

Balistika na cilju

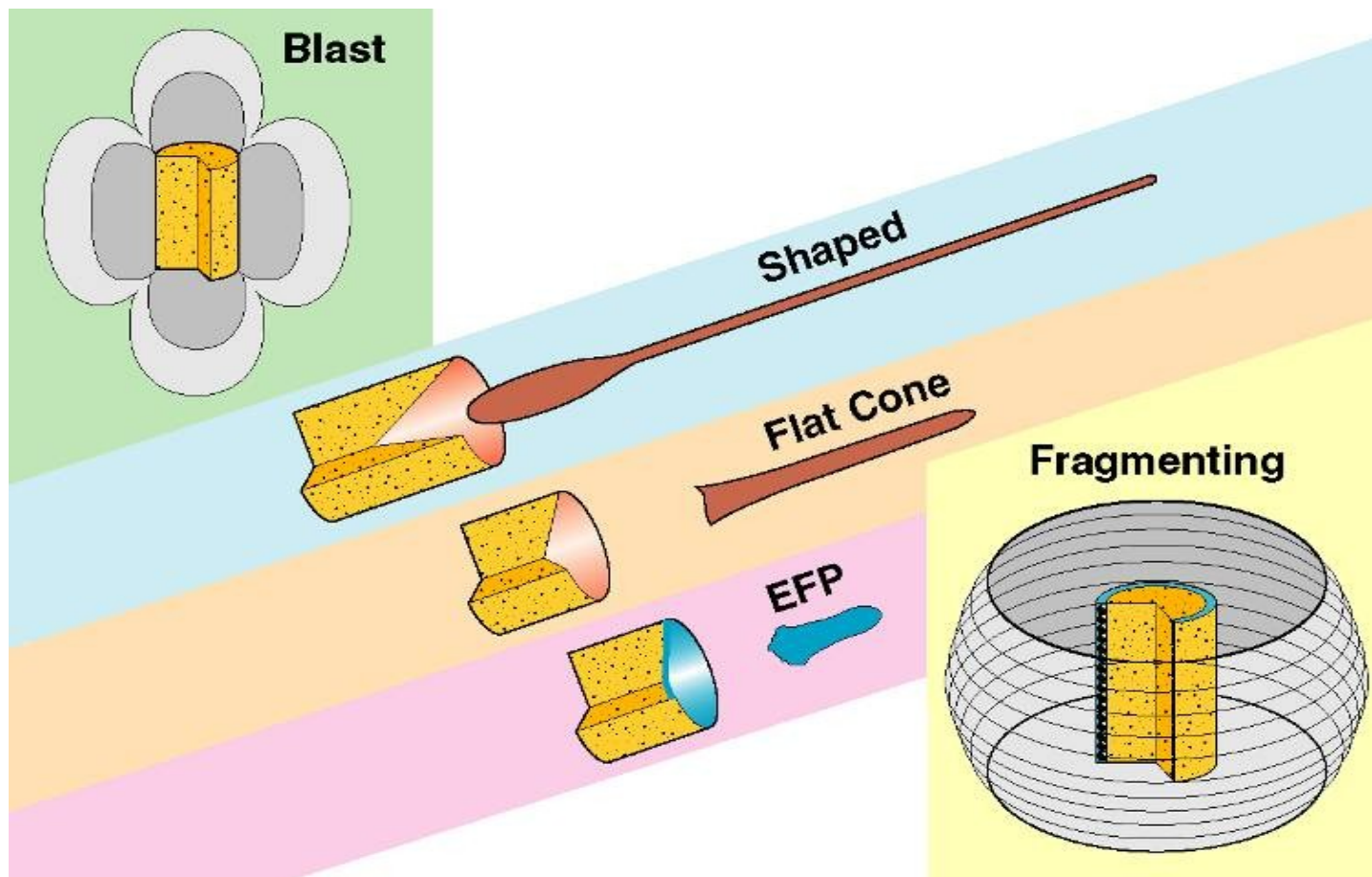
4

Rušeće dejstvo

Uvod

- Rušeće dejstvo (engl. **blast**) je posledica **eksplozije** – procesa čija je osnovna karakteristika izuzetno brzo oslobađanje energije.
- U primenama koje se odnose na sisteme naoružanja najznačajnije su **hemijske eksplozije** - za dalja razmatranja najznačajniji su čvrsti **sekundarni (brizantni) eksplozivi**.
- Kao što je poznato, **detonacijom** ovih eksplozivnih materija dolazi do formiranja gasovitih produkata čiji je pritisak reda 20...40 GPa i temperatura 3000...4000 K. Ovi vreli gasovi visokog pritiska naglo se šire formirajući tzv. **primarnu zonu bliskog dejstva** u kojoj je pritisak gasa i dalje veoma visok i gde su razaranja izuzetno velika. Ova zona je ograničena na **prostor u neposrednoj blizini eksplozivnog punjenja** (prema literaturnim izvorima orijentacioni radijus ove zone je 16 prečnika eksplozivnog punjenja).
- **U sekundarnoj zoni rušćeg dejstva**, na rastojanjima većim od približno 16 prečnika eksplozivnog punjenja, pritisak značajno opada i za opisivanje fenomenologije dejstva dovoljno je razmatrati prostiranje udarnog talasa u vazduhu.
- Rušeće dejstvo je posledica isključivo procesa detonacije i **prostorno nije usmereno** kao što je slučaj sa nekim drugim primenama efekata eksplozije. To je jedna od najvažnijih osobina rušćeg dejstva koja zavisno od vrste cilja može biti prednost ili nedostatak.

