a utjecaj ograničenja ovisi o međusobnoj udaljenosti eksplozivnog naboja i ograničenja (površina vode, dno) te udaljenosti od ograničenja do promatrane točke.

Djelovanje podvodne eksplozije u ograničenoj sredini, gdje je ograničenje slobodna površina vode i dno je vrlo nepovoljno i ima dijelom slične elemente kao djelovanje plinskog mjehura. Na konstrukciju najprije djeluje izravni udarni tlačni val, zatim reflektirani tlačni udarni val od slobodne površine vode i na kraju reflektirani udarni tlačni val od dna ili obrnutim redom ovisno o položaju promatrane točke.

Najnepovoljnije djelovanje je kad na konstrukciju djeluje razoran tlak, zatim na već oštećenu konstrukciju djeluje vlak, a zatim ponovno tlak. Ovo naizmjenično djelovanje (tlak – vlak - tlak) ima odlike pulsirajućeg djelovanja i lomi konstrukciju.

Važno je istaknuti kako kod djelovanja reflektiranog vlačnog vala od slobodne površine vode, kod nekih modela odnosno međusobnog položaja i udaljenosti, nije naglašen skokovit porast tlaka već on djeluje duže vrijeme što daje veći impuls, slično kao kod tlaka plinskog mjehura.

Eksperimentalno istraživanje podvodne eksplozije u neograničenoj sredini je vrlo složeno, a posebno u ograničenoj sredini pa su stoga rezultati vrlo ograničeni. Svakako je potrebno provesti istraživanja u smislu kalibracije numeričkih rezultata s eksperimentalnim rezultatima.

Numerički modeli korišteni u ovom radu se mogu koristiti pri inženjerskim proračunima obalnih i hidrotehničkih građevina uzimanjem stvarnih geometrijskih elemenata i pronalaženje najnepovoljnije kombinacije geometrijskih elemenata i maksimalnoj količini eksploziva koja ovisi o mogućnostima transporta i postavljanja na određenoj dubini.

Temeljem provedenih istraživanja za potrebe određivanja djelovanja podvodne eksplozije u ograničenoj sredini na podvodne građevine, pri praktičnim inženjerskim proračunima, preporučuje se sljedeće:

- Zanimariti djelovanje hidrostatičkog tlaka.
- Utjecaj ograničenja uzeti u obzir za određene dubine i udaljenosti eksploziva od dna te količine eksplozivnog punjenja.
- Odrediti količinu eksplozivnog punjenja i njegovu dubinu s obzirom na mogućnosti transporta i postavljanja eksplozivnog punjenja.
- S obzirom na poznatu dubinu vode u blizini građevine odrediti dio konstrukcije najmanje otpornosti i najnepovoljniji položaj eksplozivnog punjenja, koji omogućava maksimalnu vrijednost tlaka od izravnog udarnog vala, negativnog tlaka od refleksije vlačnog vala od slobodne površine vode i tlačnog vala od refleksije udarnog vala od dna.
- Korištenje reduciranih modela primjenom simetrije i redukcije volumena kocke na volumen kvadra.
- Dimenzije presjeka kvadra (volumena vode) uskladiti sa zadanom udaljenosti od središta eksplozije do ograničenja (zrak i/ili dno).
- Veličine konačnih elemenata odabrati po mogućnosti 2 cm pa više, sukladno zahtijevanoj točnosti rezultata i tehničkim mogućnostima računala.
- Koristiti model u kojem je zrak i dno (tlo) zamijenjeno zadavanjem rubnih uvjeta, na poseban prethodno opisan način.
- Dobivene rezultate usporediti s rezultatima eksperimenta, ako postoje, ili rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza.

Prilikom pripreme projekta konstrukcije obalnih i hidrotehničkih građevina te infrastrukture, potrebno je provesti proračun i dokaz mehaničke otpornosti i stabilnosti na djelovanje podvodne eksplozije u ograničenoj sredini, gdje je ograničenje slobodna površina vode i dno.

## 6.8 Numeričko modeliranje podvodne eksplozije u mirnoj vodi kao plošno opterećenje na podvodne građevine

### 6.8.1 Osnovne pretpostavke

Djelovanje podvodne eksplozije na podvodne građevine odnosno interakcija fluida i konstrukcije (engl. *Fluid Structure Interaction (FSI - fsi)*), prethodno je ukratko opisano ka fizikalna pojava te su dane neke matematičke formulacije i numerički modeli za rješavanje ove zadaće.

U istraživanjima djelovanja podvodne eksplozije na konstrukciju obrađeno je više različitih skupina modela istražujući utjecaj raznih mehaničkih i drugih parametara materijala te parametara interakcije i dr. Dalje će biti ukratko prikazani neki jednostavni modeli, na kojima je istražena sposobnost računalnog programa u modeliranju djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine.

U svakom slučaju, podvodna eksplozija djeluje uglavnom na podvodnu građevinu preko vode, osim ako je eksploziv postavljen izravno na konstrukciju. U ovom radu se istražuje djelovanje podvodne eksplozije na konstrukciju kad je eksploziv udaljen od konstrukcije. Postavlja se pretpostavka: Računalni program LS Dyna ima sposobnost rješavanja zadaće djelovanja podvodne eksplozije na konstrukciju.

Istraživanja su provedena u dvije faze, na više modela podvodne eksplozije u interakciji s betonskim blokom.

Za provjeru pretpostavke, u prvoj fazi istraživanja, usporedno su razvijeni numerički modeli podvodne eksplozije u neograničenoj sredini (bez utjecaja dna i slobodne površine vodene te konstrukcije) i modeli podvodne eksplozije u neograničenoj sredini u interakciji s konstrukcijom, te su provedene numeričke simulacije u računalnom programu LS Dyna, u cilju istraživanja utjecaja konstrukcije na eksplozivno polje i eksplozivnog polja na konstrukciju.

U drugoj fazi istraživanja, usporedno su razvijeni numerički modeli podvodne eksplozije u interakciji s konstrukcijom, kod kojih su različite mehaničke karakteristike betona, te su provedene numeričke simulacije u računalnom programu LS Dyna, u cilju utvrđivanja utjecaja mehaničkih karakteristika na rezultate.



### 6.8.2 Modeliranje interakcije fluida i konstrukcije

Modeli se sastoje od prostora vode i eksplozivnog naboja, za neograničenu sredinu, dok se u modelu interakcije fluida i konstrukcije pored vode i eksplozivnog naboja dodaje i betonski blok.

Modeliranje je provedeno uz prethodne pretpostavke (simetrija, slobodna propusnost nekih graničnih ploha i sl.), uz sve već navedene parametre i svojstva vode i eksploziva.

U literaturi je opisano više modela betona, koji se koriste u računalnom programu LS Dyna. U ovom istraživanju bit će korišten jednostavan model jer je težište na istraživanju interakcije, a manje na analizi betona. U drugoj fazi će se analizirati utjecaj mehaničkih karakteristika na širenje i prolaz udarnog vala te ponašanje betona (naprezanja, pomaci). U modelu su usvojene sljedeće mehaničke karakteristike betona:

#### **Beton C 30/37**

MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC\_(TITLE) (003)

Gustoća  $\rho=2,4$  g/cm<sup>3</sup>, RO=2,4;

Modul elastičnosti E=32000 MPa;

Poissonov koeficijent PR=0,18 i

Granica popuštanja 32 MPa SIGY=3,2 x10<sup>-4</sup>.

Mjerne jedinice za unos podataka u računalni program LS Dyna su:

cm, g i  $\mu$ s (mikro sekunda (us)).

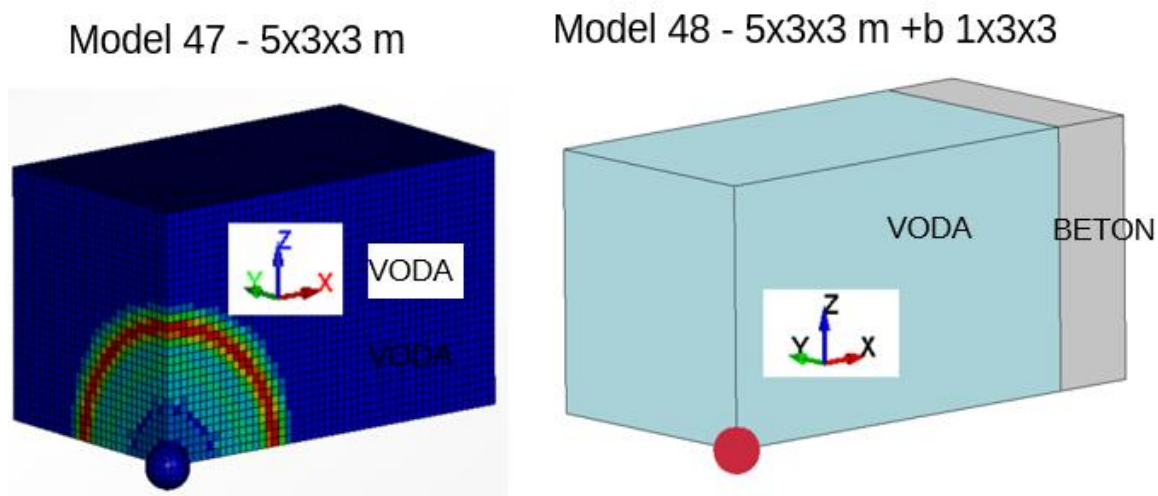
Kod modeliranja geometrijski elementi, svojstva materijala i diskretizacija vode i eksploziva su slični kao kod prethodnih primjera. Volumen vode je oblika kvadra 5x3x3 m, a betonski blok je dimenzija 1x3x3 m. Eksploziv je TNT, mase W=136,08 kg, radijus eksplozivnog punjenja u obliku kugle  $R_{ep}=27,11$  cm. Veličina konačnih elemenata vode i betona je 10x10x10 cm, a gustoća diskretizacije eksplozivnog punjenja je 6. Kao što je ranije istraženo, utjecaj gustoće diskretizacije eksploziva ne utječe na rezultate tlaka.

Razvija se model u neograničenoj sredini kako bi usporedbom rezultata dobili utjecaj betonskog bloka na promjene u eksplozivnom polju.

Prva grupa modela je:

- Model 47 - Volumen vode: kvadar 5x3x3 m, konačni elementi vode 10×10x10 cm, 45000 elemenata, neograničena sredina i
- Model 48 - Volumen vode: kvadar 5x3x3 m, beton 1 m, konačni elementi vode i betona 10×10x10 cm, 54000 elemenata.

Modeli su prikazani na slici 6.69.



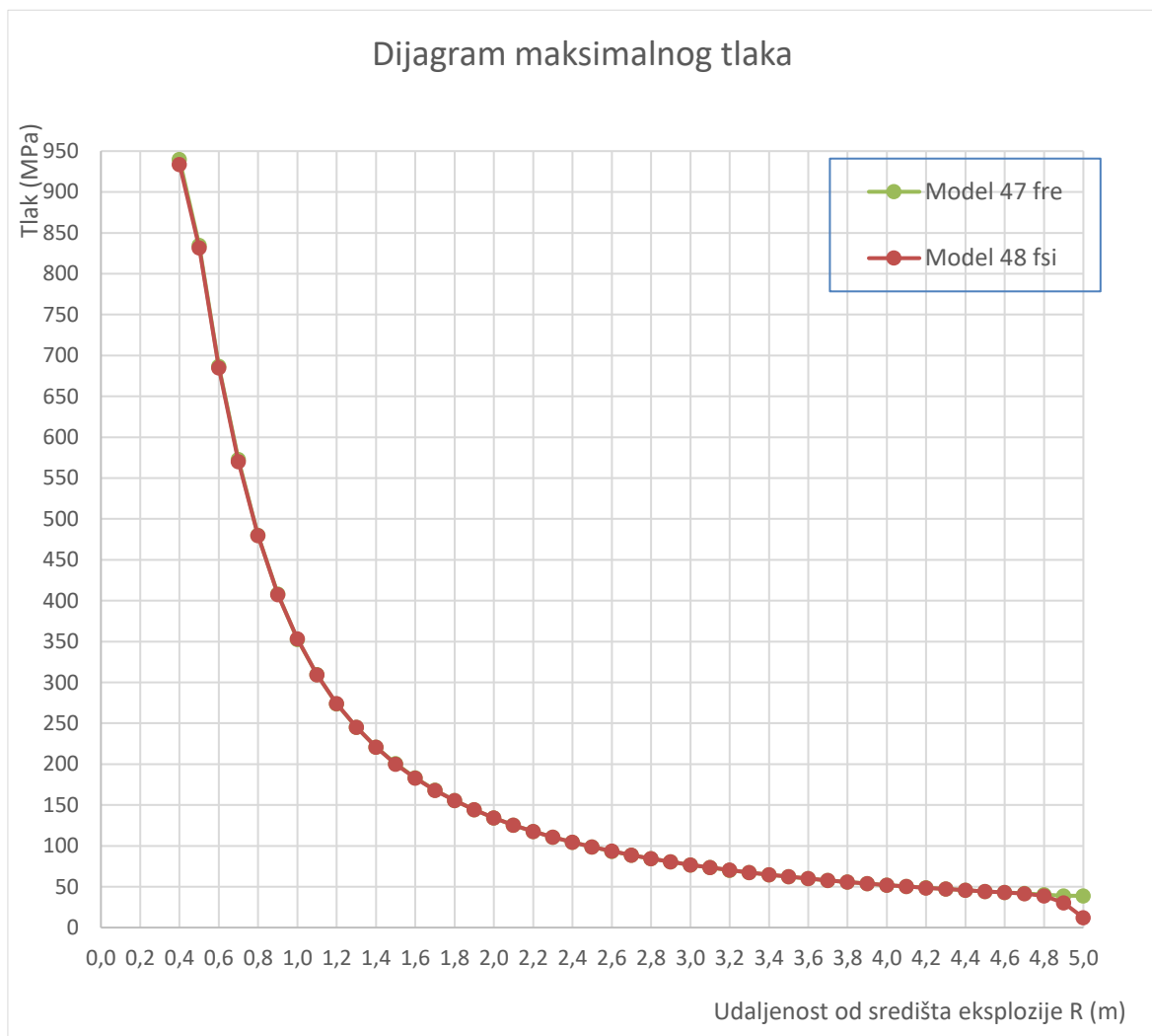
Slika 6.69 Modeli podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i interakciji s konstrukcijom

Koordinatni sustav na slici 6.59 i na sljedećim slikama je prikazan simbolički radi orijentacije koordinatnih osi, a stvarno ishodište je u središtu eksplozivnog naboja.

### 6.8.3 Numerički rezultati

Nakon provedenog modeliranja i proračuna numeričkih modela u računalnom programu, analizirani su dobiveni rezultati numeričkog postupka u cilju potvrde ispravnosti numeričkog modela, modeliranja podvodne eksplozije i sposobnost računalnog programa u rješavanju zadaće interakcije fluida i konstrukcije.

Na slici 6.70 prikazani su dijagrami ovisnosti maksimalnog tlaka na fronti udarnog vala o udaljenosti od središta eksplozije za eksploziju u neograničenoj sredini (model 47) i za podvodnu eksploziju u interakciji s konstrukcijom (model 48).

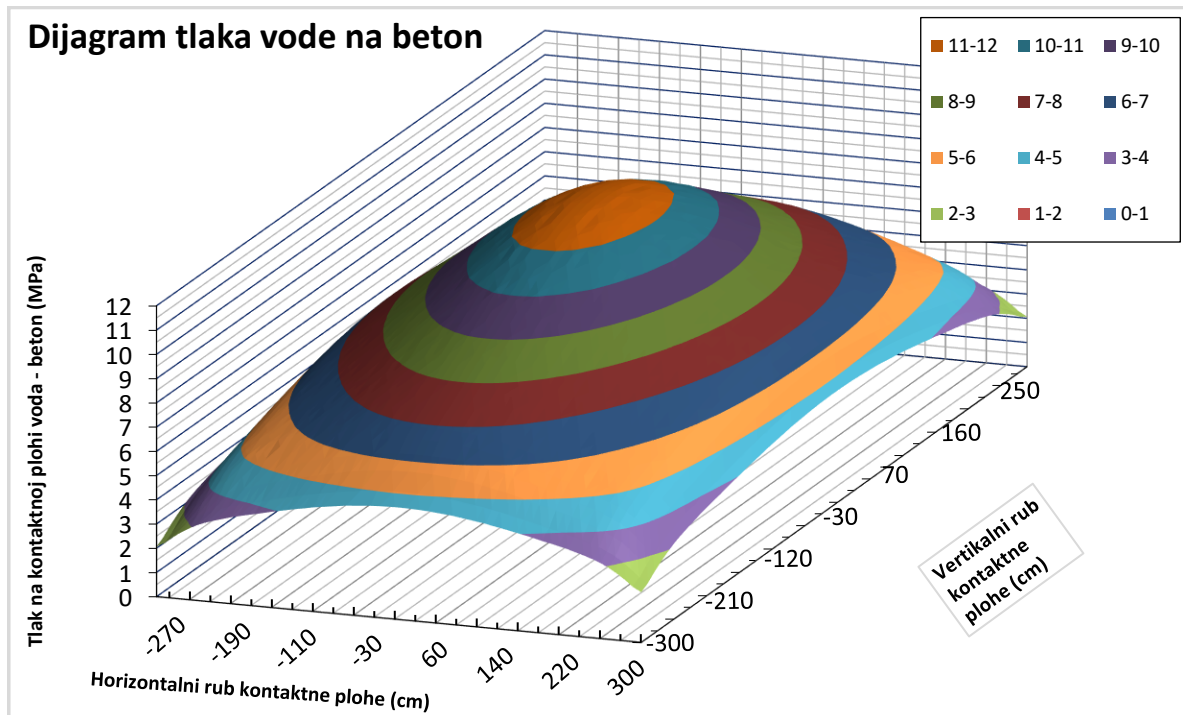


Slika 6.70 Dijagrami promjene tlaka za neograničenu sredinu i interakciju s konstrukcijom

Na slici 6.70 prikazani su dijagrami promjene maksimalne vrijednosti tlaka u vodi ovisno o udaljenosti, za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini i podvodnu eksploziju u interakciji s konstrukcijom. Na slici je vidljivo kako se maksimalni tlakovi na fronti udarnog vala u potpunosti slažu u svim elementima osim u kontaktnom elementu vode s betonom, zbog utjecaja refleksije udarnog vala.

Maksimalna vrijednost tlaka u elementu 50, na modelu eksplozije u neograničenoj sredini, je 39,95 MPa, a na modelu podvodne eksplozije u interakciji s betonom je 12,06 MPa.

Na slici 6.71 prikazan je 2D dijagram tlaka vode, u kontaktnim elementima vode, koja pritišće - tlači kontaktnu površinu betona.



Slika 6.71 Dijagram maksimalnog tlaka na plohi kontakta vode i betona

Dijagram prikazan na slici 6.71 je dobiven simetričnim proširenjem modelirane površine betona na cjelokupnu površinu cjelokupnog modela, brojčane vrijednosti na dijagramu prikazane sukladno tehničkim mogućnostima programa. Naime prilikom pripreme modela za proračun korištena je simetrija tj. dvije ravnine simetrije.

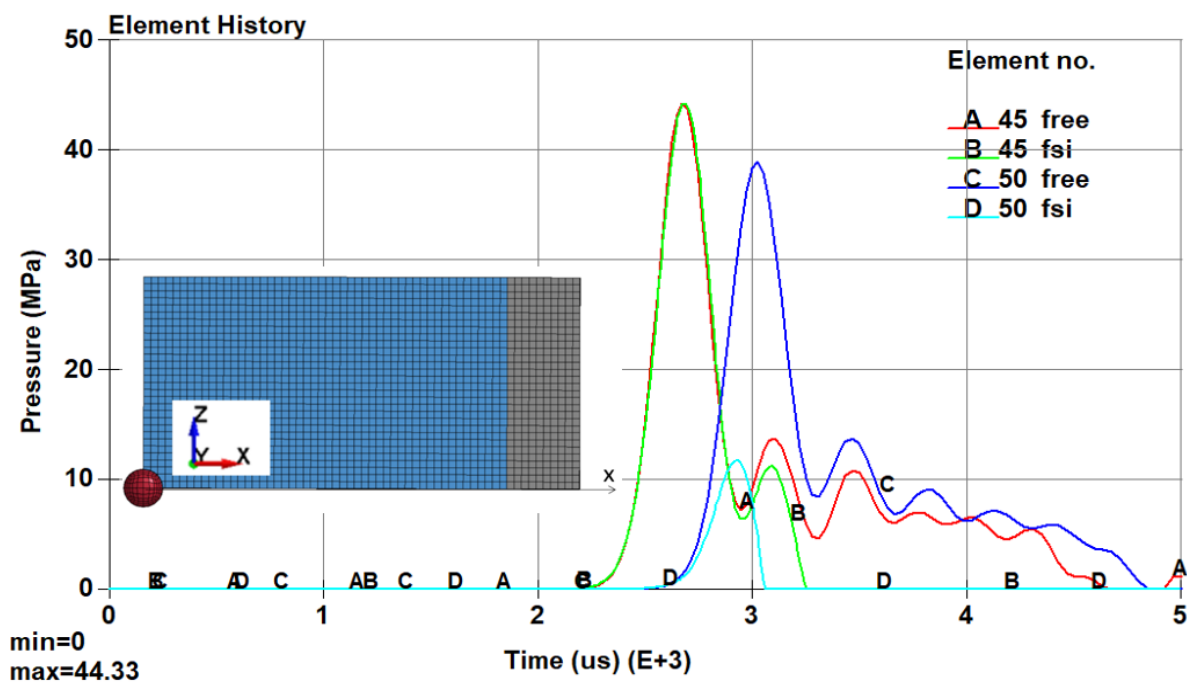
Ukupna površina betonskog bloka je dimenzija 600x600 cm, a u modelu je analizirana jedna četvrtina površine tj. površina 300x300 cm. Kao što je prikazano na dijagramu, maksimalni tlak vode je u najbližoj udaljenosti od središta eksplozije, koordinate točke (500; 0; 0).

Dijagram je dobiven na temelju očitanih maksimalnih vrijednosti tlaka u izlaznim rezultatima (dijagram tlak – vrijeme) u svakom elementu. Također treba napomenuti kako se također maksimalna vrijednost tlaka javlja najprije u najbližoj udaljenosti od središta eksplozije, a daljnjim širenjem udarnog vala maksimalni tlak se postepeno širi na ostale dijelove kontaktne plohe između vode i betona. Prikazani dijagram predstavlja anvelopu maksimalnog tlaka vode na površini betonskog bloka, u kontaktu s vodom.

Treba napomenuti kako se maksimalno opterećenje (tlak) koje je mjerodavno opterećenje za projektiranje podvodne građevine može pojaviti i u nekoj drugoj točki plohe betonskog bloka, što ovisi o položaju eksplozivnog punjenja.

Nadalje, promotrimo dijagrame vremenske promjene tlaka u nekim elementima na određenoj udaljenosti od središta eksplozije usporedno za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini i za djelovanje podvodne eksplozije na konstrukciju.

Na slici 6.72 su prikazani dijagrami vremenske promjene tlaka u konačnim elementima 45 (udaljenost od središta eksplozije 4,5 m) i 50 (udaljenost od središta eksplozije 5 m), za model 47 i za model 48.



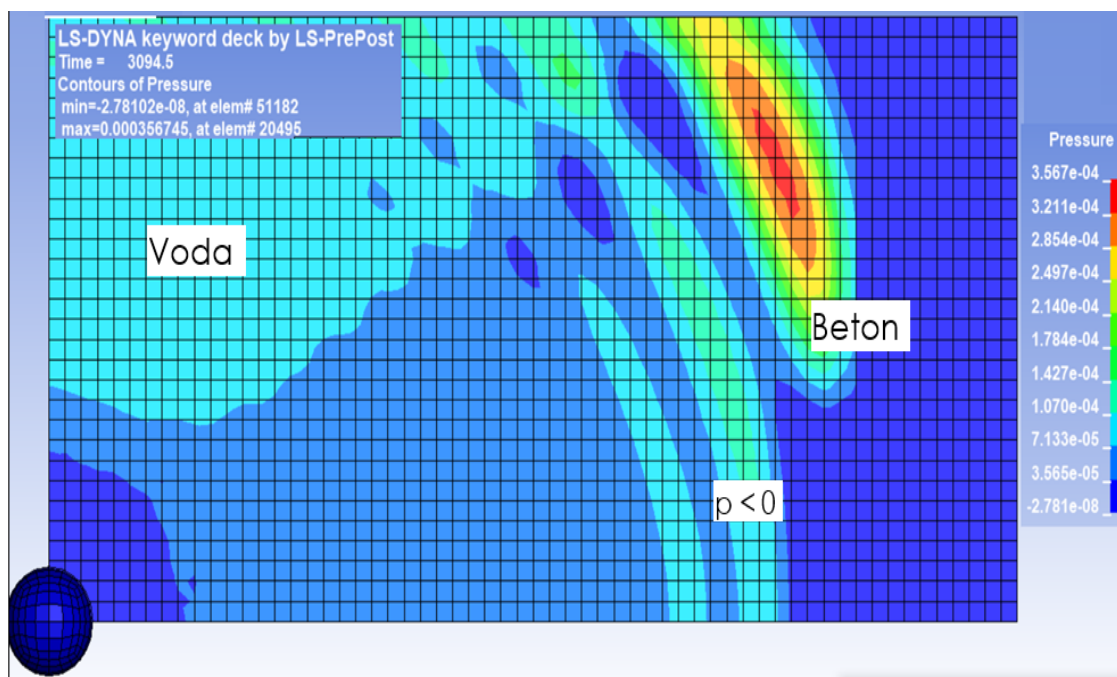
Slika 6.72 Dijagrami vremenske promjene tlaka u konačnim elementima vode 45 i 50

Na slici 6.72 se vidi kako su maksimalne vrijednosti tlaka u elementu 45 jednake za model 47 (A free - crvena linija) i za model 48 (B fsi – zelena linija), a zatim tlak kod modela 48 opada na nulu dok kod modela 47 tlak opada do određene vrijednosti i održava vrijednost te nakon nekog vremena pada na nulu.

U kontaktnom konačnom elementu vode 50 vrijednost tlaka u modelu 48 (D fsi – roza linija) je značajno manja (12,19 MPa) nego u modelu 47 (C free – plava linija) (38,95 MPa) i tlak na modelu 48 naglo pada.

Dijagrami promjene tlaka na manjim udaljenostima, od središta eksplozije, se podudaraju, a na većim udaljenostima, bliže konstrukciji, odstupanje dijagrama se povećava. Povećanje odstupanja nastaje zbog sve većeg utjecaja refleksije dijela udarnog vala od betona (podvodne građevine).

Dio udarnog vala reflektira se od betona (konstrukcije), reflektirani udarni val se širi u prostoru vode i umanjuje vrijednost tlaka izravnog udarnog vala pa njegova vrijednost brzo pada na nulu pa čak i ispod nule što nije prikazano na dijagramu zbog ograničenih mogućnosti prikaza tlaka ali se vidi na slici iz animacije, vidjeti sliku 6.73.



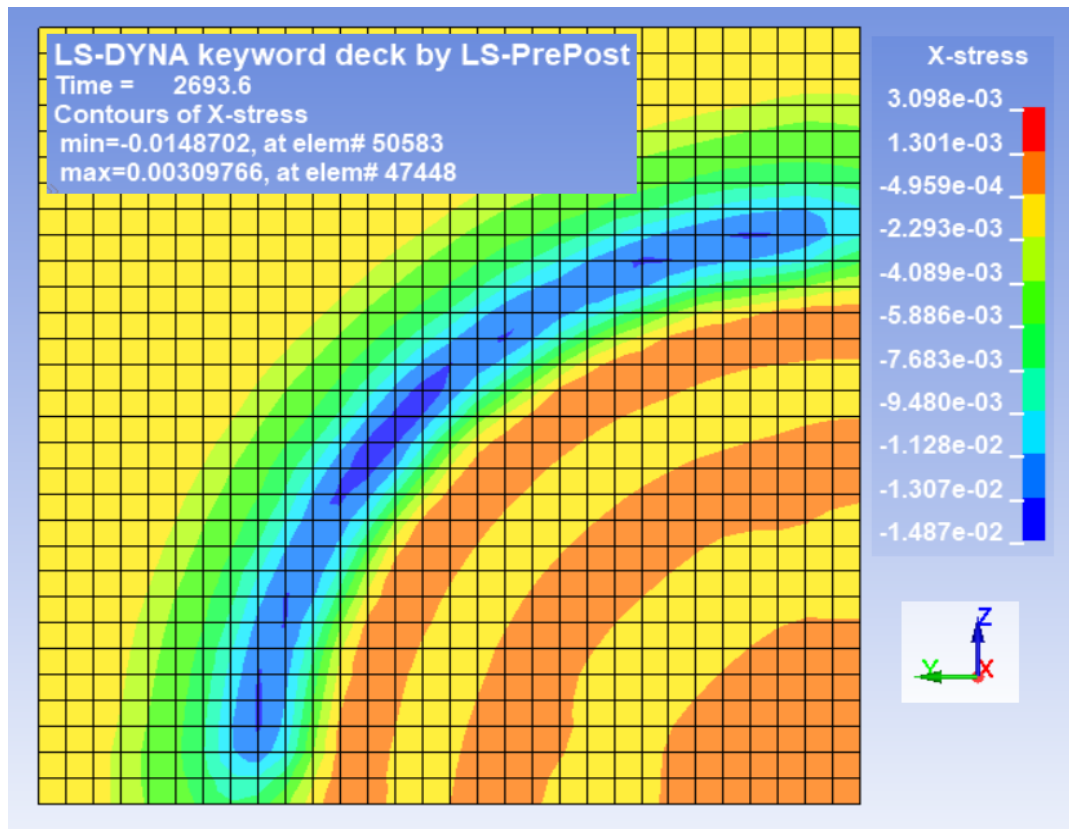
Slika 6.73 Raspodjela tlaka i širenje udarnog vala u vodi,  $t=3094,4 \mu\text{s}$

Dio udarnog vala se reflektira od površine betonskog bloka, a dio udarnog vala prolazi kroz kontaktnu plohu između tekućine i betonskog bloka. Dio udarnog vala koji prođe kroz plohu betonskog bloka nastavlja se širiti u betonskom bloku također po valnoj teoriji.

Kao što je ranije spomenuto u tekućini se šire samo longitudinalni udarni valovi, dok se u krutom tijelu – betonskom bloku pored longitudinalnih udarnih valova šire i transverzalni udarni valovi.

Kao posljedica spomenute činjenice u konačnim elementima betonskog bloka betona javlja se tenzor naprezanja, koji se mijenja u vremenu. U konačnim elementima betonskog bloka, numeričkim postupkom, se dobivaju dijagrami vremenske promjene komponenti tenzora naprezanja. Tako u određenom trenutku, kad je vrijeme konstanta, imamo: x – naprezanje (engl. *stress*), y – naprezanje, z – naprezanja, xy – naprezanje, yz – naprezanje i zx – naprezanje.

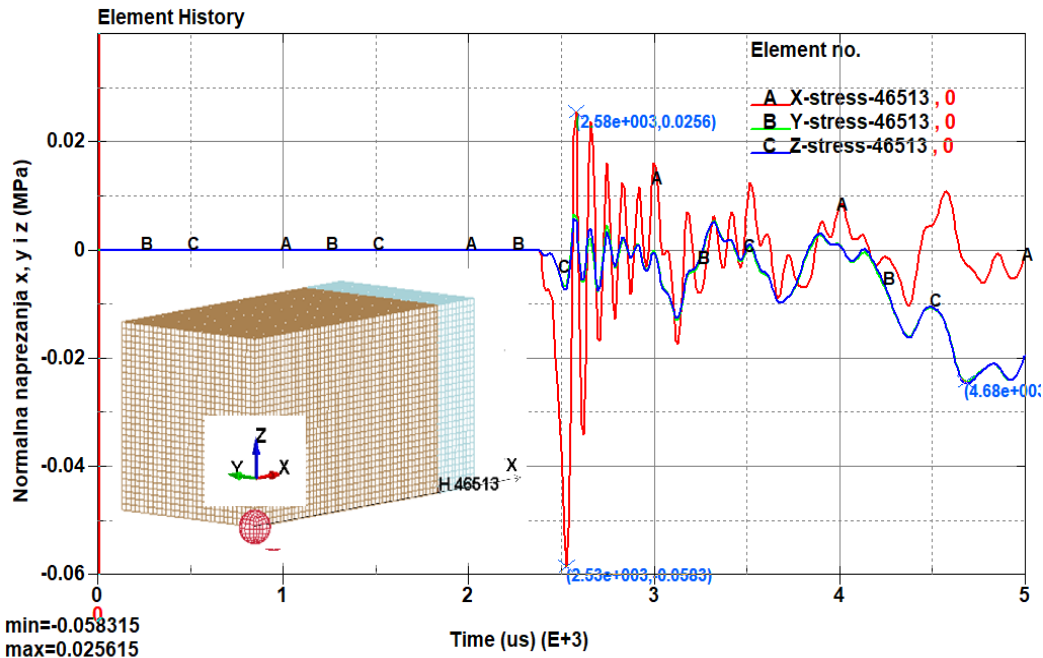
Izlazni rezultati daju kompletan tenzor naprezanja, koji se sastoji od tri normalne komponente: x - naprezanje ( $\sigma_{xx}$ ), y - naprezanje ( $\sigma_{yy}$ ) i z - naprezanje ( $\sigma_{zz}$ ) te tri posmične komponente: xy – naprezanje ( $\sigma_{xy}$ ), yz – naprezanje ( $\sigma_{yz}$ ) i zx – naprezanje ( $\sigma_{zx}$ ). Na slici 6.74 prikazana je raspodjela naprezanja  $\sigma_{xx}$  na kontaktnoj površini betona, u trenutku  $t=2693,6 \mu\text{s}$ .



Slika 6.74 Raspodjela naprezanja  $\sigma_{xx}$  na betonskom bloku,  $t=2693,6 \times 10^{-3} \mu\text{s}$

Na slici 6.74 prikazana je raspodjela naprezanja ( $\sigma_{xx}$ ) (smjer normale na promatranu ravninu je x i naprezanje je u smjeru osi x), u elementima u površinskom sloju betonskog bloka i širenje dijela udarnog vala podvodne eksplozije, koji je prošao kroz vodu i prešao graničnu plohu između vode i betona i nastavio se širiti u betonskom bloku, u trenutku  $t=2693,6 \mu\text{s}$  (us). Također je prikazana skala s vrijednostima naprezanja u različitim bojama, od minimalne vrijednosti naprezanja od  $-1,487 \times 10^{-2}$  MPa, do maksimalne vrijednosti  $3,098 \times 10^{-3}$  MPa. Može se primijetiti kako se tlačni val (crvena boja) i vlačni val (plava boja) radijalno šire iz donjeg desnog ugla betona tj. iz najbliže točke eksplozivnog naboja.

Na slici 6.75 prikazana je vremenska promjena komponenti normalnih naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$ ,  $\bar{\sigma}_{yy}$  i  $\bar{\sigma}_{zz}$  u konačnom elementu površinskog sloja betonskog bloka 46513, na osi x (donji rub). Opis tenzora prikazan je nakon prikaza glavnih i posmičnih naprezanja.



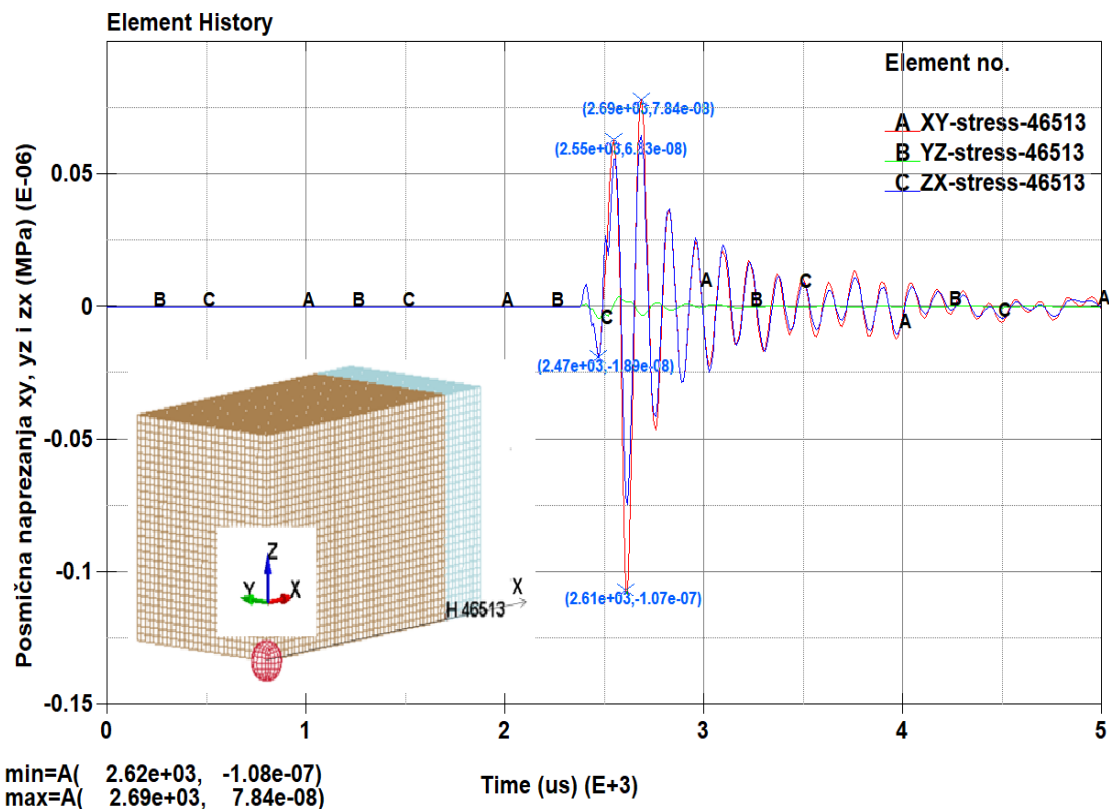
Slika 6.75 Dijagrami vremenske promjene komponenti normalnih naprezanja u elementu betona 46513

Na slici 6.75 je prikazana vremenska promjena normalnih naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$ ,  $\bar{\sigma}_{yy}$  i  $\bar{\sigma}_{zz}$  u konačnom elementu površinskog sloja betonskog bloka 46513, u promatranom vremenu. Na dijagramu se vidi promjena naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$  od negativne vrijednosti prema pozitivnoj pa ponovno iz pozitivne u negativnu, što se ponavlja u vremenu.

Maksimalna vrijednost vlačnog naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$  ( $5,83 \times 10^{-2}$  MPa) se pojavljuje odmah nakon što udarni tlačni val dosegne element ( $t=2530 \mu\text{s}$ ), a maksimalna tlačna naprezanja ( $2,56 \times 10^{-2}$  MPa) odmah nakon toga ( $t=2580 \mu\text{s}$ ). Dijagrami naprezanja  $\bar{\sigma}_{yy}$  i  $\bar{\sigma}_{zz}$  su identični, vrijednosti naprezanja su promjenjive, u početnom vremenu naprezanja su manja od  $\bar{\sigma}_{xx}$ , a u trenutku  $t=4670 \mu\text{s}$  njihova vrijednost postigne maksimalnu vrijednost ( $2,39 \times 10^{-2}$  MPa) i postaju veća od naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$ .

Na slici 6.76 prikazane su vremenske promjene posmičnih (tangencijalnih) komponenti tenzora naprezanja ( $\bar{\sigma}_{xy}$ ,  $\bar{\sigma}_{yz}$  i  $\bar{\sigma}_{zx}$ ) u betonu, u elementu 46513, prvi element betona u kontaktu s vodom, na osi x.





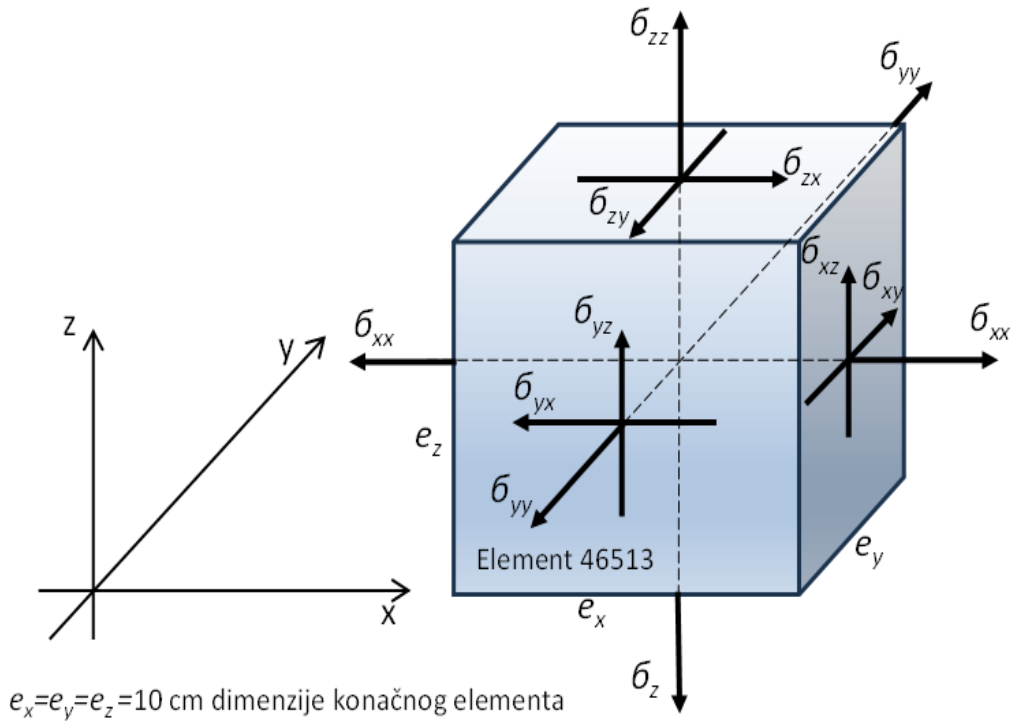
Slika 6.76 Dijagrami vremenske promjene komponenti posmičnih naprezanja u elementu betona 46513

Na slici 6.76 je prikazana vremenska promjena naprezanja  $\bar{\sigma}_{xy}$ ,  $\bar{\sigma}_{yz}$  i  $\bar{\sigma}_{zx}$  u konačnom elementu površinskog sloja betonskog bloka 46513, na osi x (donji rub), u promatranom vremenu.

Na slici se vidi promjena naprezanja  $\bar{\sigma}_{xy}$  (A – crvena linija) i  $\bar{\sigma}_{yz}$  (C – plava linija). Dijagrami naprezanja su slični, samo naprezanje  $\bar{\sigma}_{xy}$  ima neznatno manju vrijednost. Odstupanje je veće, u početku, pri prvim ekstremnim vrijednostima, a poslije se smanjuje.

Dijagrami naprezanja  $\bar{\sigma}_{zx}$  (C – zelena linija) u početku ima značajno manju vrijednost od ostalih posmičnih komponenti naprezanja ( $\bar{\sigma}_{xy}$ , i  $\bar{\sigma}_{yz}$ ), a nakon tog pada na nulu, znatno prije ostalih prikazanih naprezanja.

Grafički prikaz komponenti tenzora naprezanja u elementu 46513 prikazan je na slici 6.77.



Slika 6.77 Tenzor naprezanja u konačnom elementu betona 48513

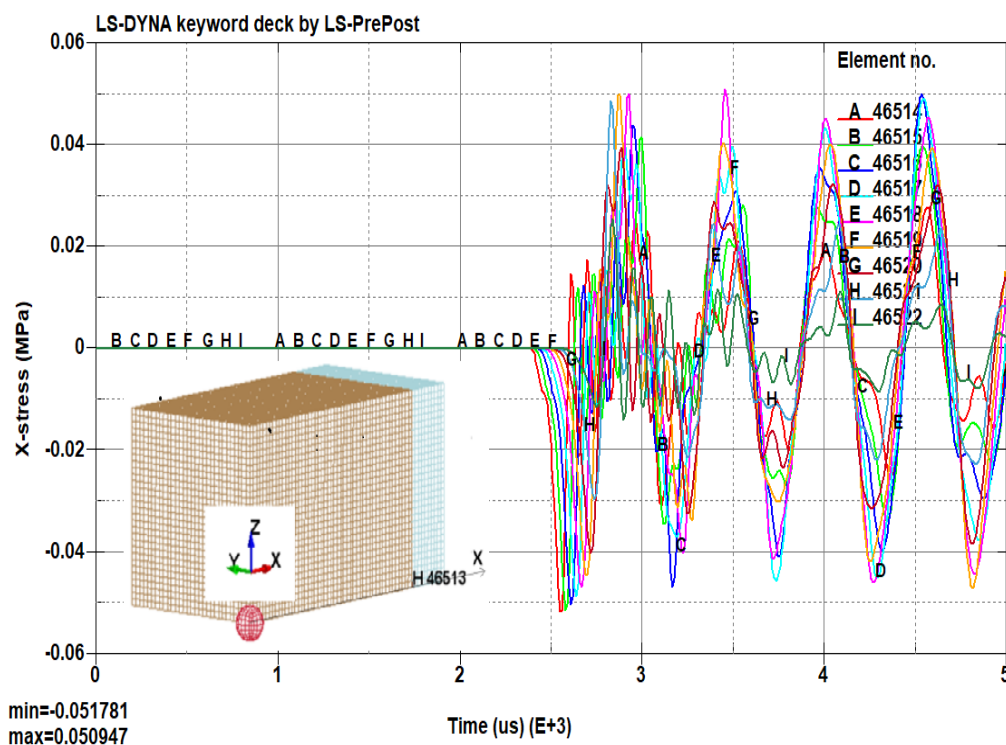
Tenzor naprezanja u matičnom zapisu je:

$$\sigma(x, y, z) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (6.27)$$

Kao što je već spomenuto tenzor naprezanja u nekom konačnom elementu nije konstantan već je ovisan o vremenu, što je vidljivo na slikama 6.75 i 6.76. Tenzor naprezanja u konačnom elementu 48513 u trenutku  $t = 2530 \mu\text{s}$ , gdje normalna komponenta naprezanja  $\sigma_{xx}$  ima maksimalnu vlačnu vrijednost, u MPa je:

$$\sigma(x, y, z) = \begin{bmatrix} -0,0583 & 4,50 \times 10^{-8} & 2,49 \times 10^{-8} \\ 4,50 \times 10^{-8} & -0,00636 & -2,90 \times 10^{-9} \\ 2,49 \times 10^{-8} & -2,90 \times 10^{-9} & -0,00634 \end{bmatrix}, \quad t = 2530 \mu\text{s} \quad (6.28)$$

Na slici 6.78 prikazana je vremenska promjena naprezanja  $\sigma_{xx}$  naprezanja u svim elementima betona na osi x (donji rub).