Uvod



Rušće dejstvo (blast) i drugi vidovi primene eksplozivnih procesa u bojnim glavama (kumulativni efekat, Misznay-Schardinov efekat, fragmentacija-parčadno dejstvo). Parčadno i rušće dejstvo ne karakteriše usmerenost konverzije energije eksplozije

Zona bliskog dejstva

- Razmotrimo detonaciju **neobloženog** sfernog eksploziva radijusa r_e koji je iniciran **u centru** sfere
- Pretpostavićemo da se proces detonacije, odnosno hemijskog preobražaja eksploziva odvija **trenutno**.
- **Realno**, proces detonacije sfernog eksploziva traje:

$$t_d = \frac{r_e}{D}$$

- npr. za TNT (brzina detonacije 6900 m/s) mase 1 kg (radijus 52 mm) ovo vreme je 7,5 μ s.
- izraz za **toplotu eksplozije** Q (po jedinici mase eksploziva) koja je oslobođena u toku detonacionog procesa:

$$Q = \frac{D^2}{2(\gamma^2 - 1)}$$

- **unutrašnja energija** produkata detonacije:

$$E = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p_d}{\rho_d}$$

- što daje sledeći izraz za **"početni" pritisak** produkata detonacije:

$$p_d = \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)} = \frac{1}{2} p_{CJ}$$

Zona bliskog dejstva

- Ekspanzija produkata detonacije može se predstaviti **politropskim zakonom**:

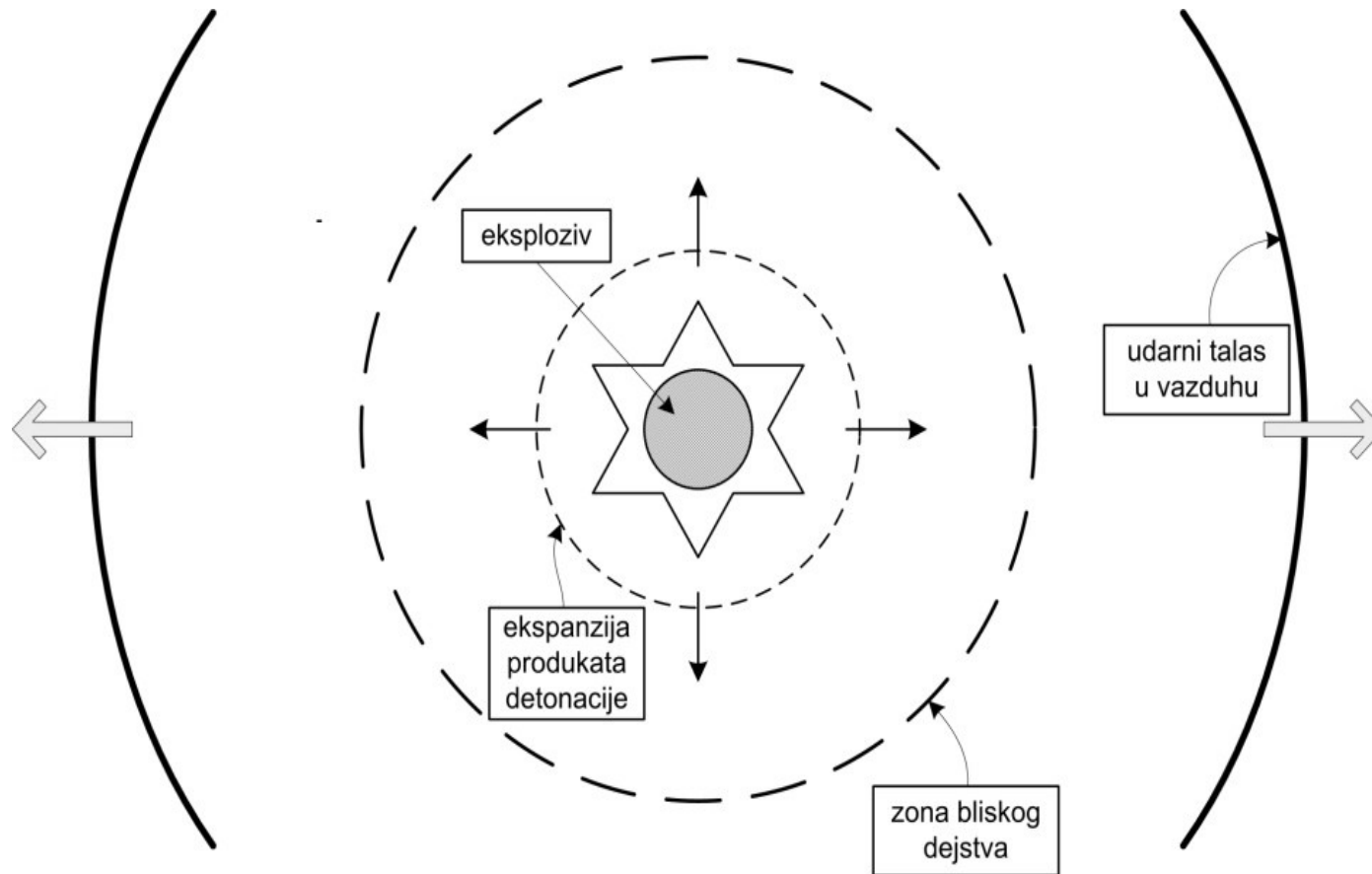
$$pV^\gamma = p_d V_e^\gamma = \text{const.}$$

- najčešće se uzima da je politropska konstanta $\gamma=3$.
- Realna ekspanzija** produkata detonacije - složeniji modeli, $\gamma \neq \text{const.}$
 - na početku širenja gasova ovaj parametar može imati vrednosti koje su veće od 5
 - ona se postepeno smanjuje i pri malim pritiscima dostiže vrednost 1,4
- Ako je širenje produkata detonacije **sferno**, kada PD dostignu radijus r , njihov pritisak će biti:

$$p = p_d \left(\frac{r_e}{r} \right)^{3\gamma} = \frac{1}{2} p_{\text{CJ}} \left(\frac{r_e}{r} \right)^9$$