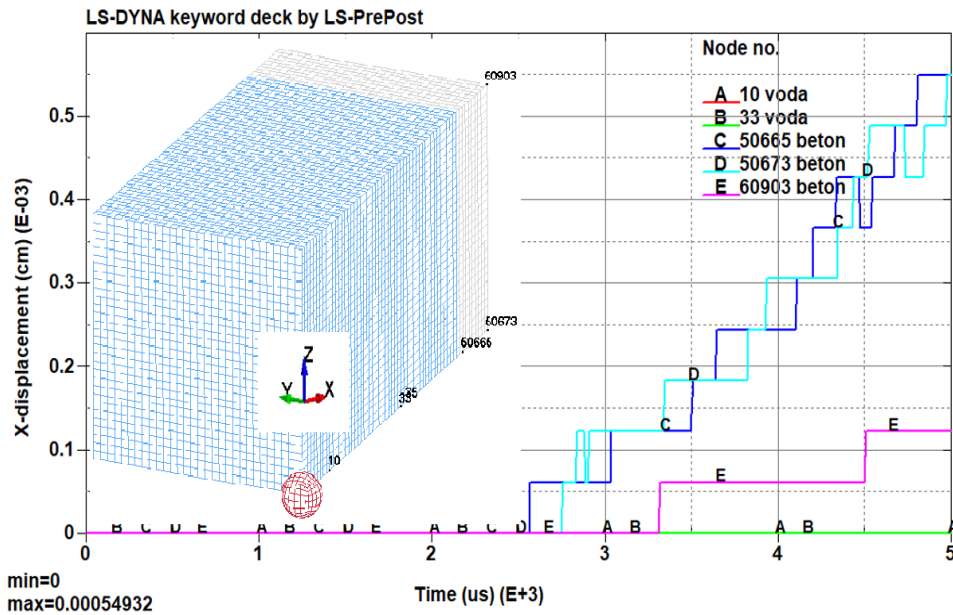
Slika 6.78 Dijagrami vremenske promjene  $\bar{\sigma}_{xx}$  naprezanja u elementima betona

Na slici 6.78 prikazana je promjena  $\bar{\sigma}_{xx}$  naprezanja u konačnim elementima betona, na donjem rubu, na osi x, u promatranom vremenu. Može se primijetiti kako su vrijednosti  $\bar{\sigma}_{xx}$  naprezanja u konačnom elementu betonu značajno manje od vrijednosti tlaka u rubnom elementu vode. Najmanja vrijednost maksimalnog tlaka u vodi je 12,19 MPa, u konačnom elementu 50, vidjeti sliku 6.72 (linija D 50 fsi).

Vrijednosti naprezanja u konačnim elementima betona kreću se od  $-5,17 \times 10^{-2}$  MPa do  $5,09 \times 10^{-2}$  MPa, naprezanje u pojedinim elementima poprima naizmjenično pozitivne i negativne vrijednosti.

Vrijednosti vremenske promjene tlaka u vodi i u betonu nije moguće prikazati na istom dijagramu zbog velike razlike vrijednosti maksimalnih tlakova. Maksimalna vrijednost tlaka u kontaktnom elementu vode je reda  $10^1$ , a vrijednost tlaka u betonu je reda veličine  $10^{-2}$ .

Dijagrami vremenske promjene pomaka čvorova 10 i 33 u vodi te čvorova 50665, 50673 i 60903 u betonskom bloku, prikazani su na slici 6.79.



Slika 6.79 Dijagrami vremenske promjene pomaka čvorova

Na slici 6.79 prikazani su pomaci čvorova u vodi 10 i 33 (A i B) te u čvorovima konačnih elemenata betonskog bloka 50665, 50673 i 60903 (C, D i E), u vremenu od 5000  $\mu\text{s}$ . Čvorovi u vodi (10 i 33) nemaju horizontalni pomak jer čestice vode osciliraju, u smjeru osi x ,oko ravnotežnog položaja. Također treba znati kako se za vodu koristi Eulerov hidrokod za diskretizaciju, koji koristi čvrstu – fiksnu mrežu što omogućava prolaz mase fluida, dok se za beton koristi Lagrangeov hidrokod, gdje mreža nije fiksna i omogućeno je deformiranje mreže s materijalom, što je opisano u 5. poglavlju rada.

Dijagrami pomaka čvorova konačnih elemenata betonskog bloka (50665, 50673 i 60903), u smjeru x, prikazani su na slici. Čvorovi 50665 i 50673 imaju istu vrijednost pomaka, ali se promjene vrijednosti značajno razlikuju u vremenu.

Na horizontalnoj plohi,  $z=0$  m, duž osi x, omogućen je horizontalni pomak čvorova konačnih elemenata betonske kocke. Na horizontalnoj plohi,  $z=3$  m, omogućen je horizontalni i vertikalni pomak. Istraživanje pomaka u čvorovima konačnih elemenata betona u dužem vremenu od 30000  $\mu\text{s}$  pokazuje promjenu pomaka, nakon pozitivnog područja u negativno područje, a zatim povratak u pozitivno područje s konačnom vrijednošću, u promatranom vremenu, manjom od prethodnih ekstremnih vrijednosti.

Ova činjenica svakako zaslužuje posebnu pažnju i nastavak istraživanja, što prelazi okvire ovog rada.

Početni pomak u čvoru 50665 počinje ranije nego u čvoru 50673 jer je bliže središtu eksplozije. Pomak čvora 60903 je najmanji pa se porast vrijednosti pomaka odvija u samo dva skoka, što je puno manje nego kod čvorova 50665 i 50673.

Temeljem istraživanja utjecaja konstrukcije na širenja udarnog vala može se zaključiti sljedeće

Udarni val se longitudinalno širi kroz vodu i dolazi do kontaktne plohe voda – betonski blok. Dio izravnog upadnog udarnog vala se reflektira od betonskog bloka, a dio prolazi. Udarni val se u betonskom bloku širi kao longitudinalni i transverzalni val, Lazarević [34].

Nakon prelaza kontaktne plohe udarni val se širi i komponente tenzora naprezanja poprimaju pozitivne i negativne vrijednosti. Normalno naprezanje  $\bar{\sigma}_{xx}$  je veće od naprezanja u smjeru  $\bar{\sigma}_{yy}$  i  $\bar{\sigma}_{zz}$ , koja su identična. Naprezanja u betonu su značajno manja od tlaka u vodi. Uslijed djelovanja udarnog vala utvrđeni su pomaci čvorova betona.

U ovom radu su provedena inicijalna istraživanja, stoga se nameće potreba daljnjih opsežnih i temeljitih istraživanja ove vrlo kompleksne fizikalne pojave kao i verifikacija dobivenih numeričkih rezultata pomoću rezultata dobivenih eksperimentalnim istraživanjima.

#### 6.8.4 Utjecaj mehaničkih karakteristika konstrukcije na numeričke rezultate

U drugoj fazi istraživanja istražen je utjecaj mehaničkih karakteristika konstrukcije na tlak u vodi i naprezanja u konstrukciji. Istraživanje je provedeno na dva modela podvodne eksplozije u interakciji s konstrukcijom. Istražen je utjecaj mehaničkih karakteristika betona na vrijednost maksimalnog tlaka na fronti udarnog vala u vodi, gdje je konstrukcija podvodne eksploziji na prvom modelu beton tlačnog razreda C 12/15, drugom modelu beton tlačnog razreda C 50/60.

Kod modeliranja geometrijski elementi, svojstva materijala i diskretizacija vode i eksploziva te ostale pretpostavke su identične kao kod prethodnog primjera. Model betona je dimenzija 1x3x3 m, dimenzije konačnih elemenata su kao kod vode 10x10x10 cm. U modelu usvojene sljedeće mehaničke karakteristike betona:

### **Beton C 12/15**

MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC\_(TITLE) (003);

Gustoća  $\rho=2,4$  g/cm<sup>3</sup>, RO=2,4;

Modul elastičnosti  $E=27000$  MPa;

Poissonov koeficijent, PR=0,18 i

Granica popuštanja 20 MPa, SIGY=2,0 x10<sup>-4</sup>.

### **Beton C 50/60**

MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC\_(TITLE) (003)

Gustoća  $\rho=2,4$  g/cm<sup>3</sup>, RO=2,4;

Modul elastičnosti  $E=37000$  MPa;

Poissonov koeficijent PR=0,18 i

Granica popuštanja 58 MPa, SIGY=5,8 x10<sup>-4</sup>.

Mjerne jedinice za unos podataka u računalni program LS Dyna su:

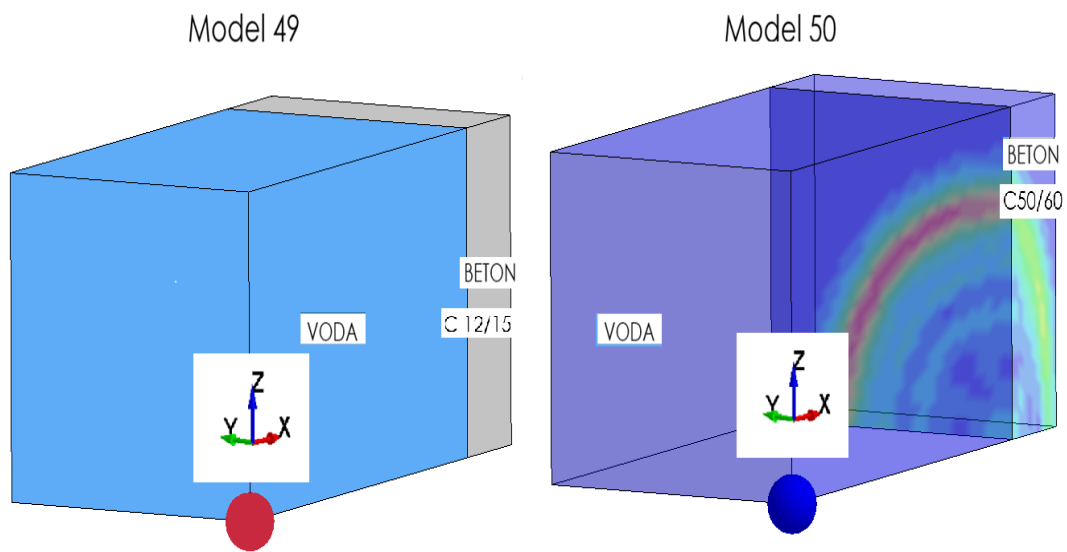
cm, g i  $\mu$ s (mikro sekunda (us)), Mbar (1 Mbar 1x10<sup>5</sup>= MPa).

Veličina konačnih elemenata vode i betona je 10x10x10 cm, a gustoća diskretizacije eksplozivnog naboja je 6.

Druga grupa numeričkih modela interakcije fluida i betona je:

- Model 49 - Volumen vode: kvadar 5x3x3 m, beton C 12/15, debljine 1 m, konačni elementi vode i betona 10x10x10 cm, 54000 elemenata i
- Model 50 - Volumen vode: kvadar 5x3x3 m, beton C 50/60, debljine 1 m, konačni elementi vode i betona 10x10x10 cm, 54000 elemenata.

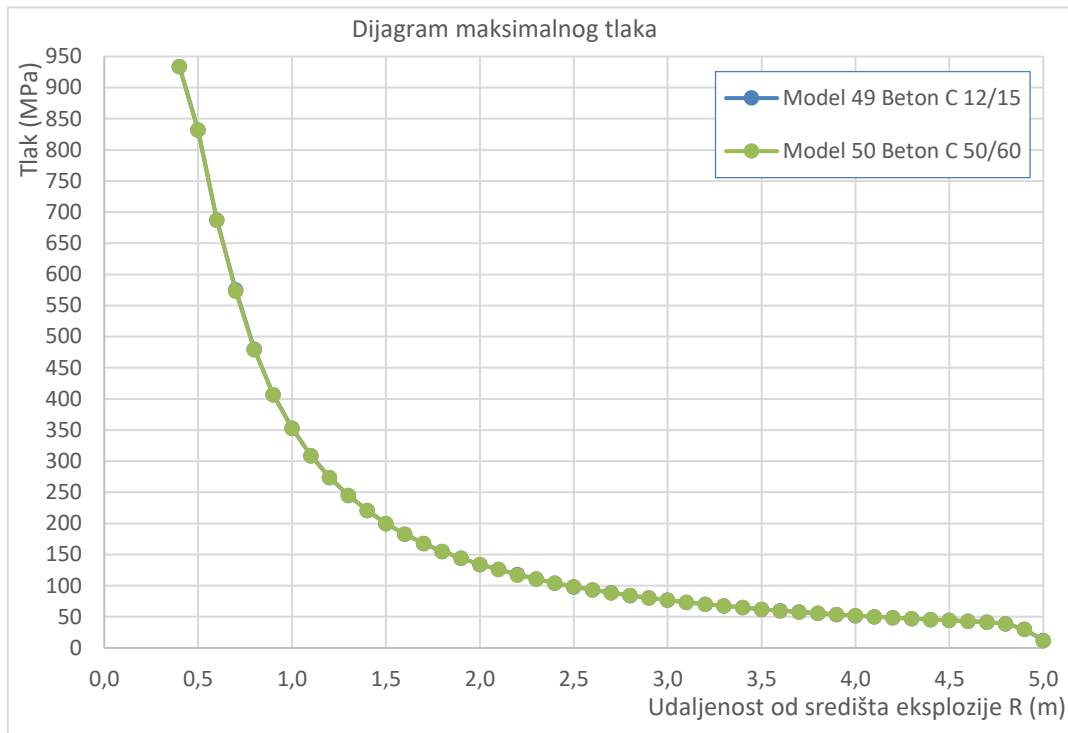
Razvijeni modeli interakcije fluida i konstrukcije su prikazani na slici 6.80.



Slika 6.80 Modeli podvodne eksplozije u interakciji s konstrukcijom

Nakon provedenog numeričkog proračuna modela u računalnom programu LS Dyna preuzeti su određeni podaci za potrebe istraživanja (dijagrami tlak – vrijeme u konačnim elementima, maksimalne vrijednosti tlaka, dijagrami naprezanje - vrijeme u konačnim elementima i dijagrami pomak – vrijeme čvorova). Prvo će se istražiti utjecaj krutosti betonskog bloka na promjene tlaka u vodi.

Na slici 6.81 prikazani su dijagrami maksimalnog tlaka na frontu udarnog vala za promatrane modele 49 i 50, podvodne eksplozije u interakciji s konstrukcijom.



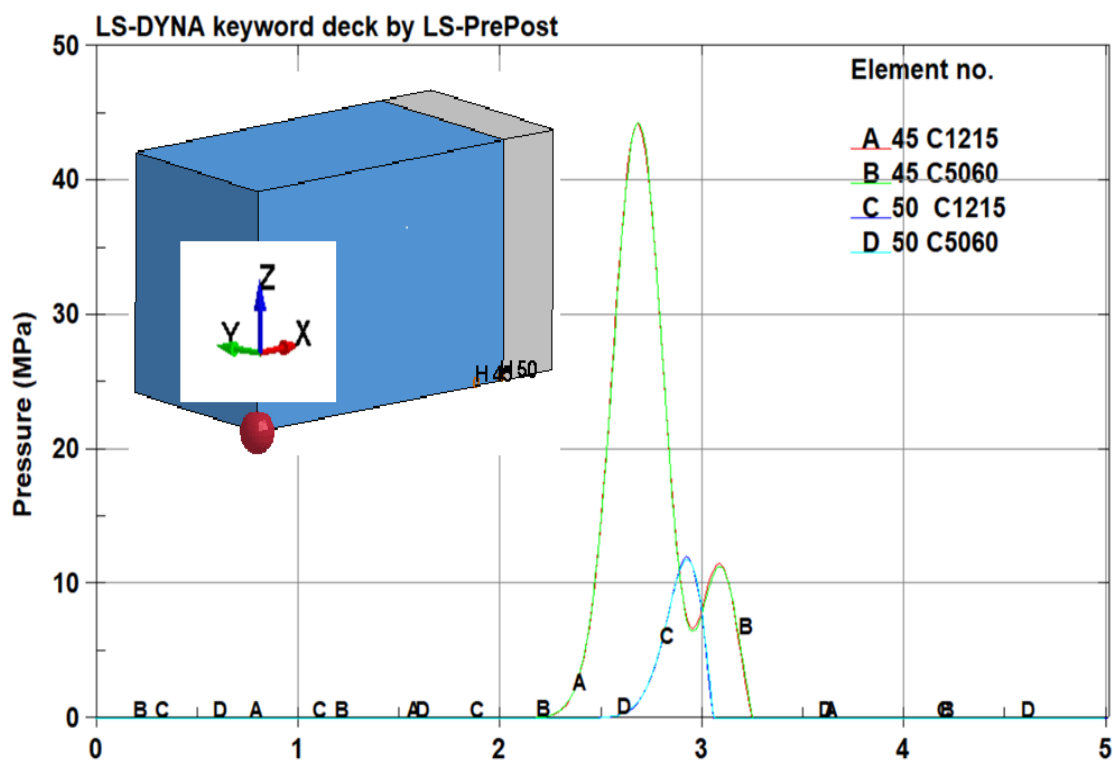
Slika 6.81 Dijagrami promjene tlaka za interakciju fluida s konstrukcijama

Na slici 6.81 prikazani su dijagrami maksimalnog tlaka podvodne eksplozije u interakciji s konstrukcijom. Pregledom dijagrama, vidljivo je kako se maksimalni tlakovi na fronti udarnog vala u potpunosti slažu za betone različitih razreda čvrstoće (C12/15 i C50/60). Međutim proračunom relativnog odstupanja numeričkih rezultata utvrđeno je maksimalno relativno odstupanje od 1,67 %, dok je relativno odstupanje impedancije oko 10 %.

Nadalje, promotrimo dijagrame vremenske promjene tlaka, u elementima na određenoj udaljenosti od središta eksplozije, za podvodnu eksploziju u interakciji s konstrukcijom različitih mehaničkih karakteristika.

Na slici 6.82 su prikazani dijagrami vremenske promjene tlaka u elementima 45 i 50 za model 49 i za model 50.





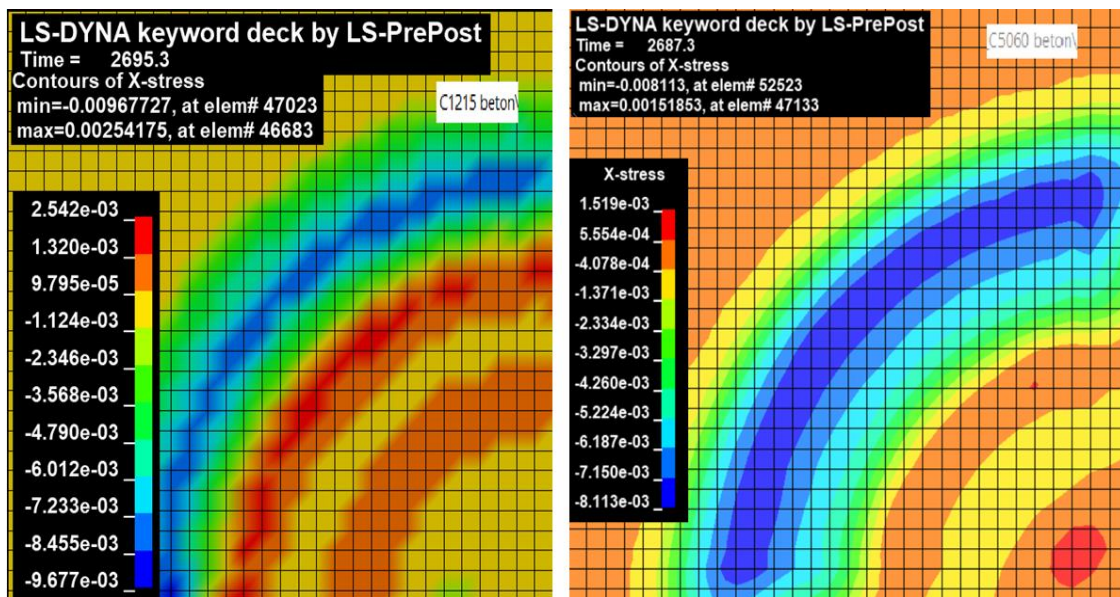
Slika 6.82 Dijagrami vremenske promjene tlaka u elementima vode

Na slici 6.82 se vidi kako se dijagrami tlaka u elementu 45 za model 49 (A - C12/15 - crvena linija) i model 50 (B - C50/60 - zelena linija) i u elementu 50 za model 49 (C - C12/15 - plava linija) i model 50 (D - C50/60 - roza linija) u potpunosti podudaraju iako je razlika u krutostima.

Na slici nisu vidljiva odstupanja dijagrama zbog razlike u refleksiji udarnog vala zbog betona različitih čvrstoća.

Vidimo također kako se dio udarnog vala reflektira od konstrukcije, reflektirani val umanjuje vrijednost tlaka izravnog udarnog vala pa njegova vrijednost brzo pada na vrijednosti blizu nule. Dio energije udarnog vala prelazi kontaktnu plohu između tekućine i konstrukcije. Udarni val koji prođe kroz kontaktnu plohu nastavlja širenje u konstrukciji također po valnoj teoriji.

Na slici 6.83 prikazana je raspodjela tlaka na konačnim elementima površinskog sloja betonskog bloka u približno jednakom vremenu, u trenutku  $t=2695,3 \mu\text{s}$  i  $t=2687,3 \mu\text{s}$ .