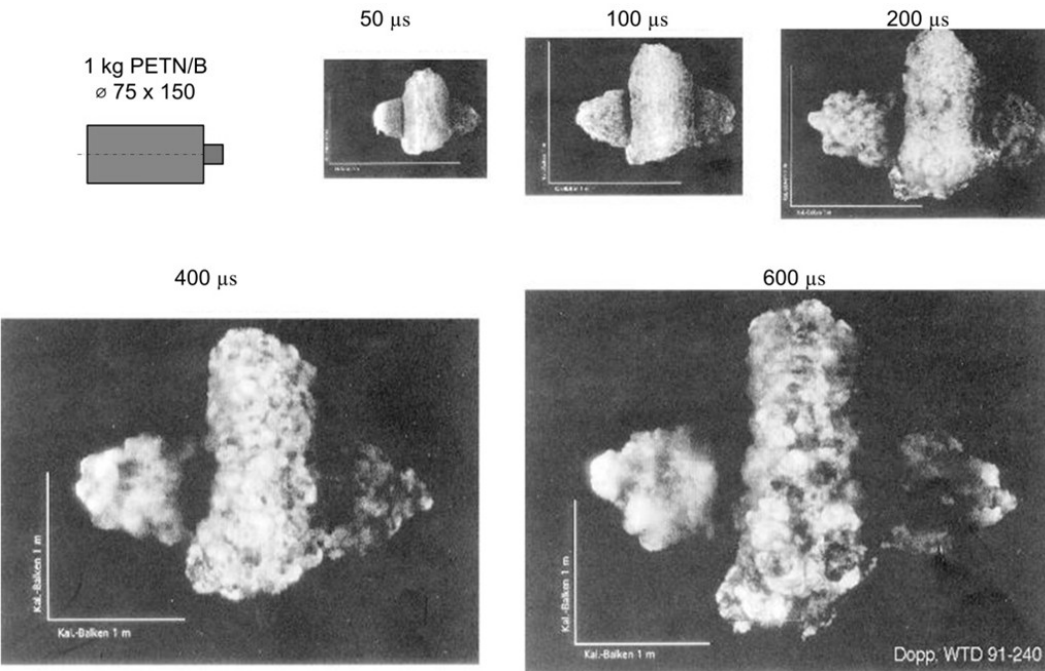
- Oдавде sledi da već pri ekspanziji produkata detonacije definisanoj odnosom radijusa $r/r_e=4$, njihov **pritisak opada** na vrednost manju od 1 bar.
 - pritisak u produktima detonacije postaje značajno manji od pritiska u **udarnom talasu** koji se formira u okolnoj sredini
- Istovremeno, dolazi i do **pada brzine PD** i počinje njihovo mešanje sa okolnim vazduhom
- Numeričke simulacije**: na rastojanjima od **10 do 16 radijusa** eksplozivnog punjenja uticaj PD postaje zanemarljiv u odnosu na efekat udarnog talasa koji se, usled veće brzine prostiranja, odvaja od PD