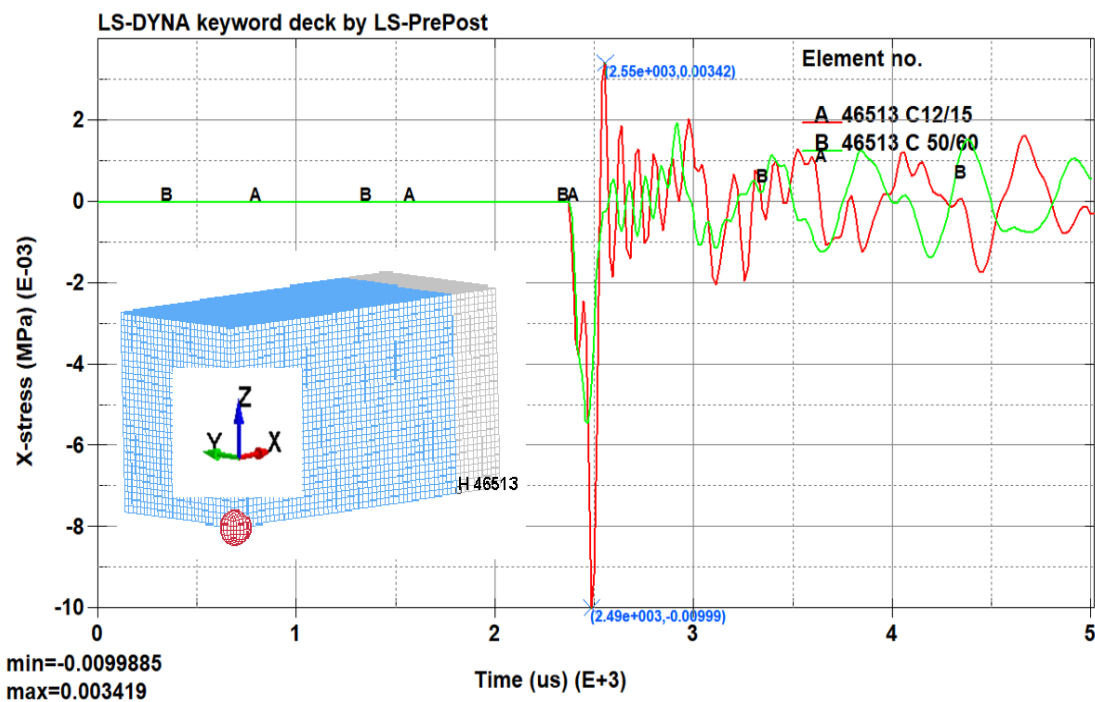
Slika 6.83 Raspodjela naprezanja i širenje udarnog vala u različitim betonima

Na slici 6.83 prikazana je raspodjela naprezanja  $\sigma_{xx}$  u betonu C 12/15 (lijevo) i betonu C 50/60 (desno), od širenja dijela udarnog vala podvodne eksplozije, koji je prošao kroz vodu i prešao graničnu plohu između vode i betona i nastavio se širiti u krutom tijelu - betonu, u trenutku  $t=2695,3 \mu\text{s}$  i  $t=2687,3 \mu\text{s}$ .

Također je prikazana skala s vrijednostima naprezanja u različitim bojama, od minimalne vrijednosti naprezanja od  $-9.677 \times 10^{-3}$  MPa do maksimalne vrijednosti  $2,542 \times 10^{-3}$  MPa, u betonu C 12/15 i minimalne vrijednosti naprezanja od  $-8,113 \times 10^{-3}$  MPa do maksimalne vrijednosti  $1,519 \times 10^{-3}$  MPa, u betonu C 50/60. Tako možemo primijetiti kako se tlačni val (crvena boja) i vlačni valovi (plava boja) radijalno šire iz donjeg desnog ugla betonskog bloka tj. iz najbliže točke eksplozivnom naboju.

Na slici se vide fazni pomaci i razlike u valnim dužinama širenja udarnih valova zbog različitih mehaničkih karakteristika betona. Veće tlačno i vlačno naprežanje se pojavljuje kod betona niže razreda čvrstoće C 12/15 vjerojatno zbog manje impedancije koja omogućava veći prolaz, manju refleksiju, udarnog vala.

Na slici 6.84 prikazana je vremenska promjena naprezanja  $\sigma_{xx}$ , u konačnom elementu površinskog sloja betonskog bloka 46513, za model 49 i za model 50, na osi x (donji rub).



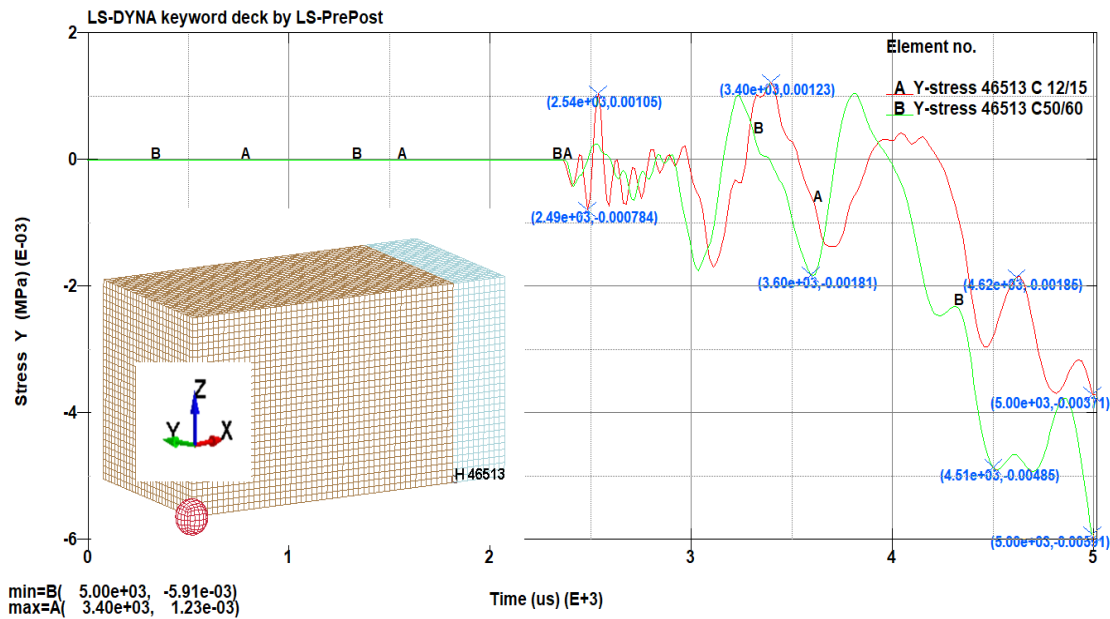
Slika 6.84 Vremenska promjena naprezanja u elementu 46513

Na slici 6.84 je prikazana vremenska promjena naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$ , u konačnom elementu površinskog sloja betonskog bloka 46513, na osi x (donjem rubu), za beton C 12/15 i beton C 50/60, u promatranom vremenu. Na dijagramu se vide različite vrijednosti i promjene naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$  od prve negativne vrijednosti prema pozitivnoj pa iz pozitivne u negativnu što se ponavlja u vremenu.

Maksimalno vlačno naprezanje ( $9,99 \times 10^{-3}$  MPa) se pojavljuje u modelu 49 (C 12/15), odmah nakon što udarni val dosegne element u vremenu ( $t=2490 \mu s$ ). Maksimalno tlačno naprezanje ( $3,42 \times 10^{-3}$  MPa) pojavljuju se u modelu 49 (A), u vremenu ( $t=2550 \mu s$ ), beton C 12/15. Vrijednosti naprezanja za beton C 50/60 su u početnom dijelu dijagrama značajno manje, a nakon toga se razlika smanjuje.

Ovdje se potvrđuje prethodno spomenuta pretpostavka kako beton veće krutosti odnosno impedancije (C 50/60) propušta manju vrijednost udarnog vala od betona manje krutosti odnosno impedancije (C 12/15).

Na slici 6.85 prikazana je vremenska promjena naprezanja  $\bar{\sigma}_{yy}$  u konačnom elementu površinskog sloja betonskog bloka 46513, na osi x (donji rub).



Slika 6.85 Vremenska promjena naprezanja u elementu betona 46513

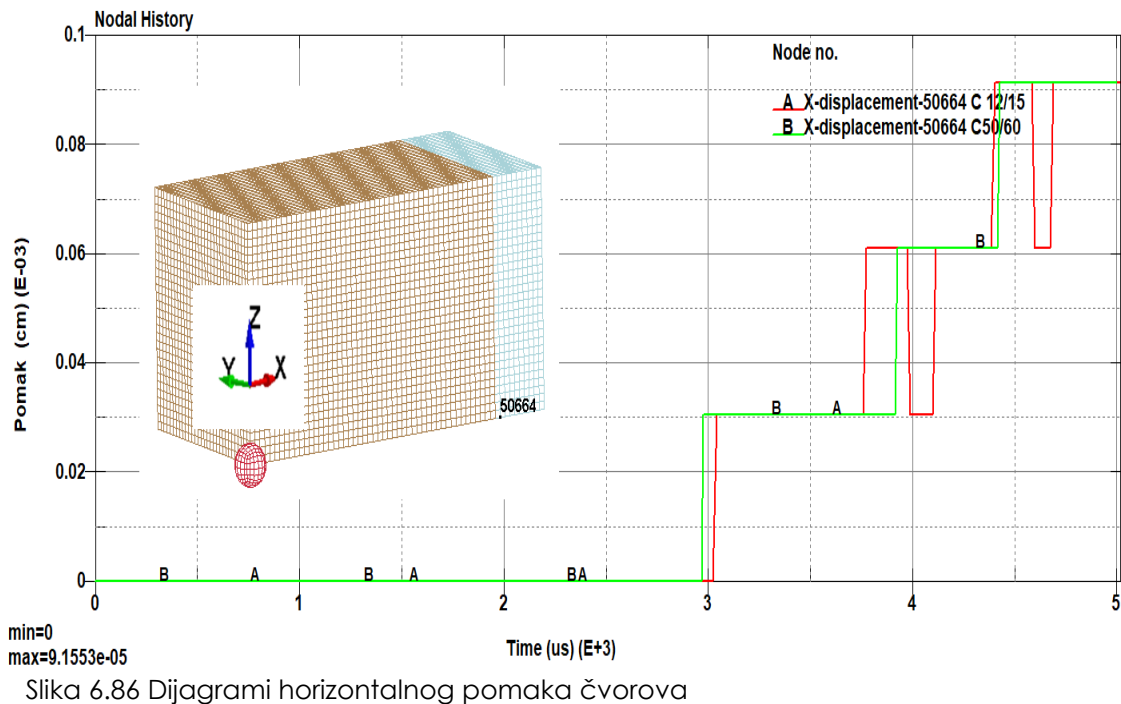
Na slici 6.85 je prikazana vremenska promjena naprezanja  $\bar{\sigma}_{yy}$  u konačnom elementu površinskog sloja betonskog bloka 46513, za beton C 12/15 i beton C 50/60, u promatranom vremenu. Na dijagramu se vidi promjena naprezanja od manje negativne vrijednosti prema pozitivnoj pa ponovno iz pozitivne u negativnu, što se ponavlja u vremenu s naglašenim povećanjem vrijednosti.

Naročito povećanje negativne vrijednosti je nakon  $t = 4000 \mu s$ , za oba modela, a posebno je naglašeno povećanje kod modela 50.

Dijagrami naprezanja  $\bar{\sigma}_{zz}$  su slični dijagramima naprezanja  $\bar{\sigma}_{yy}$ , za modele 49 i 50, pa nisu prikazani. Maksimalna tlačna vrijednost naprezanja  $\bar{\sigma}_{yy}$  ( $1,23 \times 10^{-3}$  MPa) se pojavljuje u samom završetku promatranog vremena ( $t = 3400 \mu s$ ) na modelu 49 (C 12/15), a maksimalno vlačno naprezanje ( $5,91 \times 10^{-3}$  MPa) pojavljuje se na samom kraju vremena ( $t = 5000 \mu s$ ).

U početnom dijelu dijagrama, naprezanja su veća kod modela 49, kasnije su izjednačena za oba modela, a pri kraju promatranog vremena naprezanja su kod modela 50 veća nego na modelu 49.

Na slici 6.86 prikazani su dijagrami vremenske promjene horizontalnog pomaka, u smjeru osi x, čvorova 50663 (čvor na osi x na konačnom elementu) u betonu C 12/15 i betonu C 50/60.



Slika 6.86 Dijagrami horizontalnog pomaka čvorova

Na slici 6.86 se vidi vrijednost i razlika u prirastu pomaka čvorova, u smjeru osi x, u promatranom vremenu. Porast pomaka u vremenu nije funkcija koja monotono raste. Porast pomaka odvija se u skokovima (inkrementima), koji su približno jednake vrijednosti.

Pomak betona C 12/15 za prvi inkrement, zatim pomak za drugi inkrement pa reverzibilni pomak tj. povratak na prvi inkrement, zatim povratak na kraj drugog inkrementa, nakon toga pomak za treći inkrement pa reverzibilni pomak tj. povratak na drugi inkrement, a zatim povratak na treći inkrement.

Pomak za beton C 50/60 ima tri inkrementa pomaka, bez reverzibilnih pomaka. Prema mišljenju autora, ukupni pomak čvorova je jednak, ali je utrošena energija deformacije mnogo veća za beton C 12/15 nego za beton C 50/56 jer je ukupno prevaljeni put čvora duži (3 vertikalna inkrementa : 7 vertikalnih inkrementa), slika 6.85. Temeljem provedenih istraživanja djelovanja podvodne eksplozije na konstrukciju uočeno je kako se longitudinalni udarni val dijelom reflektira od konstrukcije, a dijelom prolazi kroz konstrukciju. Kod konstrukcije veće krutosti prolazni dio energija je manji nego kod konstrukcije manje krutosti. U konstrukciji se pored longitudinalnih pojavljuju i transverzalni valovi.

Dobiveni numerički rezultati su u skladu s teorijskim postavkama obrađenim u prethodnom dijelu rada. Vrijednosti naprezanja u betonu nisu uspoređena s eksperimentalnim podacima jer isti nisu dostupni za ovakav model. Stoga se predlaže dodatno istraživanje numeričkih modela i eksperimentalna provjera dobivenih numeričkih rezultata. Rezultati istraživanja i zaključak potvrđuju 2. hipotezu.

U istraživanjima podvodne eksplozije u neograničenoj sredini, sredini ograničenoj slobodnom površinom vode, sredini ograničene dnom i sredini ograničene slobodnom površinom vode i dna te djelovanje podvodne eksplozije na konstrukciju provedeno je korištenjem određenih parametara iz raspoložive literature. Svakako je potrebno naglasiti kako postoji mogućnost korištenja različitih parametara, predloženih od raznih autora, kao i složenijih modela, vidjeti tablice 6.3, 6.4, 6.5 i 6.6.

U ovom poglavlju su pri provedbi istraživanju ponovljene neke osnovne postavke i empirijski izrazi poradi kvalitetnijeg pregleda istraživanja i korištenja materijala pri daljnjim istraživanjima pojedinih djelovanja podvodne eksplozije.

Temeljem provedenih istraživanja za potrebe određivanja djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine, pri praktičnim inženjerskim proračunima zaključeno je sljedeće:

- Zanemariti djelovanje hidrostatičkog tlaka jer je njegov maksimalni postotak, u istraživanju, na dubini od 20 m i na udaljenosti 10 m od središta eksplozije, iznosi 0,677 %. Vrijednost tlaka, za TNT, masu eksplozivnog naboja 136,08 kg, oblika kugle, na frontu udarnog vala je 24,72 MPa, a hidrostatički tlak je 0,353 MPa, vidjeti sliku 6.2 i tablicu 6.2.
- Odrediti količinu eksplozivnog punjenja i njegov položaj u odnosu na građevinu s obzirom na mogućnosti transporta (transport kopnom ili transport vodenim putem), transport do odabrane pozicije i sidrenje eksplozivnog punjenja (transport (čamac, splav, padobran itd.)), uzeti u obzir tehničku i fizičku zaštitu građevine, ako ista postoji.
- S obzirom na potencijalne položaje eksplozivnog punjenja, u odnosu na podvodnu građevinu i dubinu vode, odrediti dio konstrukcije najmanje otpornosti i najnepovoljniji položaj eksplozivnog punjenja, koji omogućava

maksimalnu vrijednost tlaka od izravnog i reflektiranih udarnih valova (površina i dno), bliže površini, koji djeluje na građevinu.

- Korištenje reduciranih modela primjenom simetrije i redukcije volumena kocke na volumen kvadra.
- Dimenzije presjeka kvadra (volumena vode) uskladiti sa zadanom udaljenosti od središta eksplozije do podvodne građevine. Za udaljenosti do 5 m - 2x2x5 m, za udaljenosti do 10 m - 3x3x10 m, za udaljenosti do 15 m - 4x4x15 m i za udaljenosti do 20 m - 5x5x20 m.
- Odabrati model betona sukladno zahtjevima točnosti proračuna i raspoloživosti kapaciteta računala. Složeniji modeli betona pripremljeni za analizu ponašanja betona izloženog djelovanju udarnog opterećenja dat će točnije rezultate, ali zahtijevaju više memorijskih kapaciteta računala.
- Dobivene rezultate usporediti s rezultatima eksperimenta, ako postoje, ili rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza.

Prilikom pripreme projekta konstrukcije obalnih i hidrotehničkih građevina te infrastrukture, potrebno je provesti proračun i dokaz mehaničke otpornosti i stabilnosti na djelovanje podvodne eksplozije.

## 6.9 Numeričko modeliranje podvodne eksplozije u mirnoj vodi kao plošno opterećenje na armiranobetonsku gravitacijsku branu

### 6.9.1 Osnovne pretpostavke i modeliranje podvodne eksplozije u mirnoj vodi kao plošno opterećenje na gravitacijsku branu

U prethodnim istraživanjima, istraženo je djelovanje podvodne eksplozije u neograničenoj sredini, djelovanje podvodne eksplozije koja je ograničena slobodnom površinom vode i/ili dnom te interakcija podvodne eksplozije i konstrukcije.

Djelovanje podvodne eksplozije općenito na podvodne građevine odnosno interakcija fluida i konstrukcije (engl. *Fluid Structure Interaction (FSI - fsi)*), opisano u prethodnom dijelu. Konstrukcija je simulirana kao betonski blok s površinom, u kontaktu s vodom, 6x6 m, koristeći simetriju u modelu, ploča je reducirana na dimenzije 3x3 m.

U ovom dijelu rada bit će integrirana sva prethodna spomenuta djelovanja podvodne eksplozije – globalni model. Kao što je već spomenuto podvodna eksplozija može djelovati na pomorske i riječne građevine te infrastrukturu kao i na hidrotehničke građevine. U ovom dijelu rada bit će opisano djelovanje podvodne eksplozije u mirnoj vodi na gravitacijsku betonsku branu, koja spada u skupinu hidrotehničkih građevina. Djelovanje hidrostatičkog tlaka, uzgona i dr. kao dokaz stabilnost brane na klizanje i prevrtanje neće biti analizirana u ovom radu. U ovom radu će biti analizirano udarno plošno opterećenje podvodne eksplozije na uzvodno lice brane.

U modelu udarnog plošnog opterećenja podvodne eksplozije na betonsku gravitacijsku branu uzete su sljedeće pretpostavke:

- Podvodna eksplozija se odvija u mirnoj slatkoj vodi stajaćici, bez valova i strujanja. Gustoća vode je  $1000 \text{ kg/m}^3$ , a brzina zvuka u vodi je  $1480 \text{ m/s}$ .
- Podvodna eksplozija se odvija u ograničenoj sredini, a ograničenje je slobodna površina vode i dno.
- Pretpostavlja se homogenost i izotropnost eksploziva, vode i betona, te voda je ujednačene temperature i bez mjehurića zraka.
- Armatura u betonskom zidu nije uključena u model betona. Brana se armira konstruktivno minimalnom armaturom.



- Zanemaren je hidrostatički tlak.
- Pretpostavlja se kako su osigurani preduvjeti za istovremenu detonaciju eksplozivnog punjenja, koje je oblika kugle.
- Koristi se jedan odsječak betonske brane, širine 3 m, na najvećoj dubini.
- Središte kugle eksplozivnog naboja je u ishodištu koordinatnog sustava.

Udarni val od podvodne eksplozije se ponaša kao akustični val i uglavnom se, osim u početnom trenutku, širi brzinom širenja zvuka u vodi. Zvučni val je tlačni val, a veličina tlaka ovisi o izvoru zvuka i udaljenosti od izvora. Zvučni val u vodi se reflektira i uslijed promjene temperature vode u pojedinim slojevima vode. Kao posljedica ove pojave može doći do savijanja zvučnih zraka i nastajanja zvučne sjene u nekom dijelu volumena vode. Položaj zvučne sjene ovisi o raspodjeli promjene temperature u prostoru vode. U prostor zvučne sjene zbog savijanja zvučne zrake ne dolazi zvuk, koji se iz izvora širi u prostoru vode [72].

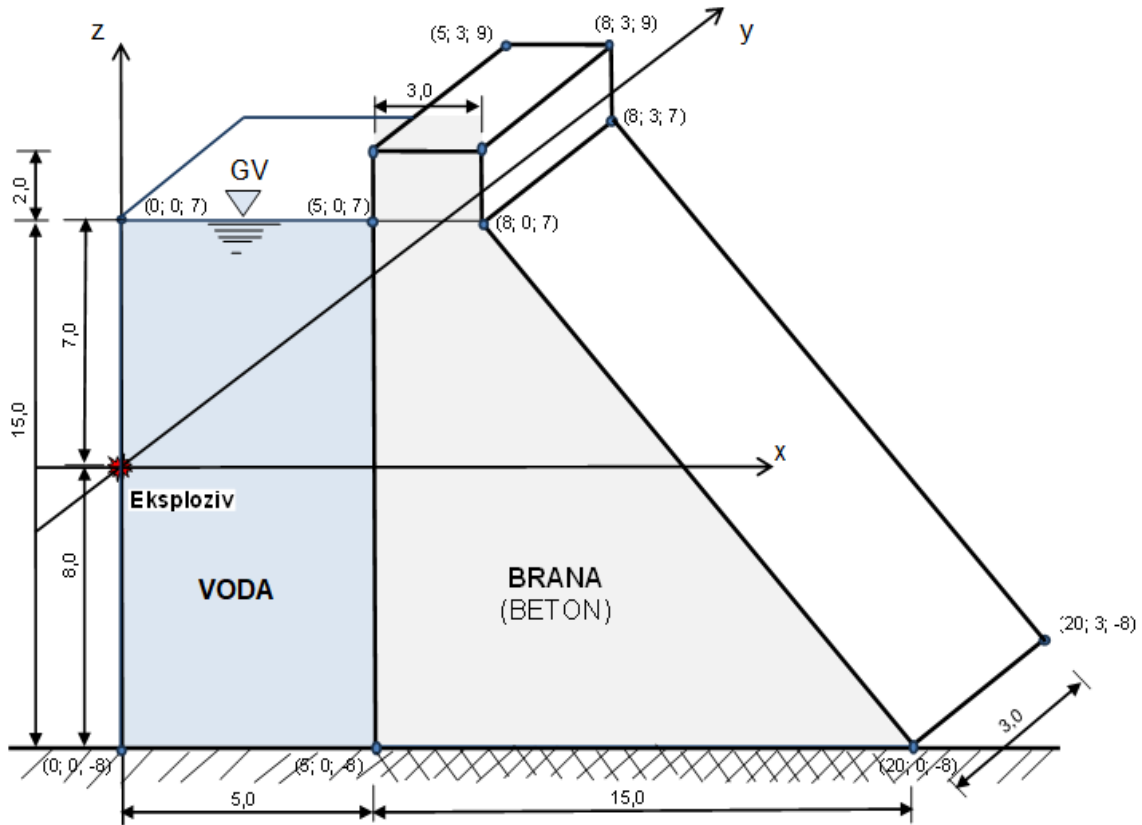
Ova teorija se može primijeniti i na građevine, uslijed promjenjivosti temperature djelovanje podvodne eksplozije može biti dijelom ograničeno na nekim dijelovima građevine ovisno o raspodjeli temperatura u prostoru i maksimalnoj promjeni tj. gradijentu. Utjecaj promjene temperature je veći kod građevina kod kojih je veći vodeni stupac odnosno dubina. Svakako bi refrakcija udarnog vala uslijed promjene temperature utjecala na eksperimentalne rezultate, što je potrebno posebno istražiti.