Zona bliskog dejstva

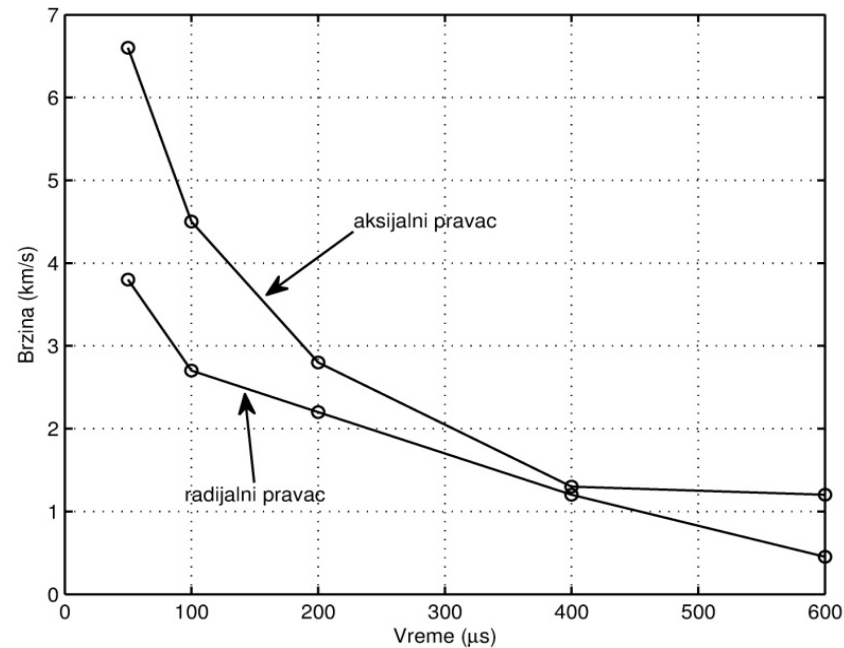


Primarna zona bliskog dejstva i generisanje udarnog talasa pri eksploziji

Zona bliskog dejstva



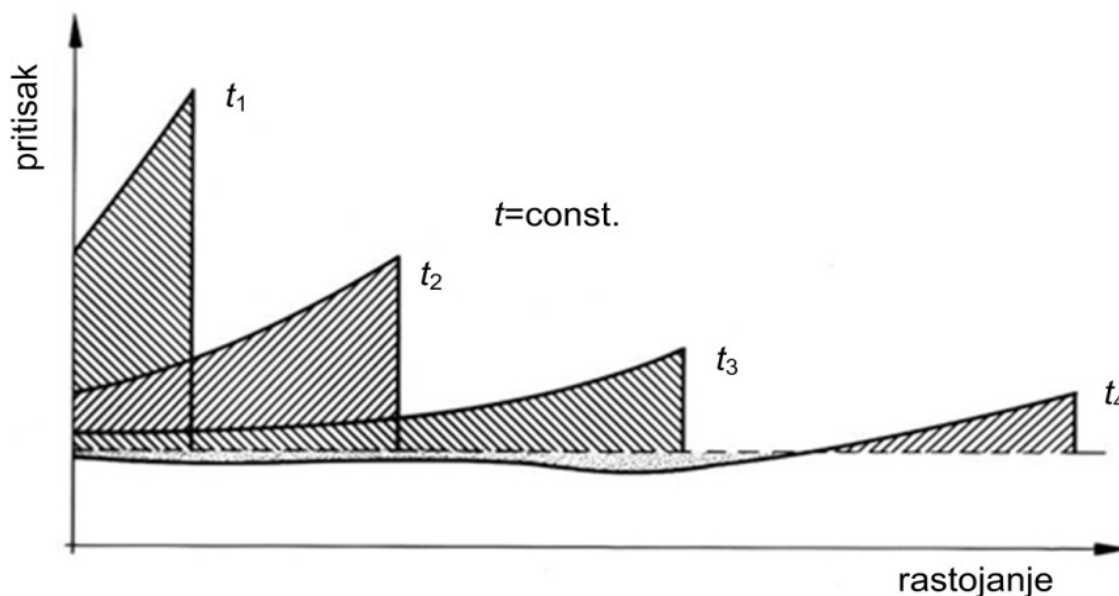
Evolucija širenja gasovitih produkata detonacije eksplozivnog punjenja izrađenog od pentrita (87%) i plastifikatora (13%). Punjenje ima masu od 1 kg i cilindričnog je oblika, prečnika 75 mm i dužine 150 mm



Brzina širenja gasovitih produkata detonacije 1 kg pentrita u aksijalnom i radijalnom pravcu