Za potrebe proračuna pretpostavlja se kako je brana temeljena na čvrstom stjenovitom tlu i stjenovito tlo se nalazi ispred uzvodnog lica brane u pojasu djelovanja udarnog vala eksplozije. Na uzvodnoj strani brane tj. u akumulaciji maksimalna gornja voda (GV) je 15 m, iznad kote dna u akumulaciji. Brana je široka 15 m u temelju, a 3 m u kruni, visina tijela brane je 15 m i visina krune brane je 2 m, vidjeti sliku 6.86. Dužina brane u temelju i kruni je dovoljno velika i ne utječe na numeričko modeliranje.

Za klasični proračun stabilnosti brane mjerodavan je presjek najveće visine i uzima se dužina proračunskog modela 1 m, kao i kod svih linijskih konstrukcija. Za potrebe modeliranja dužina je veća zbog osiguranja točnosti i numeričke stabilnosti, a koristi se vertikalna ravnina simetrije pa je model reduciran na  $\frac{1}{2}$  od promatranog područja.

Na slici 6.87 prikazan je poprečni presjek brane.

## PRESJEK GRAVITACIJSKE BETONSKE BRANE



Slika 6.87 Presjek betonske gravitacijske brane

Postavlja se pretpostavka: Računalni program LS Dyna ima sposobnost rješavanja zadaje djelovanja podvodne eksplozije na gravitacijsku betonsku branu, uz ograničenja slobodnom površinom vode i dnom.

Istraživanja usporednog modela eksplozije u neograničenoj sredini nisu potrebna jer su istraživanja provedena u analizi interakcije podvodne eksplozije i konstrukcije.

Za provjeru pretpostavke, u istraživanju, razvijen je numerički model podvodne eksplozije u interakciji s betonskom branom, u ograničenoj sredini, te je provedena numerička simulacije u računalnom programu LS Dyna, u cilju istraživanja djelovanja podvodne eksplozije na branu.

Model se sastoji od prostora vode, eksplozivnog naboja i brane, uz istovremeno ograničenje slobodnom površinom vode i dnom.

Modeliranje je provedeno uz prethodne pretpostavke (simetrija, slobodna propusnost nekih graničnih ploha, iznad površine vode nije modeliran sloj zraka, nepropusna granična ploha na dnu, čvrsta povezanost brane i dna i sl.), uz sve već navedene parametre i svojstva vode i eksploziva.

U ovom istraživanju, kao i u prethodnom istraživanju, bit će korišten jednostavan model betona jer je težište na istraživanju interakcije, a manje na analizi ponašanja betona zbog ograničenosti računalnih kapaciteta. U modelu su usvojene sljedeće mehaničke karakteristike betona:

### **Beton C 30/37**

MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC\_(TITLE) (003)

Gustoća  $\rho=2,4 \text{ g/cm}^3$ , RO=2,4;

Modul elastičnosti  $E=32000 \text{ MPa}$ ;

Poissonov koeficijent  $\nu=0,18$  i

Granica popuštanja  $32 \text{ MPa}$  SIGY= $3,2 \times 10^{-4}$ .

Mjerne jedinice za unos podataka u računalni program LS Dyna su:

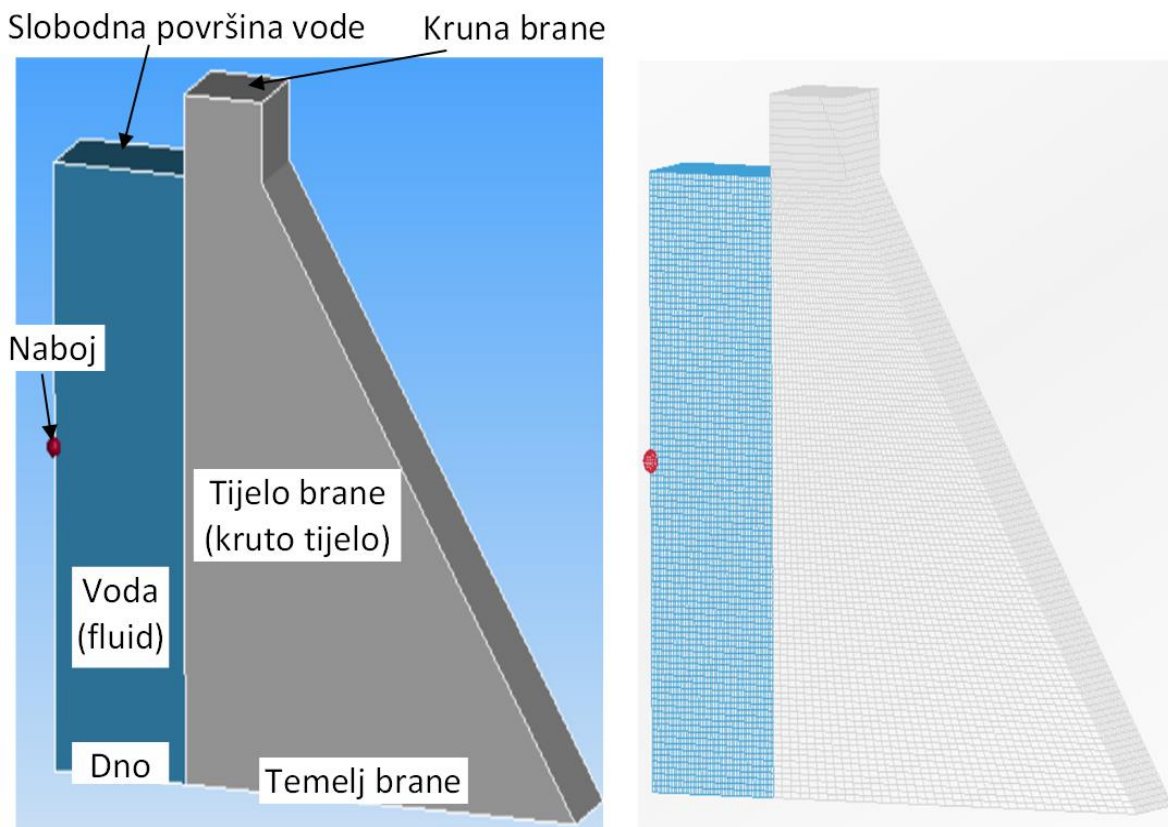
cm, g,  $\mu\text{s}$  (mikro sekunda (us)).

Kod modeliranja geometrijski elementi, svojstva materijala i diskretizacija vode i eksploziva su slični kao kod prethodnog primjera, uz neke modifikacije zbog prilagodbe kapacitetima računala. Volumen vode je oblika kvadra dimenzija  $5 \times 3 \times 15 \text{ m}$ , a betonska gravitacijska brana je dimenzija  $(15-3) \times 3 \times 15 + 3 \times 3 \times 2 \text{ m}$ . Eksploziv je TNT, mase  $W=136,08 \text{ kg}$ , radijus eksplozivnog naboja u obliku kugle  $R_{ep}=27,11 \text{ cm}$ .

Veličina konačnih elemenata vode je  $10 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ , a betona u tijelu brane  $(37,5-7,5) \times 15 \times 15 \text{ cm}$ , u kruni brane  $7,5 \times 15 \times 20 \text{ cm}$ . Gustoća diskretizacije eksplozivnog punjenja je 6. Vrijeme trajanja simulacije je  $20000 \mu\text{s}$ .

Veličine konačnih elemenata su usklađene s geometrijskim elementima brane (promjena širine) i graničnim kapacitetima računala.

Na slici 6.88 prikazan je model udarnog opterećenja podvodne eksplozije na gravitacijsku branu. Model se sastoji od eksplozivnog punjenja, vode i gravitacijske betonske brane, na slici desno prikazan je diskretizirani model.



Slika 6.88 Model udarnog djelovanja podvodne eksplozije na branu

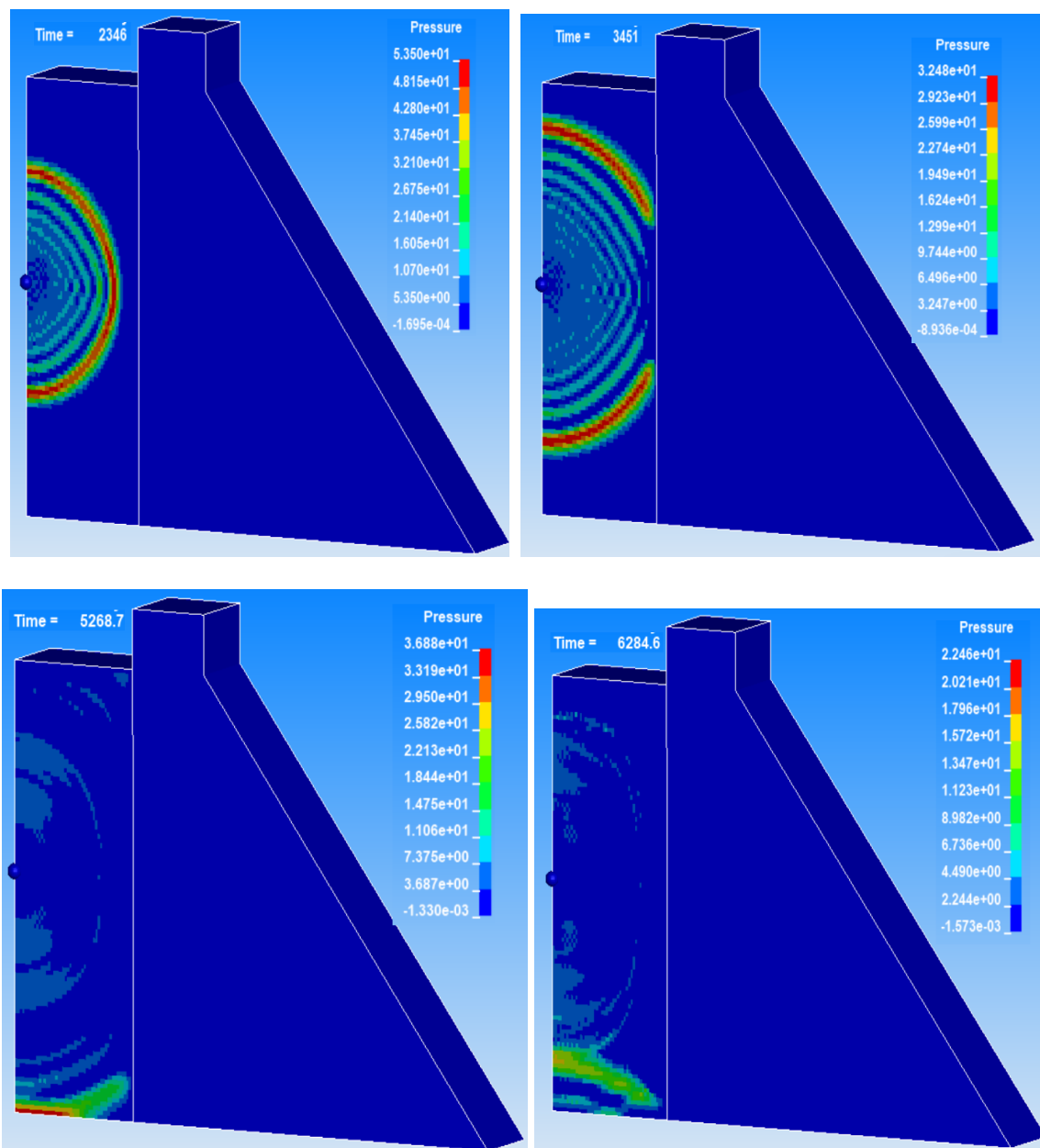
### 6.9.2 Numerički rezultati

Nakon provedenog modeliranja i proračuna numeričkog modela u računalnom programu, odabrani su i analizirani dobiveni rezultati numeričkog postupka u cilju potvrde ispravnosti numeričkog modela, modeliranja i sposobnost računalnog programa u rješavanju zadaće interakcije fluida i konstrukcije. Primjer proračuna gravitacijske brane u ovom radu je originalan pa ne postoje rezultati za usporedbu s numeričkim rezultatima.

Dijagrami ovisnosti maksimalnog tlaka na fronti udarnog vala o udaljenosti od središta eksplozije za eksploziju u neograničenoj sredini (model 47) i za podvodnu eksploziju u interakciji s konstrukcijom (betonska gravitacijska brana), je sličan dijagramu na slici 6.72, uz neznatno povećane vrijednosti tlaka u slučaju djelovanja podvodne eksplozije na betonsku branu, maksimalno relativno povećanje je do 7 %.

Maksimalna vrijednost tlaka u elementu 50, na modelu eksplozije u neograničenoj sredini, je 39,95 MPa, a na modelu podvodne eksplozije u interakciji s betonom je 12,56 MPa.

Dio udarnog vala reflektira se od uzvodnog lica brane. Reflektirani udarni val se širi u prostoru vode i utječe na vrijednosti tlaka u prostoru vode nakon interakcije s izravnim tlačnim udarnim valom i reflektiranim vlačnim valom od slobodne površine vode i reflektiranim tlačnim valom od dna.



Slika 6.89 Raspodjela tlaka i širenje udarnog vala u vodi

Na slici 6.89 prikazano je širenje udarnog vala u prostoru vode u vremenima  $t_1=2346$   $\mu\text{s}$ ,  $t_2=3451$   $\mu\text{s}$ ,  $t_3=5268,7$   $\mu\text{s}$  i  $t_4=6284,6$   $\mu\text{s}$ . U početku se front udarnog vala širi u obliku kugle, koja povećava volumen u svim smjerovima jednako i nema utjecaja ograničenja.

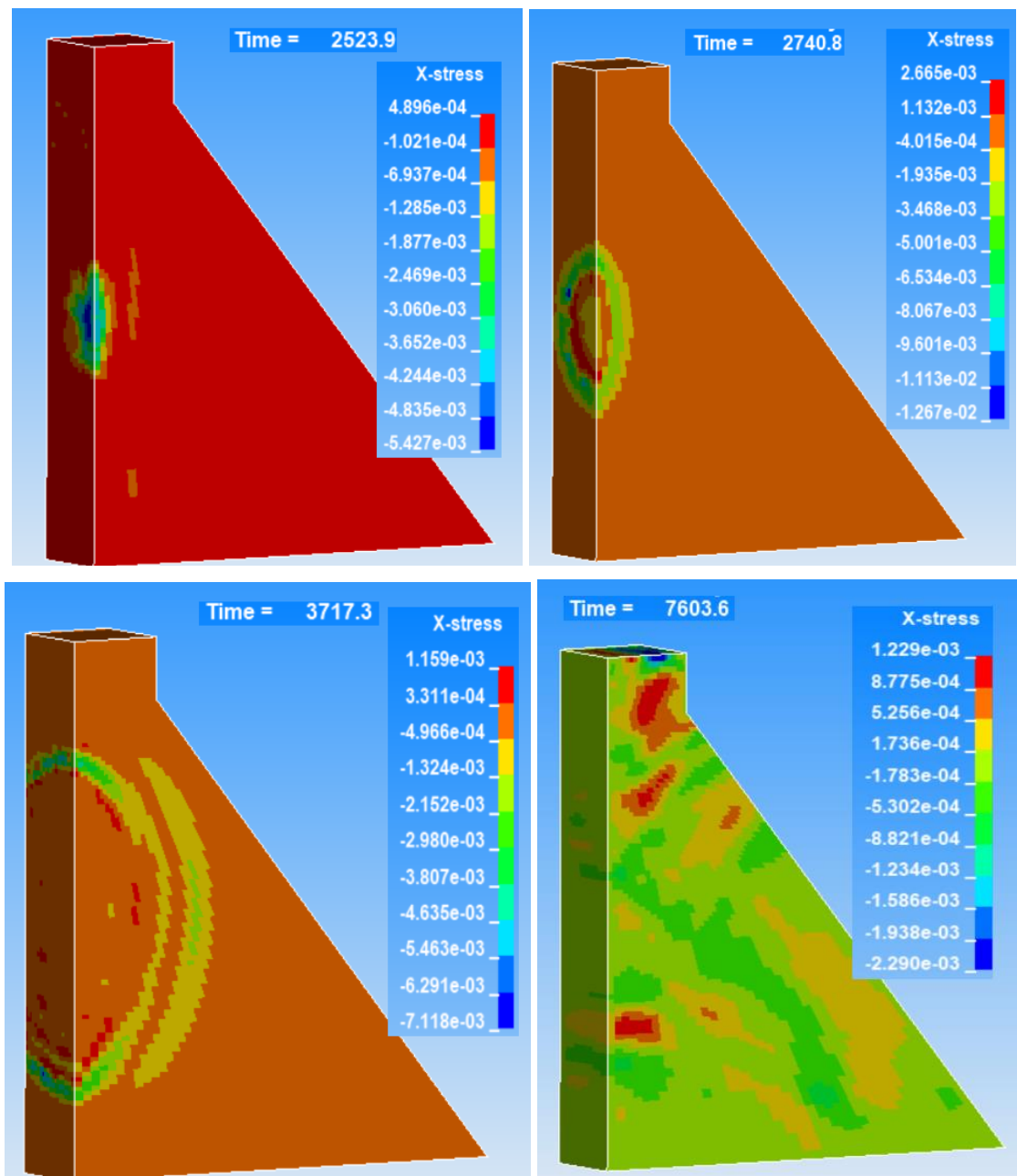
Daljnijim širenjem udarni val udara u betonsku branu, zatim u slobodnu površinu vode, a potom u dno. U gornjem dijelu prostora vode, nakon refleksije udarnog vala od slobodne površine vode vlačni udarni val se sudara s izravnim tlačnim valom i reflektiranim udarnim valom od lica brane.

Nakon interakcije spomenutih valova tlak postaje negativan bez izraženog fronta. U donjem dijelu nakon što udarni val dosegne dno reflektira se kao tlačni val i sudara s izravnim udarnim valom i reflektiranim udarnim valom od uzvodnog lica brane. Nakon toga pojavljuje se reflektirani tlačni val s naglašenim frontom koji se širi prema površini vode.

Dio udarnog vala se reflektira od kontaktne plohe voda – uzvodno lice brane, a dio udarnog vala prolazi kroz kontaktnu plohu između vode i betonske brane. Dio udarnog vala koji prođe kroz kontaktnu plohu nastavlja se širiti u betonu (brani) također po zakonima valne teorije.

Kao što je ranije spomenuto u tekućini se šire samo longitudinalni udarni valovi, dok se u krutom tijelu - betonu (brani) pored longitudinalnih udarnih valova šire i transverzalni udarni valovi.

Kao posljedica spomenute činjenice, numeričkim postupkom uslijed djelovanja podvodne eksplozije, dobivaju se jednake vrijednosti tlaka na čitavom konačnom elementu vode, koje su promjenjive u vremenu i djeluju jednako u svim smjerovima (sferni tenzor), dok u čvrstom tijelu – betonu dobivamo tenzor naprezanja, koji se mijenja u vremenu.

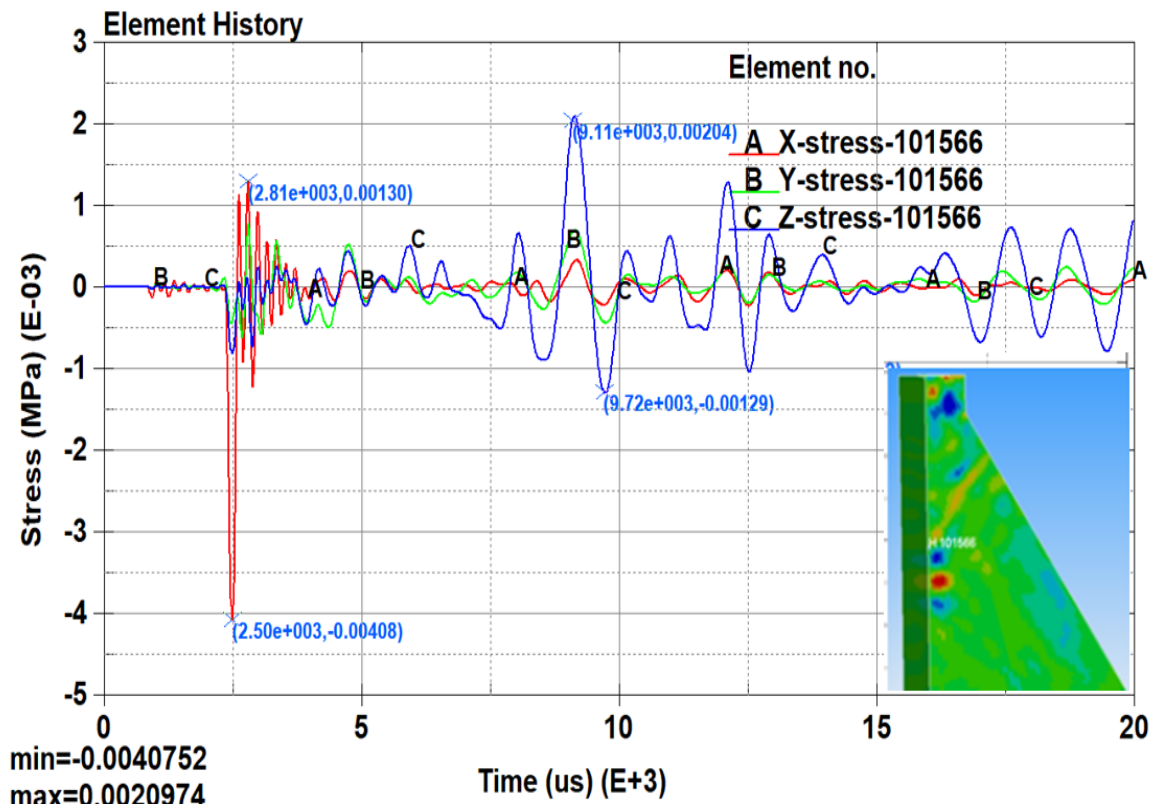


Slika 6.90 Raspodjela naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$  u betonskoj brani

Na slici 6.90 prikazana je raspodjela naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$  (smjer normale na promatranu ravninu je x i naprezanje je u smjeru osi x), u betonskoj brani, u vremenima  $t_1=2523,9 \mu\text{s}$ ,  $t_2=2740,8 \mu\text{s}$ ,  $t_3=3717,3 \mu\text{s}$  i  $t_4=7603,6 \mu\text{s}$ .