Prostiranje udarnog talasa

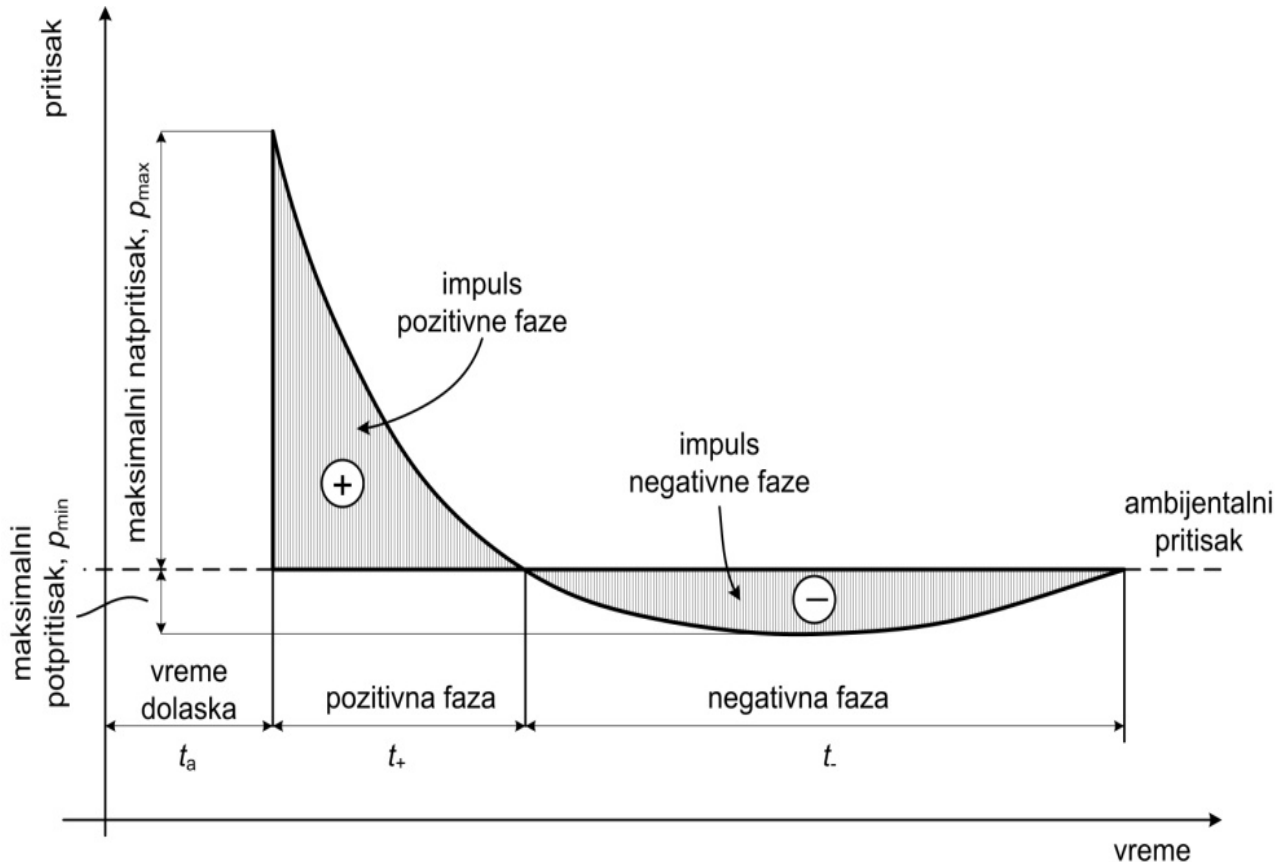
- Iako se pokazuje da **vrednost pritiska PD veoma brzo opada** i da je na pomenutim rastojanjima od centra eksplozije (> 16 prečnika punjenja) vrednost natpritiska značajno manja od 1 bar
- dolazi do formiranja **fronta udarnog talasa** u vazduhu
- ovo dovodi do praktično trenutnog **povećanja pritiska vazduha** u odnosu na ambijentalni atmosferski pritisak
- posle izvesnog vremena (trenutak 4 na slici), zbog inercijalnih efekata **dolazi do pada pritiska iza udarnog talasa** na vrednost manju od okolnog atmosferskog pritiska
- **brzina vazduha** na izvesnom fiksnom rastojanju od centra eksplozije ima najpre smer koji odgovara smeru prostiranja udarnog talasa (od centra eksplozije), ova brzina se smanjuje, da bi usled stvorenog podpritiska promenila smer ka centru eksplozije.