Udarni val, koji je prošao kroz vodu i prešao graničnu plohu između vode i beton i nastavio se širiti u brani (krutom tijelu – konstrukciji), najprije udara u točku betona koja je najbliža eksplozivnom naboju.

Zatim se uglavnom u početku sferno širi u tijelu brane i kruni. Nakon prolaska udarnog vala u betonu kroz kompletno promatrano područje betona val se i dalje nepravilno širi i uzrokuje promjene naprezanja. Vrijednost naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$  u početku raste i nadalje s vremenom opada, ali opada sporije nego tlak u vodi.

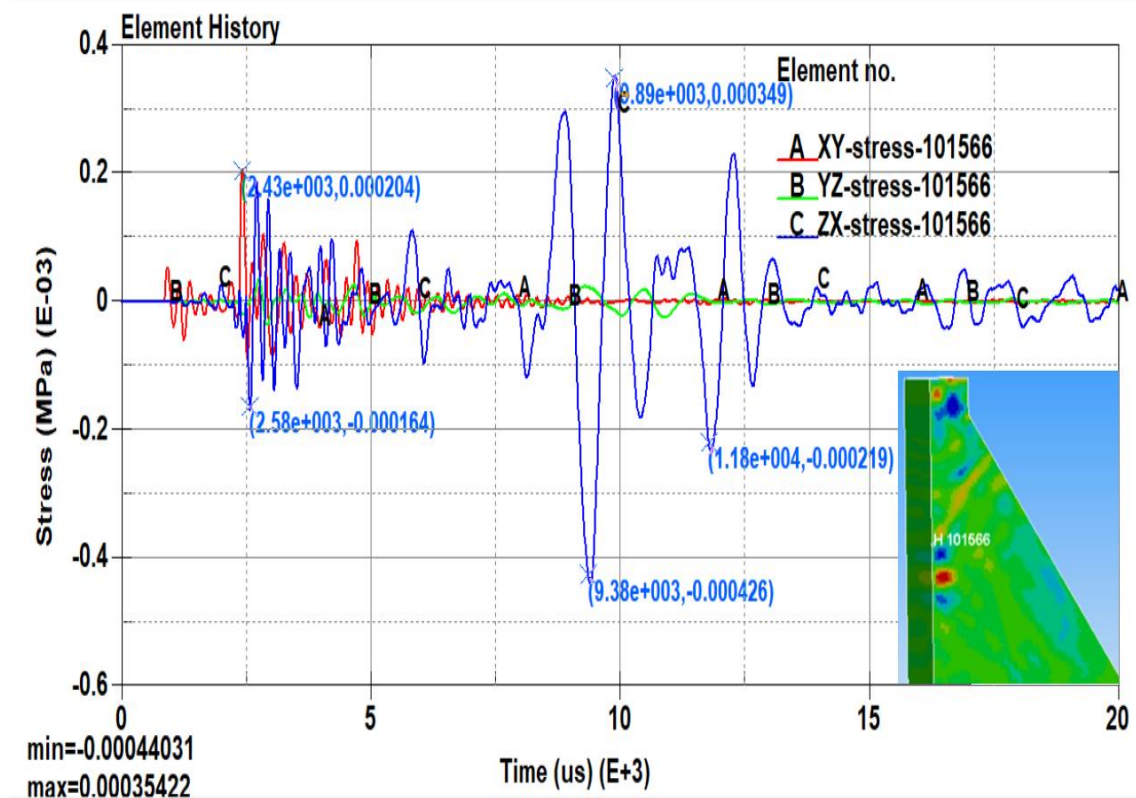


Slika 6.91 Dijagrami vremenske promjene komponenti normalnih naprezanja

Na slici 6.91 prikazani su dijagrami vremenske promjene naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$ ,  $\bar{\sigma}_{yy}$ ,  $\bar{\sigma}_{zz}$ ,  $\bar{\sigma}_{xy}$ ,  $\bar{\sigma}_{yz}$  i  $\bar{\sigma}_{zx}$  u kontaktnom konačnom elementu betona 101566, koji se nalazi na osi x, na granici s plohom brane, u promatranom vremenu. Na dijagramu se vidi promjena naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$  od negativne vrijednosti prema pozitivnoj pa ponovno iz pozitivne u negativnu i što se ponavlja u vremenu.

Maksimalna vrijednost vlačnog naprezanja  $\bar{\sigma}_{xx}$  se pojavljuje odmah nakon što udarni tlačni val dosegne element betona, maksimalna tlačna naprezanja su odmah nakon toga. Dijagram naprezanja  $\bar{\sigma}_{zz}$  poprima veće vrijednosti od naprezanja  $\bar{\sigma}_{yy}$ , vrijednosti naprezanja su promjenjive.



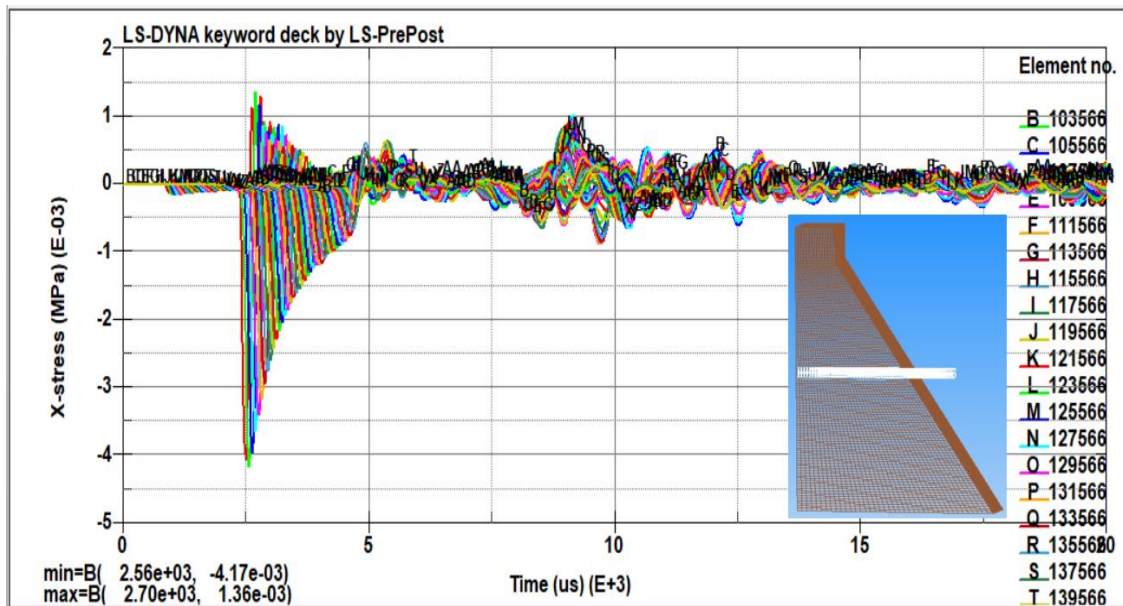


Slika 6.92 Dijagrami vremenske promjene komponenti posmičnih naprezanja

Na slici 6.92 prikazane su vremenske promjene posmičnih (tangencijalnih) komponenti tenzora naprezanja ( $\bar{\sigma}_{xy}$ ,  $\bar{\sigma}_{yz}$  i  $\bar{\sigma}_{zx}$ ) u betonu, u elementu 101566, prvi element betona u kontaktu s vodom, na osi x, u promatranom vremenu.

Na slici se vide promjene naprezanja, naprezanje  $\bar{\sigma}_{zx}$  poprima maksimalne vrijednosti. Dijagram naprezanja  $\bar{\sigma}_{zy}$  (B – zelena linija) u početku ima značajno manju vrijednost od ostalih posmičnih komponenti ( $\bar{\sigma}_{xy}$  i  $\bar{\sigma}_{zx}$ ), a nakon toga vrijednost značajno pada.

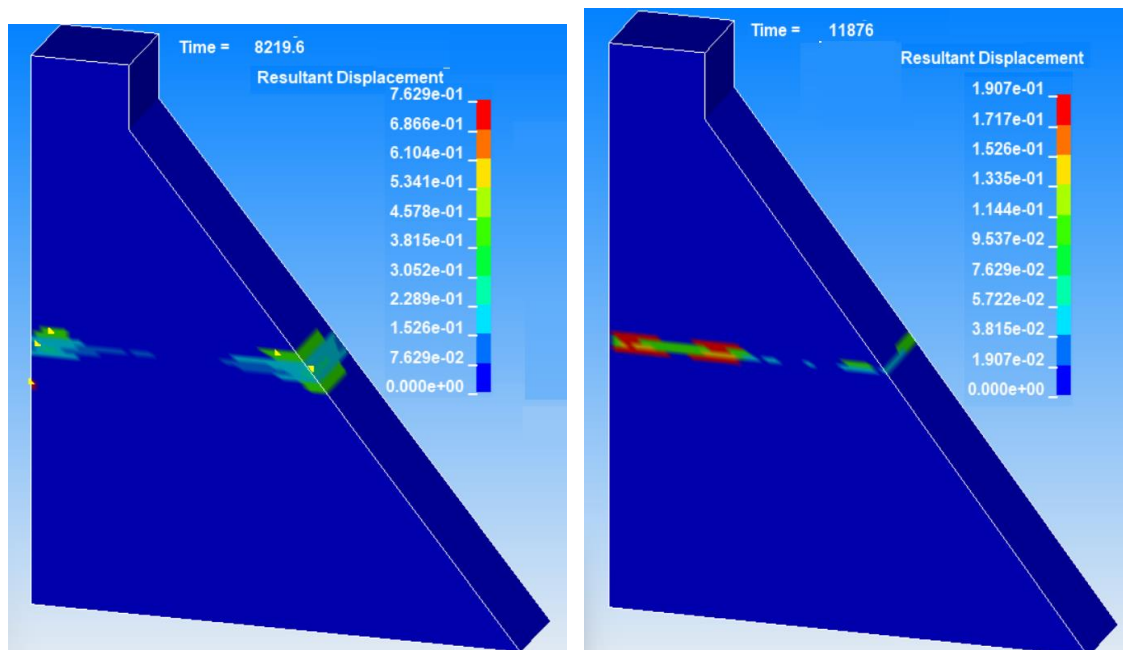
Na slici 6.93 prikazana je vremenska promjena  $\bar{\sigma}_{xx}$  naprezanja u svim elementima betona na osi x, u promatranom vremenu.



Slika 6.93 Dijagrami vremenske promjene naprezanja  $\sigma_{xx}$  u elementima betona

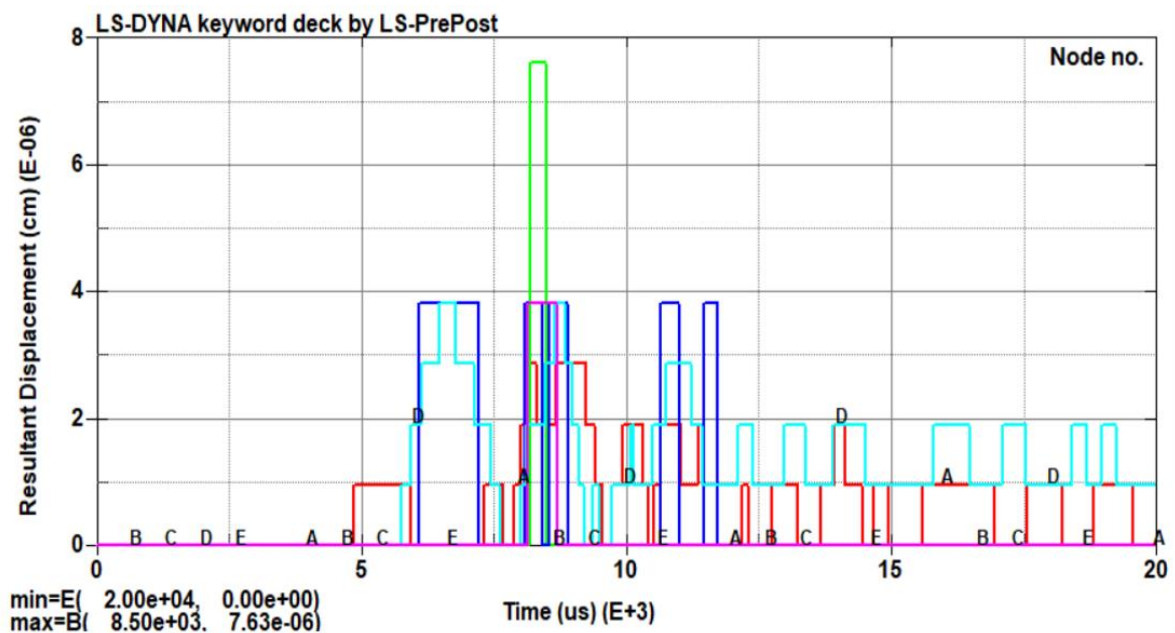
Vrijednosti naprezanja u konačnim elementima betona poprimaju naizmjenično pozitivne i negativne vrijednosti, maksimalna vrijednost naprezanja opada s udaljenošću elemenata od središta eksplozije.

Rezultante vektora pomaka u betonskoj brani, u vremenu  $t_1=8219,8 \mu\text{s}$  i  $t_2=11879 \mu\text{s}$ , prikazani su na slici 6.94.



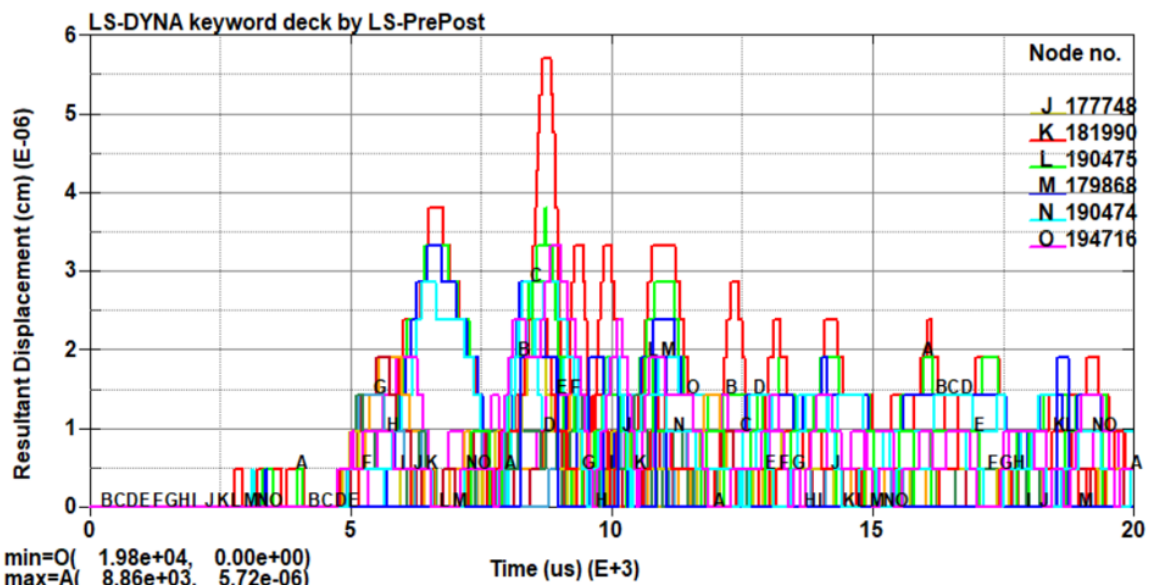
Slika 6.94 Pomaka čvorova elemenata betona

Na slici se vidi kako su maksimalne rezultante pomaka u elementima betona oko horizontalne osi x, tj. u pravcu u kojem udarni val najprije udara u betonsko lice brane.



Slika 6.95 Dijagrami vremenske promjene pomaka čvorova

Dijagrami vremenske promjene rezultanti pomaka u čvorovima betonske brane, u neposrednoj okolini osi x prikazani su na slici 6.95.



Slika 6.96 Dijagrami vremenske promjene pomaka čvorova

Na slici 6.96 prikazane su rezultante vektora pomaka u čvorovima betonske brane koji se nalaze na osi x, u promatranom vremenu.

Dijagrami vremenske promjene pomaka čvorova u betonskoj brani, prikazani su na slici 6.96. Pored prikaza raspodjele određenih veličina, u određenim trenutcima, u vodi i betonskoj brani i dijagramima njihove vremenske promjene u izlaznim rezultatima postoje i druge veličine (brzine, ubrzanje i dr.).

Udarni val se longitudinalno širi kroz vodu i dolazi do kontaktne plohe voda – betonska brana. Dio izravnog upadnog udarnog vala se reflektira od betonske gravitacijske brane, a dio prolazi u branu. Udarni val kroz betonsku gravitacijsku branu se širi kao longitudinalni i transverzalni val, Lazarević [34].

Nakon prolaza kroz plohu brane udarni val se širi i komponente tenzora naprezanja poprimaju pozitivne i negativne vrijednosti. Uslijed djelovanja udarnog vala utvrđeni su pomaci čvorova betona.

U ovom radu su provedena inicijalna istraživanja, stoga se nameće potreba daljnjih usmjerenih opsežnih i temeljitih istraživanja ove vrlo kompleksne fizikalne pojave kao i verifikacija dobivenih numeričkih rezultata s pomoću rezultata dobivenih eksperimentalnim istraživanjem. Rezultati istraživanja dodatno potvrđuju 2. hipotezu.

Na temelju provedenih istraživanja za potrebe određivanja udarnog opterećenja podvodne eksplozije na betonsku branu, pri praktičnim inženjerskim proračunima zaključeno je sljedeće

- Odrediti količinu eksplozivnog punjenja i njegov položaj u odnosu na građevinu s obzirom na mogućnosti transporta (transport i ili transport vodenim putem), transport do odabrane pozicije i sidrenje eksplozivnog punjenja (transport (čamac, splav, padobran itd.)), uzeti u obzir tehničku i fizičku zaštitu građevine, ako ista postoji.
- S obzirom na potencijalne položaje eksplozivnog punjenja, u odnosu na podvodnu građevinu i dubinu vode, odrediti dio konstrukcije najmanje otpornosti i najnepovoljniji položaj eksplozivnog punjenja, koji omogućava maksimalnu vrijednost tlaka od izravnog i reflektiranih udarnih valova (površina i dno), bliže površini, koji djeluje na građevinu.

- Korištenje reduciranih modela primjenom simetrije i redukcije volumena kocke na volumen kvadra.
- Dimenzije presjeka (volumena vode) uskladiti sa zadanom udaljenosti od središta eksplozije do betonske brane. Za udaljenosti do 5 m – širina lamele 3 m, za udaljenosti do 10 m - 4 m, za udaljenosti do 15 m - 5 m i za udaljenosti do 20 m - 6 m.
- Odabrati model betona sukladno zahtjevima točnosti proračuna.
- Veličine konačnih elemenata odabrati po mogućnosti 2 cm pa naviše, sukladno zahtijevanoj točnosti rezultata i tehničkim mogućnostima računala.
- Dobivene rezultate usporediti s rezultatima eksperimenta, ako postoje, ili rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza.

Prilikom pripreme projekta betonske brane, potrebno je provesti proračun i dokaz mehaničke otpornosti i stabilnosti na djelovanje podvodne eksplozije.

## 7 ZAKLJUČAK

### 7.1 Općenito

Republika Hrvatska kao članica NATO saveza i drugih asocijacija može biti meta terorističkih i drugih napada. Posebno treba istaknuti kako Republika Hrvatska sudjeluje u raznim vojnim i drugim misijama u kriznim područjima. Republika Hrvatska ima vrlo velik broj podvodnih građevina i infrastrukture na području mora, rijeka, akumulacija i jezera.

Aktualni oružani napad na Ukrajinu, oštećenje podmorskog plinovoda, napadi na hidrotehničke građevine kao i pad drona u Zagrebu pokazuje kako su napadi na civilnu infrastrukturu sve izvjesniji kao način ostvarivanja ratnih ciljeva. Napadna djelovanja provode se ne samo na infrastrukturu koja osigurava izravnu potporu borbenim operacijama nego na infrastrukturu koja je izvan područja operacija i područja interesa.

S obzirom na značaj sigurnosti podvodnih građevina i infrastrukture, koje su potencijalna meta podvodne eksplozije, ova istraživanja zaslužuju posebnu pažnju. Također treba napomenuti kako je potrebno istraživati djelovanje podvodne eksplozije za potrebe primjene u području graditeljstva, rudarstva, brodogradnje i drugim područjima.

Gradnje pouzdanijih obalnih, hidrotehničkih građevina i infrastrukture ostvaruju se zahtjevi borbe protiv terorizma, obrane i nacionalne sigurnosti. U radu je prikazan kratak opis eksploziva i podvodne eksplozije kao fizičke pojave, prezentirani su neki primjeri iz literature te matematičke formulacije kao i osnovni elementi numeričkog modeliranja te su provedena istraživanja na modelima.

Istraživanje je provedeno za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini, podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode, podvodnu eksploziju ograničenu dnom, podvodnu eksploziju ograničenu slobodnom površinom vode i dnom, te podvodnu eksploziju u interakciji s konstrukcijom te betonskom gravitacijskom branom. Istraživanja podvodne eksplozije provedena su u računalnom programu LS Dyna na više grupa numeričkih modela. Dobiveni rezultati numeričkog postupka su uspoređeni

s rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza kako bi se validirao numerički postupak i model te potvrdila sposobnost numeričkog modela i računalnog programa.

Za svako istraživanje su postavljene određene pretpostavke, pripremljeni numerički modeli, provedene numeričke simulacije te analizirani dobiveni rezultati, potvrđena ili odbačena pretpostavka, dani zaključci i preporuke za korištenje računalnog programa za inženjerske potrebe proračuna djelovanja podvodne eksplozije.

Prije modeliranja prezentirani su eksperimentalni rezultati, empirijski izraz i koeficijenti te rezultati tlaka dobiveni pomoću empirijskog izraza, za masu i oblik eksploziva TNT-a, koja je korištena u modelima. Modeliranje podvodne eksplozije je provedeno eksplozivnim nabojem TNT-a, oblika kugle, mase 136,08 kg. Numerički rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim i rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza, koji su dobiveni za istu količinu i oblik eksploziva Cole [3].

Nadalje je utvrđen utjecaj hidrostatičkog tlaka na ukupni tlak podvodne eksplozije.

Svi numerički modeli su razvijeni u prostoru 3D, konačni elementi vode, zraka i betona su prizmatičnog oblika (kocka, kvadar, prizma), a eksploziva prema postavkama računalnog programa.

Za istraživanje djelovanja podvodne eksplozije pripremljen je reducirani model (20x20x20 m), što je 1/8 globalnog prostora vode (40x40x40 m), koristeći simetriju. Nadalje je utvrđena sposobnost programa pri zadavanju propusnih i nepropusnih rubnih uvjeta na graničnim ploham volumena vode.

Temeljem prethodno utvrđene sposobnosti računalnog programa i svojstva udarnog vala, nastavljena je daljnja redukcije volumena vode s volumena kocke (20x20x20 m) na volumen vode kvadra (20x5x5 m), što je 1/128 globalnog prostornog modela vode. Pripremljeni su numerički modeli oblika kvadra različitih presjeka te izvršena numerička simulacija i dobiveni rezultati. Usporedbom numeričkih rezultata i rezultata dobivenih pomoću empirijskih izraza utvrđena su neznatna odstupanja.

Potvrđeno je kako je maksimalni tlak za volumen vode oblika kocke približno jednak maksimalnom tlaku za volumen vode oblika kvadra određenih dimenzija presjeka za podvodnu eksploziju u neograničenoj sredini. Potvrđena je 3. hipoteza.

Istražen utjecaj veličine konačnih elemenata eksploziva na rezultate tlaka, na pripremljenim modelima s različitom veličinom konačnih elemenata eksploziva i ne promijenjenom veličinom konačnih elemenata vode. Istraživanjem je utvrđeno kako povećanje broja konačnih elemenata eksploziva, odnosno smanjenje njihove veličine, ne utječe na promjene vrijednost tlaka. Potvrđen je dio 4. hipoteze.

Istražen je utjecaj veličine konačnih elemenata vode na rezultate tlaka, na pripremljenim modelima s različitom veličinom konačnih elemenata vode i nepromijenjenom veličinom konačnih elemenata eksploziva. Istraživanjem je utvrđeno kako povećanje broja konačnih elemenata vode, odnosno smanjenjem njihove veličine, utječe na promjene vrijednost tlaka. Potvrđen je dio 4. hipoteze.

Istražen je utjecaj veličine volumena i oblika vode na rezultate tlaka, na pripremljenim modelima s različitim veličinama i oblikom volumena vode. Istraživanjem je utvrđeno kako smanjenje volumena vode, odnosno promjene oblika, utječe na promjene vrijednost tlaka. Potvrđen je dio 3. hipoteze.

Potvrđeno je kako se numeričkim modeliranjem može simulirati udarno opterećenje uslijed djelovanja podvodne eksplozije u neograničenoj sredini. Potvrđen je dio 1. hipoteze.

Nadalje je istražen utjecaj veličine i oblika vode i veličine konačnih elemenata vode na rezultate tlaka, na pripremljenim modelima s različitim veličinama i oblikom volumena vode i veličinom konačnih elemenata vode. Istraživanjem je utvrđeno kako daljnje smanjenje volumena vode odnosno promjene oblika i smanjenje veličine konačnih elemenata vode, utječe na promjene vrijednosti tlaka. Ponovno je potvrđena 3. hipoteza.

Istražena je ovisnost brzine širenja udarnog vala na brzinu širenja vala odnosno dolaska fronte udarnog vala na određenu udaljenost. Istražen je utjecaj oblika eksplozivnog punjenja na tlak udarnog vala.

Istražena je sposobnost numeričkog modeliranja podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i/ili dnom. Pripremljeni su odgovarajući numerički modeli i istražen utjecaj posebno slobodne površine vode, posebno dna i utjecaj istovremenog ograničenja podvodne eksplozije slobodnom površinom vode i dnom.



Potvrđeno je kako se numeričkim modeliranjem može simulirati udarno opterećenje uslijed djelovanja podvodne eksplozije u ograničenoj sredini, ograničenom slobodnom površinom vode i/ili dnom. Potvrđen je dio 1. hipoteze.

Istražena je sposobnost numeričkog modeliranja pri zadavanju slobodne površine vode umjesto sloja zraka iznad vode. Pripremljeni su odgovarajući numerički modeli i istražen utjecaj zadanog rubnog uvjeta na rezultate tlaka. Istraživanjem je utvrđeno kako numerička simulacija daje jednake rezultate za model sa slojem zraka iznad vode kao i model sa slobodnom površinom vode bez sloja zraka iznad vode. Potvrđena je 5. hipoteza.

Istražena je sposobnost numeričkog modeliranja interakcije podvodne eksplozije i konstrukcije. Pripremljeni su odgovarajući numerički modeli i istražen utjecaj konstrukcije na eksplozivno polje u vodi. Zatim je istraženo naprezanje i pomaci u betonskom bloku izloženom djelovanju podvodne eksplozije. Istraživanjem je utvrđeno kako numerički model i računalni program imaju sposobnost numeričkog modeliranja podvodne eksplozije u interakciji s konstrukcijom. Potvrđena je 2. hipoteza.

Istražena je sposobnost numeričkog modeliranja interakcije podvodne eksplozije i armiranobetonske gravitacijske brane. Pripremljen je numerički model i istraženo naprezanje i pomaci u gravitacijskoj armiranobetonske brani. Istraživanjem je utvrđeno kako numerički modeli i računalni program imaju sposobnost numeričkog modeliranja podvodne eksplozije u interakciji s armiranobetonskom gravitacijskom branom. Potvrđena je 2. hipoteza.

Pored spomenutog također je potrebno doradivati postojeću i pripremati novu odgovarajuću regulativu koja će propisati mjere kojih se trebaju pridržavati projektanti i graditelji građevina, pri prostornom planiranju, projektiranju i gradnji obalnih građevina, koje su potencijalne mete terorističkih napada. Potrebno je sagledati mogućnost pasivne obrane, nadzor građevine kao i otpornost građevine na djelovanje podvodne eksplozije. Mjere treba primijeniti na obalne i hidrotehničke građevine i infrastrukturu poradi postizanja veće pouzdanosti od kolapsa kao posljedice terorističkih napada.

Numerički proračun i dane smjernice, koje su rezultat istraživanja podvodne eksplozije, nakon provedene validacije mogu se koristiti pri praktičnom inženjerskom proračunu i projektiranju pouzdanih i mehanički otpornih obalnih i hidrotehničkih građevina kao i infrastrukture, koje su potencijalni ciljevi terorističkih napada.

Čak i ako se govori o udarnim valovima u kontekstu terorističkog napada ili pozitivne aplikacije, složenost i značaj ovog područja je i dalje izazov za znanstvenike.

Potencijalno djelovanje podvodne eksplozije na obalne građevine i hidrotehničke građevine u realnim uvjetima može se očekivati kao djelovanje podvodne eksplozije u ograničenoj sredini uz istovremeno ograničenje slobodnom površinom vode i dnom. Građevine koje su potencijalna meta djelovanja podvodne eksplozije su uglavnom temeljene na manjim dubinama (pomorske luke, marine i infrastruktura, obalne naftne i istraživačke platforme, riječne luke i infrastruktura, hidrotehničke građevine, neke brane i sl.). Također, kod sagledavanja potencijalnog napada treba također analizirati mogućnost transporta određene količine eksploziva i postavljanja eksploziva na određenoj dubini i udaljenosti od građevine, što će biti različito za pojedine građevine.

Temeljem istraživanja utvrđeno je kako za zadanu vrstu i količinu eksploziva, utjecaj slobodne površine vode i dna odnosno njihov utjecaj na promjenu tlaka ovisi o geometrijskim elementima podvodne eksplozije odnosno udaljenosti središta eksploziva od promatrane točke te dubini središta eksplozivnog naboja i udaljenosti od središta eksplozivnog naboja do dna.

Numerički modeli korišteni u ovom radu se mogu koristiti pri inženjerskim proračunima obalnih i hidrotehničkih građevina uzimanjem stvarnih geometrijskih elemenata i pronalaženje najnepovoljnije kombinacije geometrijskih elemenata i maksimalnoj količini eksploziva koja ovisi o mogućnostima transporta i postavljanja na određenoj dubini.

Interakcija podvodne eksplozije (udarni val i plinski mjehur) i podvodne građevine je vrlo kompleksna fizikalna pojava, a njeno matematičko (numeričko) modeliranje vrlo složeno. Prikazani primjeri pokazuju dobro slaganje numeričkih i eksperimentalnih rezultata, ali za konkretne ograničene laboratorijske primjere.

Analizom prezentiranih dostignuća očito je kako postoje određene izazovi, za daljnje istraživanje u cilju pronalaženja i nekih drugačijih rješenja za postizanja više razine pouzdanosti podvodnih građevina u cilju sprječavanja njihova oštećenja i urušavanja.

Složenost rješavanja zadatke djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine pored svih temeljnih izazova pojavljuje se i novi. Primjena eksploziva s raznim dodacima, broj i razmještaj inicijalnih sredstava i dr., što značajno povećava učinak i rušilačku snagu podvodne eksplozije.

## 7.2 Zaključci

Djelovanje podvodne eksplozije na podvodne građevine i infrastrukturu može izazvati oštećenje ili rušenje dijela građevine kao i kolaps i rušenje kompletne građevine. Posljedice oštećenja ili rušenja podvodne građevine mogu prouzročiti velik broj ljudskih žrtava, velike materijalne štete i druge štete zbog neoperativnosti građevine (prekid prometa i opskrbe, prekid proizvodnje električne energije, oštećenje i rušenje građevina nizvodno i dr.).

Pregledom raspoloživih dosadašnjih istraživanja utvrđen je mali broj eksperimentalnih i numeričkih istraživanja djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine. Provedena istraživanja podvodne eksplozije i njenog djelovanja na numeričkim modelima, uz praćenje pojedinih parametara djelovanja, stvorena je baza koja se može koristiti za daljnje numeričko istraživanje i praktične inženjerske proračune te kao pomoć pri osmišljavanju i konkretizaciji određenih eksperimentalnih istraživanja.

Vrlo kompleksni modeli i modeliranje podvodne eksplozije u neograničenoj i ograničenoj sredini te njeno djelovanje na konstrukciju provedeno je na prihvatljivim numeričkim modelima, koje je bilo moguće realizirati u raspoloživim kapacitetima korištenog računala. Za provjeru dobivenih numeričkih rezultata na modelima korišteni su eksperimentalni i rezultati dobiveni pomoću empirijskih izraza.

Pri modeliranju korištene su pretpostavke homogenosti i izotropnosti eksploziva i vode te simetričnosti kugle eksploziva uronjenog u središte promatrane kocke vode. Zanemaren je hidrostatički tlak, a pretpostavlja se kako promatrani prostor ima ujednačenu gustoću, temperaturu i slanost vode, za morsku vodu. Također se pretpostavlja istovremena detonacija eksplozivnog punjenja i koriste se tri ravnine simetrije koje se sijeku i formiraju koordinatne osi što je omogućilo analizu samo 1/8 prostora vode i eksploziva.

Veličina promatranog prostora vode u procesu modeliranja je ovisila o zahtjevima konkretnog istraživanja, ali je uvijek prisutno nastojanje smanjenja volumena vode.

Istraživanje podvodne eksplozije u neograničenoj sredini provedeno je na volumenu vode oblika kocke, dužine brida 20 m, koja je tijekom istraživanja reducirana u kvadar s dužom stranicom dužine 20 m, kako bi se omogućilo smanjenje veličine konačnih elemenata vode i poboljšanje numeričkih rezultata.

Temeljem proučavanja dostupne literature, eksperimentalnih rezultata i empirijskih izraza iz literature te numeričkih istraživanja podvodne eksplozije numeričkim simulacijama u računalnom programu LS Dyna, donose se sljedeći zaključci:

- Hidrostatički tlak je zanemariv jer je njegov udio u ukupnom tlaku zanemarivo. Maksimalni postotak u istraživanju je na dubini od 20 m i na udaljenosti 10 m od središta eksplozije iznosi 0,677 %.
- Računalni program ima mogućnost zadavanja rubnih uvjeta na graničnoj plohi, kod koje nema refleksije udarnog vala od plohe ili kod koje dolazi do potpune refleksije udarnog vala, što je istraženo i opisano u radu.
- Promatrani prostor vode oblika kocke može se zamijeniti prostorom vode oblika kvadra, uz neznatna odstupanja rezultata. Istraživanjem je utvrđeno kako model s volumenom vode oblika kvadra, dimenzija 20x5x5 m, ima neznatna odstupanja od vrijednosti maksimalnog tlaka dobivenog na modelu kocke, dimenzija 20x20x20 m, maksimalno odstupanje tlaka je na udaljenosti od 20 m i iznosi 2,59 %. Nadalje je moguće smanjenje prostora vode, ako se kvadratni presjek kvadra zamjeni pravokutnim presjekom. U radu su korišteni isključivo 3D modeli vode, eksploziva, zraka i betona.
- Na temelju istraživanja utvrđeno je kako povećanje broja elemenata eksploziva, odnosno smanjenje njihove veličine ne utječe na promjene vrijednosti tlaka i približavanje eksperimentalnim rezultatima i rezultatima dobivenim pomoću empirijskog izraza.
- Promjena veličine konačnih elemenata vode izravno utječe na vrijednost tlaka. Vidljivo je kako povećanje broja konačnih elemenata vode, odnosno smanjenjem njihove veličine, dolazi do promjene i poboljšanja vrijednosti tlaka te približavanja rezultatima dobivenim pomoću empirijskog izraza. Istraživanje je provedeno za konačne elemente veličine 25x25x25 cm, 20x20x20 cm, 12,5x12,5x12,5 cm i 10x10x10 cm, na određenim udaljenostima, od središta eksplozije, od 1,5 do 20 m. Temeljem provedenih istraživanja utvrđeno je kako se postižu numerički rezultati s najmanjim odstupanjima od eksperimentalnih

rezultata i rezultata dobivenih pomoću empirijskog izraza za veličinu konačnih elemenata vode oblika kocke, veličine brida 2 cm. Povećanje veličine konačnog elementa vode, oblika kocke, na 3 cm i više povećava odstupanje.

- Istraživanjem je utvrđeno kako se dimenzije presjeka kvadra mogu smanjivati, uz dobivanje rezultata tlaka s prihvatljivim odstupanjem, ako se smanjuje promatrana udaljenost od središta eksplozije. Istraživanjem su utvrđene dimenzije presjeka kvadra: za udaljenosti do 5 m - 2x2x5 m (odstupanje 1,50 %), za udaljenosti do 10 m - 3x3x10 m (odstupanje 4,09 %), za udaljenosti do 15 m - 4x4x15 m (odstupanje 3,60 %) i za udaljenosti do 20 m - 5x5x20 m (odstupanje 2,59 %).
- Istražen je utjecaj oblika eksplozivnog punjenja na širenje udarnog vala i raspodjelu tlaka u blizini eksplozivnog punjenja. Istraživanje je provedeno za eksplozivni naboj oblika kocke i kugle iste mase. U radu su prikazani rezultati širenja i raspodjela vrijednosti tlaka te zaključci.
- Istražena je mogućnost numeričke simulacije djelovanja podvodne eksplozije ograničene slobodnom površinom vode. Usporedbom dobivenih rezultata na numeričkim modelima s rezultatima dobivenim pomoću empirijskih izraza može se zaključiti kako računalni program LS Dyna ima sposobnost rješavanja zadaće.
- Istražena je mogućnost numeričke simulacije djelovanja podvodne eksplozije ograničene dnom. Na temelju provedenih istraživanja i usporedbom numeričkih rezultata i rezultata dobivenih empirijskim izrazima, može se potvrditi ispravnost numeričkog postupka, uz pretpostavku krutog dna.
- Tijekom istraživanja, korištena je mogućnost zadavanja rubnih uvjeta na graničnim plohama za djelovanje eksplozije ograničene slobodnom površinom vode i krutog dna. Na graničnoj plohi sa zrakom zadan je rubni uvjet slobodne površine vode, a na graničnoj plohi s dnom se zadaje uvjet potpune refleksije udarnog vala (kruto tlo). Ove spoznaje značajno smanjuju broj konačnih elemenata te čak potpuno eliminiraju potrebu modeliranja zraka i tla.
- Povećanje i smanjenje tlaka na dijagramu tlaka kod numeričkih rezultata je postepeno za ograničenje slobodnom površinom vode u odnosu na naglo povećanje i smanjene dijagrama tlaka za ograničenje dnom. Prema mišljenju autora ovog rada, ova pojava se pojašnjava činjenicom kako je refleksija od

slobodne površine vode uvjetovana stvaranjem područja niskog tlaka, tlaka nižeg od tlaka vodene pare, tj. područja kavitacije koji daje postepenost i amortizaciju refleksije i porasta tlaka, dok kod dna je strogo zadan rubni uvjet na graničnoj plohi sa spriječenim pomakom i refleksija je trenutna i potpuna. Proširenjem sposobnosti računalnog programa i modela tla sigurno bi za mekano tlo porast tlaka bio postepeniji i manji jer bi se dio energije apsorbirao, a refleksija dijelom amortizirala.

- Istražena je interakcija podvodne eksplozije i konstrukcije, posredno preko fluida u kojem podvodna eksplozija generira longitudinalni udarni val koji se širi kroz tekućinu i udara u konstrukciju. U radu su prikazani tlakovi udarnog vala u vodi koji se dijelom reflektira od konstrukcije, a dijelom prolazi kroz graničnu plohu i širi se u konstrukciji. Prikazana su normalna i posmična naprezanja u elementima betona kao i pomaci čvorova konačnih elemenata betona. Također je istražen utjecaj krutosti konstrukcije na naprezanja u konstrukciji.
- Istražena je interakcija podvodne eksplozije i betonske brane. U radu su prikazani tlakovi udarnog vala u vodi koji se dijelom reflektira od konstrukcije, slobodne površine vode i dna. Udarni val dijelom prolazi kroz graničnu plohu i širi se u betonskoj brani. Prikazana su normalna i posmična naprezanja u elementima brane kao i pomaci u nekim čvorovima konačnih elemenata betona.

Eksperimentalni rezultati i rezultati dobiveni pomoću empirijskih izraza iz literature su korišteni za ocjenu modela i numeričkog postupka. Usporedbom numeričkih i eksperimentalnih i rezultata dobivenih pomoću empirijskih izraza za istu vrstu i količinu eksploziva i koeficijente empirijske jednadžbe utvrđeno je dobro slaganje rezultata, što je prethodno opisano.

Nadalje određene teorijske pretpostavke su također potvrđene numeričkim rezultatima (refleksija udarnog vala od slobodne površine vode, refleksija udarnog vala od krutog dna, interakcija tekućine i krutog tijela, razvoj longitudinalnih i transverzalnih valova u krutom tijelu, prolaz energije udarnog vala kroz kruta tijela različitih mehaničkih karakteristika (impedancije).

### 7.3 Izvorni znanstveni doprinosi

Tijekom pripreme i izrade doktorskog rada ostvareni su sljedeći istraživački doprinosi:

- 1) Definirane su dimenzije volumena vode, presjeka kvadra umjesto volumena kocke, za proračun podvodne eksplozije, uz određena odstupanja: za udaljenosti do 5 m - 2x2x5 m, za udaljenosti do 10 m - 3x3x10 m, za udaljenosti do 15 m - 4x4x15 m i za udaljenosti do 20 m - 5x5x20 m.  
Redukcija volumena značajno smanjuje veličinu numeričkog modela i broj konačnih elemenata te pojednostavljuje proračun.
- 2) Definirana je optimalna veličina konačnih elemenata eksploziva, vode i konstrukcije, pri numeričkom modeliranju. Konačni elementi vode i konstrukcije su oblika kocke, duljina brida kocke je 2 cm. Veličina konačnih elemenata eksploziva zadana je gustoćom diskretizacije 6 (šest).  
Definiran je dvoparametrski dijagram prikaza utjecaja veličine konačnih elemenata eksploziva i vode na rezultate tlaka.
- 3) Definirana je izvorna metodologija zadavanja sloja zraka iznad slobodne površine vode i dna (sloja tla), u numeričkom modelu podvodne eksplozije. Utvrđen je utjecaj hidrostatičkog tlaka na ukupni tlak, nakon podvodne eksplozije.
- 4) Definiran je numerički model podvodne eksplozije u neograničenoj sredini i sredini ograničenoj slobodnom površinom vode i/ili dnom.  
Definiran je numerički model interakcije podvodne eksplozije i podvodne konstrukcije.  
Utvrđen je utjecaj različitih mehaničkih karakteristika konstrukcije na prolaz energije udarnog vala na granici voda – konstrukcija.  
Definiran je numerički model interakcije podvodne eksplozije i armiranobetonske gravitacijske brane u ograničenoj sredini slobodnom površinom vode i dnom.

Općenito govoreći, nužno je daljnje proučavanje i istraživanje usmjeriti na djelovanje podvodne eksplozije u neograničenoj i ograničenoj sredini (slobodna površina vode i dno) kao i istraživanje interakcije udarnog vala i plinskog mjehura s obalnom i hidrotehničkom građevinom ili infrastrukturom, što je vrlo kompleksna fizikalna pojava, a njeno matematičko i numeričko modeliranje je također vrlo složeno.

## 7.4 Smjernice za daljnje istraživanje

Svakako treba uzeti u obzir složenost, opasnost i velike troškove te specifičnu opremu i ljudske potencijale potrebne za pripremu i provedbu eksperimentalnih istraživanja. Stoga se predlaže daljnje numeričko istraživanje, a nakon širokog spektra provedenih numeričkih istraživanja i kristalizacije određenih elemenata provesti ciljana eksperimentalna istraživanja i kalibraciju numeričkog modela.

Eksperimentalno istraživanje zaštite podvodne građevine zavjesama od mjehurića i drugim sredstvima, koja će se deformirati i apsorbirati energiju udarnog vala.

Ispitati važne čimbenike djelovanja podvodne eksplozije kao fizikalne pojave i eksplozivnog tlačnog udara mjerenjem vrijednosti i promjene tlaka, brzine vala tj. vremena dolaska udarnog vala, pomaka i dr. odgovarajućom raspoloživom mjernom opremom, u određenim točkama eksplozivnog polja, uvažavajući mogućnosti raspoložive mjerne opreme i poligona za ispitivanje.

Rezultate istraživanja potrebno je koristiti za daljnja istraživanja i pri praktičnom inženjerskom proračunu djelovanja podvodne eksplozije na podvodne građevine te implementaciju rezultata pri pripremi i doradi zakonske regulative, koja se odnosi na područje sigurnosti i otpornosti podvodnih građevina tijekom prostornog planiranja, projektiranja, izgradnje i održavanja.



Dodaci (prilozi)

## 8 BIBLIOGRAFIJA

- [1] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Terroristi%C4%8Dki\\_napadi\\_11.rujna2001](https://hr.wikipedia.org/wiki/Terroristi%C4%8Dki_napadi_11.rujna2001), 11.08.2022.
- [2] I. F. Panaa, C. Puicaa, D.A. Goga, I. Nuta, Numerical Studies Regarding Underwater Detonation, 32 (2015) 946 – 951, Inspectorate for Emergency Situations "General Magheru Valcea County", Ramnicu Valcea, Lespezi street, 38D, Romania, 2015.
- [3] R.H. Cole, Underwater explosions, Princeton University Press, 1948.
- [4] A compendium of British and American reports, Underwater explosion research, Volume I – the shock wave, Office of naval research - department of the Navy, 1950.
- [5] Defence documentation centre for scientific and technical information cameron station, Alexandria, Virginia, Scaling the energy spectra of underwater explosion shock wave, Explosions research department U.S. Naval ordnance laboratory white oak, Silver Spring, Maryland, 1953.
- [6] V. J. Cushing, On the theory of bulk cavitation, Office of Naval Research, Washington, D.C. 20360, Engineering-Physic Company, Rockville, Maryland, USA, 1969.
- [7] J. W. Pritchett, An evaluation of various theoretical models for underwater explosion bubble pulsation, Information Research Associates, Berkely Marina, California, USA, 1971.
- [8] B. V. Zamyshlyayev, S. Yu. Yakovlev, Dynamic loads in underwater explosion, National technical information service, Naval Intelligence Support Centre, Washington, D. C., 1973.
- [9] E. Wielandt, Generation of Seismic Waves by Underwater Explosions, Institute of Geophysics Institute, University of Karlsruhe, J. R. Soc. (1975) 40, 421-4399., 1974.
- [10] R. B. Walde, S. Wang, T. W. Wier, Vulnerability of source effect vehicles to explosions generated water waves, Office of Naval Research Arlington, Virginia, 1976.
- [11] M. M. Swisdak, Explosion effects and properties: Part II – Explosion effects in water, Research and technology department, Dahlgren, Virginia, Silver Spring, Maryland, 1978.

- [12] J. A. Clark, Numerical prediction of supersonic bulk-cavitation closure pulses, The catholic university of America, Washington, 1981.
- [13] A.P. Mouritz and D.S. Saunders, The damage and failure of GRP laminates by underwater explosion shock loading, The Institution of Engineers, Australia National Conference Publication, 5th Australian Aeronautical Conference, 1993.
- [14] S. Menon, Experimental and numerical studies of underwater explosions, School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta, Georgia, The Office of Naval Research, 1996.
- [15] T. Trevino, Applications of arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) analysis approach to underwater and air explosion problems, Thesis, Naval postgraduate school, Monterey, California, 2000.
- [16] L. Olovsson, I. Souli, I. Do, „LS DYNA – ALE Capabilities (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian), Fluid structure Interaction Modelling“, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, 2003.
- [17] S. Yasseri, Response of ships to severe underwater shocks, Conference paper, Brunel University London, 2008.
- [18] A. Grzadzila, Ship impact modelling of underwater explosion, Journal of KONES Powertrain of Transport, Polish Naval Academy, Mechanical Electrical Faculty, Gdynia, Poland, 2011.
- [19] G. Colicchio, M. Greco, M. Brocchini, O. M. Faltinsen, Hydroelasticity behaviour of a structure exposed to an underwater explosion“, CNR-INSEAN, The Italian Ship Model Basin, Roma, Italy, Centre for Autonomous Marine Operations and Systems (AMOS), Department of Marine Technology, NTNU, Trondheim, Norway, Department di Ingegneria Civile, Edile e di Architettura, University Politecnica delle Marche, Ancona, Italy, Published by the Royal Society, 2014.
- [20] M. H. Mousum, Numerical Analysis of Immersed Steel & Composite Cylindrical Shell Structures Submitted to UNDEX, Developed at Institute Catholique d'Arts et Metiers (ICAM), Nantes France, 2015.
- [21] J. Chen, X. Qiang, L. Xiaopeng, Numerical simulation analysis of damage mode of concrete gravity dam under close-in explosion, Dalian University of Technology, Journal of Civil Engineering, 2016.
- [22] Working Group „LS Dyna Keyword user's manual “, Volume II, Material Models, LS Dyna R11, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 2018.

- [23] M. Moradi, S. M. Aghajanzadeh, H. Mirzabozorg i M. Alimohammadi, Underwater explosion and its effects on nonlinear behaviour of an arch dam, Vol. 7, No. 3 (2018) 333-351, Civil Engineering Department, KN Toosi University of Technology, Iran, Tehran, 2018.
- [24] L. Lu, Y. Zhu, D.G. Zou, Q.M. Fan i S. B. Dong, Evaluation of anti-explosion performance of Shuibuya concrete faced rockfill dam slabs subjected to strong shock waves caused by an underwater explosion, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 11(3) 1–14, *Advances in Intelligent Mechatronic Systems and Precision Engineering - Research Article*, 2019.
- [25] X. Huang, J. Hu, X. Zhang, Z. Zhang, X. Kong, Bending failure of a concrete gravity dam subjected to underwater explosion, Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, Army Engineering University of PLA, Nanjing, China, 2020.
- [26] M. Pleše, *Fizika i kemija eksplozivnih tvari*, knjiga, MORH · OS RH HVU, Zagreb, 2008.
- [27] B. Vranješ, *Podvodna eksplozija*, Mornarički školski centar, Split, 1973.
- [28] Božić, B.: *Miniranje u rudarstvu, graditeljstvu i geotehnici*, Geotehnički fakultet Varaždin, Varaždin, 1998.
- [29] Chapter 2, *Explosives*, 1998. [https://www.nps.gov/parkhistory/online\\_books/npsg/explosives/Chapter2.pdf](https://www.nps.gov/parkhistory/online_books/npsg/explosives/Chapter2.pdf), 18.08.2022.
- [30] R. Meyer J. Köhler A. Homburg, *Explosives*, British Library Cataloguing-in-Publication Data: A catalogue record for this book is available from the British Library, Fifth, Completely Revised Edition, 2002.
- [31] G. Maselli, MITMITIGATION OF BLAST WAVE IN DRAINAGE OF WAR DEVICES NEAR CIVIL STRUCTURES, University degli Studi di Roma "La Sapienza" Faculty di Ingegneria Civile e Industriale Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Cattedra di Strutture, Roma, 2017.
- [32] F.A. Constanzo, *Underwater Explosion Phenomena and shock Physics*, Naval Surface Warfare Centre Carderock Division, Jacksonville, Florida, USA, 2010.
- [33] S. Petrović, *Fizika eksplozivnih materija*, Regionalni centar za obuku ronilaca za podvodno razminiranje, Bijela, Crna Gora, 2004.
- [34] Ž. Lazarević, *Tehnička hidroakustika*, Mornarička uprava, Beograd, 1987.
- [35] Ž. Nikolić, *Protupodmornička borba*, Uprava ratne mornarice, Split, 1972.
- [36] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Atmosferski\\_tlak#Izra%C4%8Dunpromjene\\_atmosferskog\\_tlaka\\_s\\_promjenom\\_nadmorske\\_visine](https://hr.wikipedia.org/wiki/Atmosferski_tlak#Izra%C4%8Dunpromjene_atmosferskog_tlaka_s_promjenom_nadmorske_visine), 15.12.2022.

- [37] X. Chun-liang, Y. Shan, T. Jian, T. Li, Y. Zhi-Ping, W. Xin-quan, Numerical simulation of bubble pulsation generated by deep water explosion, Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design Albufeira/Portugal 11-15 June 2017. Editors J.F. Silva Gomes and S.A. Meguid., Publ. INEGI/FEUP, 2017.
- [38] T Durdov: Doprinos analizi ponašanja oštećenih betonskih konstrukcija izloženih eksploziji, Magistarski rad, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2012.
- [39] B. C. Nie, J. C. Li, H.Q. Zhang, Interaction between reflected shock and bubble in near wall underwater explosion, 7th International Conference on Fluid Mechanics, ICF, 126 (2015) 344 – 348, Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China, Beijing, 2015.
- [40] F. Aruk, A. Mukan, T. Toprak, Finite element Analysis of Response of a Floating Structure to an Underwater Explosion, Taksim 34437 Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 2008.
- [41] S. K Rao, R. Vijayakumar, Underwater Explosion And Effect On Structures, International journal of innovative research & development, Delhi, India, 2012.
- [42] B. Ozarmut, A. Ruhl, B. Hennings, O. Nommensen, A. Paul, Fluid Composite Structure-interaction in Shock Simulations, marine System GmbH, Wefftrabe, Kiel, Germany, 2019.
- [43] R. Rajendran, Reloading effects on plane plates subjected to non-contact underwater explosion, BARC Facilities, Kalpakkam, India, 2008.
- [44] K. G. Webster, investigation of Close Proximity Underwater Explosion Effects on a Ship-Like Structure Using the Multi Material Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method, Thesis, Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2007.
- [45] A.K. Mathev, Modelling Underwater Explosion (UNDEX) Shock Effects for Vulnerability Assessment in Early-Stage Ship Design, Master of science in Ocean Engineering, Thesis submitted to the Faculty of Virginia, Polytechnic Institute and State University, 2018.
- [46] E. Cudahy, Stephen Parvi, The effects of underwater blast on drivers, Naval Submarine Medical Research Laboratory, London, 2001.
- [47] T. P. Slavik, Blast Loading in LS Dyna, Livermore Software Technology Corporation, University of California – San Diego, 2012.

- [48] D. S. Cheng<sup>1</sup>, C. W. Hung<sup>2</sup> and S.J.Pi<sup>2</sup>, Numerical Simulation of Near-Field Explosion, *Journal of Applied Science and Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 6167 (2013), Taoyuan County, Taiwan, 2013.
- [49] H. Draganić, Djelovanje eksplozija na nadvožnjake, doktorski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, 2014.
- [50] [https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA\\_enHR940H940&sxsrf=ALiCzsZScFBcS459Jg64jB9vkHLSV](https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA_enHR940H940&sxsrf=ALiCzsZScFBcS459Jg64jB9vkHLSV), 16. 12. 2022.
- [51] A. Hawass, H. Mostafa, A. Elbeih, W. El-Dakhkhni, Review on underwater explosion, 46th International Annual Conference of ICT, Convention Center, Karlsruhe, German, 2015.
- [52] Wikipedia, Underwater explosion, [https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater\\_explosion](https://en.wikipedia.org/wiki/Underwater_explosion), [pristupljeno 16. siječnja 2019.].
- [53] Z. Wang, W. Gu, J. Liu, Experimental Study on Peak Pressure of Shock Waves in Quasi-Shallow Water, Hindawi Publishing Corporation *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2015, Article ID 702178, 13 pages, Francesco Franco, 2015.
- [54] R. S. Krueger, Simulation of cylinder implosion initiated by an underwater explosion, Monterey, California, Thesis, Naval Postgraduate School, USA, 2006.
- [55] H. Kolsky J. P. Lewis, M.T. Sampson, A.C. Shearman and C. I. Snow, Splashes from underwater explosions, Imperial Chemical Industries Ltd, 1949.
- [56] E. Cudahy, S. Parvin, The Effects of Underwater Blast on Divers, Naval Submarine Base New London Commanding Officer, Naval Submarine, Medical Research Laboratory, Approved for public release; distribution unlimited, London 2001.
- [57] Google, <http://www.ideascience-group.com/m/view.php?aid=270>, 05.08.2022.
- [58] <https://www.ozm.cz/files/explosives-and-propellants-testing-instruments/explosives-performance-tests/detonation-calorimeter-dca25/detonation-calorimeter-dca-25.pdf>, 24.06.2024.
- [59] <https://www.ozm.cz/files/explosion-and-detonation-chambers/laboratory-detonation-chambers/laboratory-detonation-chambers.pdf>, 22.06.2024.
- [60] J. Malcom Smit, Julian J. Lee, Ship-like target design for underwater explosion experiment, Defence Research and Development Canada, Atlantic Research Centre, Netherland, Sweden, Scientific Report, 2017. London, 2008.
- [61] X. Huang, J. Hu, X. Zhang, Z. Zhang, Effect of bubble pulse on concrete gravity dam subjected to underwater explosion: Centrifuge test and numerical simulation, *Ocean Engineering*, Volume 243, 110291, Zhejiang Hangzhou, 2022.

- [62] L.A. Lu, D. Zou, Y. Zhu, Y. Dong, C. Zuo, Y. Wu, M.S. La: An analytical solution for dynamic response of water barrier subjected to strong shock waves caused by an underwater explosion to dams, POLISH MARITIME RESEARCH Special Issue 2017, S2 (94) 2017, Vol. 24; pp. 111-117 10.1515/pomr-2017-0072.
- [63] V. Jović, Uvod u inženjersko numeričko modeliranje, Aquarius engineering Split d.o.o., Split, 1993.
- [64] A. Mihanović, P. Marović i J. Dvornik, Nelinearni proračun armirano betonskih konstrukcija, Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora, Zagreb, 1993.
- [65] E. Sjostrand, Structural Analysis of Underwater Detonations, Luleå University of Technology Department of Engineering Sciences and Mathematics, 2021.
- [66] B. Klenow, Assessment of LS Dyna, and Underwater Shock Analysis (USA) Tools for Modelling Far-Field Underwater Explosion Effects on Ships, A thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE in Ocean Engineering, Virginia, 2006.
- [67] A. J. Valdani, A. Adamian, Finite element-finite volume simulation of underwater explosion and its impact on a reinforced steel plate, Mechanical Engineering, Volume 67 2020 Number 1 DOI: 10.24425/ame.2020.1316812020.
- [68] LS Dyna, Theory Manual r:8903, LS Dyna, LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOG CORPORATION (LSTC), Livermore Software Technology Corporation, United States, Livermore, 2017.
- [69] LS – PrePost, User's Manual, Dyna, An advanced pre and post-processor and model editor for LS-DYNA, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California, 2016.
- [70] LS\_DYNA Aerospace Working Group, Modelling Guidelines Document, Version 13-1, 2013.
- [71] R. Bottichr, Fluid structure interaction with MAT SOFT TISSUE and EFG Elements, 5th European LS-DYNA Users Conference, Hannover, Germany.
- [72] M. Tešić, Vojnopomorska geografija, Mornarička uprava, Split, 1968.





## **Životopis**

Rođen je 24. ožujka 1961. godine u Kljakama, općina Ružić. Osnovnu školu završio je u Gradcu, općina Ružić, a srednju školu u Građevinskom školskom centru u Splitu. Akademске 1979./80. godine upisao je Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Splitu, na kojem je diplomirao 13. srpnja 1984. godine.

Po završetku studija, od rujna 1984. godine, radio je u građevinskom poduzeću "Konstruktor" – Split. U poduzeću "Konstruktoru" obnašao je više odgovornih dužnosti: inženjer u pogonu za proizvodnju montažnih elemenata za garaže stambenih naselja u Splitu (Mertojak, Lokve i Pujanke), inženjer u pripremi na gradilištu HE "Đale", voditelj tesarskih radova na HE Đale, voditelj složene građevine, strojarnice i desnog boka na HE "Đale", te voditelj vrlo složenih gradilišta i to: Sanacija potpornog zida u ulici „Rade Končara“ (sadašnji naziv ulice Poljička cesta) u Splitu i izgradnje zaobilaznice Splita, čvor „Rade Končara“ u Splitu.

Stručni ispit iz područja građevinarstva položio je u studenom 1987. godine. Također je završio IV, V i VI stupanj engleskog jezika u Centru za učenje stranih jezika „Đuro Salaj“ u Splitu.

U siječnju 1990. godine zasnovao je radni odnos u poduzeću "Kamen i keramika" u Splitu, na dužnosti voditelja proizvodnje, gdje je radio do 1996. godine, s prekidom za vrijeme sudjelovanja u Domovinskom ratu. Kao voditelj proizvodnje bio je angažiran na pripremi i vođenju kamenoklesarskih, keramičarskih i teracerskih radova na više desetina, javnih, sakralnih, povijesnih, stambenih i poslovnih te infrastrukturnih građevina.

U periodu od 1989. godine do 1999. godine radio je honorarno, kao vanjski suradnik za više tvrtki i projektantskih ureda, na više desetaka projekata, kao projektant suradnik, odgovorni projektant, nadzorni inženjer i voditelj projekta, javnih, sakralnih, stambenih i poslovnih građevina te građevine niskogradnje.

Od 1996. godine, bio je zaposlen u Zapovjedništvu HRM (Hrvatska ratna mornarica), gdje je primljen u djelatnu vojnu službu i obnašao je dužnost voditelja Odsjeka za graditeljstvo ZOP, ZNR i ZO, do ožujka 2013. godine. Na toj dužnosti je skrbio o građevinama, infrastrukturi i pomorskoj infrastrukturi te ZOP, ZNR i ZO u području odgovornosti HRM, od Savudrije do Molunta. Sudjelovao u svim fazama planiranja i provedbe temeljnog i investicijskog održavanja, te planiranju, pripremi programa, studija i dokumentacije za adaptaciju, rekonstrukciju i modernizaciju postojećih građevina i infrastrukture kao i za izgradnju novih građevina i vojnih kompleksa. Pored

spomenutih poslova također je bio angažiran na poslovima definiranja interesa obrane pri izradi prostornih planova te planiranju i provedbi inženjerskih radova.

Za vrijeme rada u Zapovjedništvu HRM uspješno je završio tečaj informatike, tri tečaja engleskog jezika, u trajanju od 6, 2 i 3 mjeseca, te Naprednu mornaričku časničku školu, u Splitu, u trajanju od 8 mjeseci i Zapovjedno stožernu intergransku školu, u Zagrebu, u trajanju od 10 mjeseci. Sudjelovao je na više međunarodnih tečajeva, seminara i ostalih oblika međunarodne vojne suradnje. Osposobljen je i uspješno koristi Word, Excel, Internet, Auto CAD, Power Point, Ansys i LS Dyna.

Od travnja 2014. godine bio je raspoređen na dužnost nastavnika pomorskih operacija, na HVU (Hrvatsko vojno učilište) „Petar Zrinski“, Odsjek pomorskih operacija (Split), gdje je radio do časnog otpusta iz OS RH, 31. 12. 2017. godine. U spomenutom vremenu uspješno je, pored drugih zadaća, pripremio i održao teoretsku nastavu i vježbe, na svim razinama časničke i dočasničke izobrazbe, osim Ratne škole, ukupno oko 840 nastavnih sati. Posebno ističe nastavne predmete: Pomorske borbene operacije, Minsko ratovanje, Fizička polja broda i podvodna eksplozija i Hidroakustika. Upisan je u Imenik ovlaštenih inženjera građevinarstva u Komori inženjera graditeljstva, kao pasivni član, i redovito pohađa stručna predavanja i prati stručne webinare. Pedagoško-psihološko-didaktičko-metodičko obrazovanje, radi stjecanja pedagoških kompetencija, na Filozofskom fakultetu u Splitu, u trajanju od dva semestra, ukupno 14 (četrnaest) kolegija, 60 ECTS bodova, uspješno je završio 2015. godine.

Tijekom Domovinskog rata bio je angažiran u obrani Domovine. Za uzorno obnašanje službe i postignute rezultate u Domovinskom ratu i u službi u OS RH višekratno je pohvaljen od zapovjednika 4. Gardijske brigade, zapovjednika HRM, načelnika GS OS RH i ministra Obrane RH te nagrađen od zapovjednika HRM, zapovjednika HVU, načelnika GS OS i ministra Obrane RH, kao i odlikovan od predsjednika RH.

Poslijediplomski studij, smjer „Tehnička mehanika i nosive strukture“, upisao je akademske godine 1989./1990. i odslušao je sve kolegije prema nastavnom planu i programu, ali zbog sudjelovanja u Domovinskom ratu i drugih poteškoća studij nije završio.

Ponovno je upisao Poslijediplomski znanstveni studij građevinarstva – smjer konstrukcije, a magistarski rad, na temu „Doprinos analizi ponašanja oštećenih betonskih konstrukcija izloženih eksploziji“, obranio je 2012. godine i stekao akademski stupanj magistra znanosti iz područja tehničkih znanosti.

Nastavak studija na poslijediplomskom sveučilišnom znanstvenom doktorskom studiju je pokušao prijavom na natječaj za upis 2014. godine. Nakon prijema, fakultet u Splitu kao ni on nisu uspjeli pronaći mentora iz područja znanstvenog interesa pa je bio prisiljen odustati.

Akadske godine 2016./2017. upisao se na poslijediplomski znanstveni sveučilišni doktorski studij, nakon pronalaska mentora koji se bavi proučavanjem i istraživanjem u području znanstvenog interesa, na Građevinsko i arhitektonskom fakultetu Osijek. Položio je sve nastavnim planom predviđene ispite, obranio temu i pripremio doktorsku radnju na temu pod radnim nazivom „Podvodna eksplozija u mirnoj vodi kao plošno opterećenje na armiranobetonsku konstrukciju“.

Sukladno odluci ministra obrane Republike Hrvatske i planu izdvajanja djelatnih vojnih osoba, od 01. siječnja 2018. godine, je izdvojen zbog potreba službe – častan otpust, uz pravo na mirovinu. Umirovljen je u osobnom činu pukovnika, a od 01. veljače 2021. godine zaposlen je kao nastavnik strukovnih predmeta u Graditeljsko geodetskoj tehničkoj školi u Splitu, na pola radnog vremena, gdje je i sada zaposlen.

Održao je predavanje na temu „Modeliranje podvodne eksplozije u računalnom programu LS Dyna“ na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu, 25. studenog 2021. godine.

Održao je predavanje na temu „Potresno inženjerstvo“, online, ispred Graditeljsko-geodetsko tehničke škole u Splitu, za nastavnike više županija, preko aplikacije za edukaciju EMA. Održao je predavanje na temu: „Građevine nakon potresa – novo ili obnova“, na 5. Danima strukovnih nastavnika u organizaciji Agencije za strukovno obrazovanje i obrazovanje odraslih, Šibenik, Solaris, 16. lipnja 2021. Predavanje je odabrano na javnom natječaju.

Nakon jednogodišnjeg rada u Graditeljsko tehničkoj školi u Splitu, u ožujku 2022. položio je Stručni ispit za nastavnika strukovnih predmeta u srednjim školama, u Zagrebu.

Ističe snažnu želju za stalnim istraživanjem, učenjem i stjecanjem novih znanja te prijenosom stečenih znanja i iskustava na mlade generacije. Smatra to svojom časnom društvenom dužnošću i obvezom vraćanja bar dijela onoga što je dobio od zajednice i naučio od svojih nastavnika, profesora i iskusnijih kolega.

Toma Durdov