**Zavisnost
nadpritiska
udarnog talasa
od rastojanja od
izvora eksplozije**

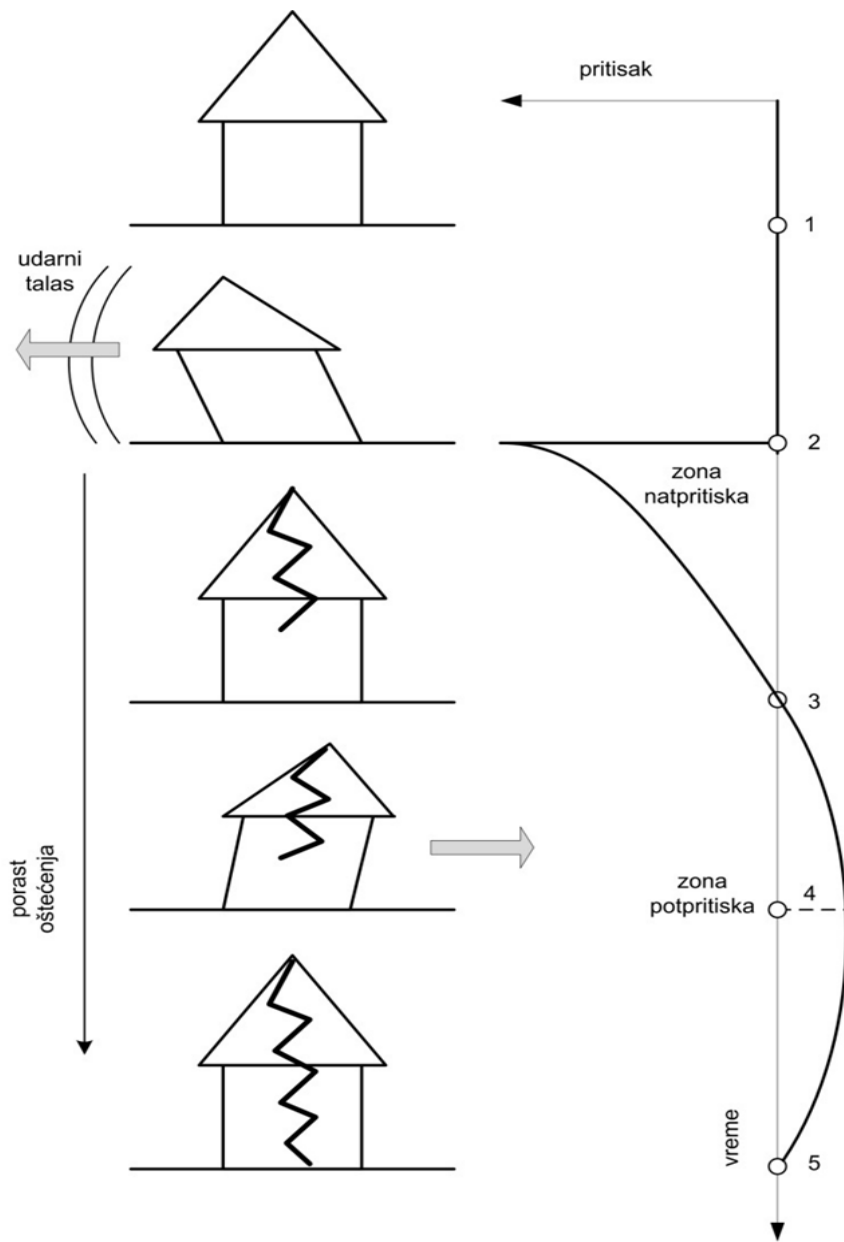
Prostiranje udarnog talasa

- Tipična **promena pritiska sa vremenom** na nekom konstantnom rastojanju od centra eksplozije predstavljena je na dijagramu. U trenutku t_a udarni talas dolazi do razmatranog položaja i pritisak naglo raste na vrednost p_{\max} koja se naziva maksimalni (ili vršni) nadpritisak i predstavlja jedan od najznačajnijih parametara procesa.



Udarni talas u vazduhu kao posledica eksplozije – evolucija u vremenu za fiksno rastojanje

Prostiranje udarnog talasa



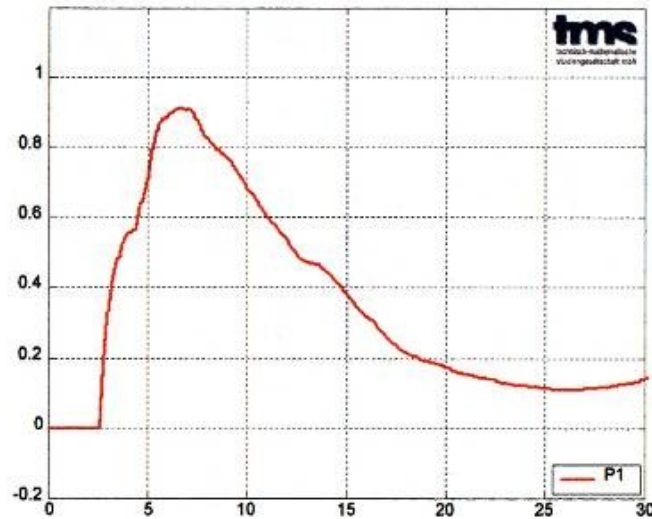
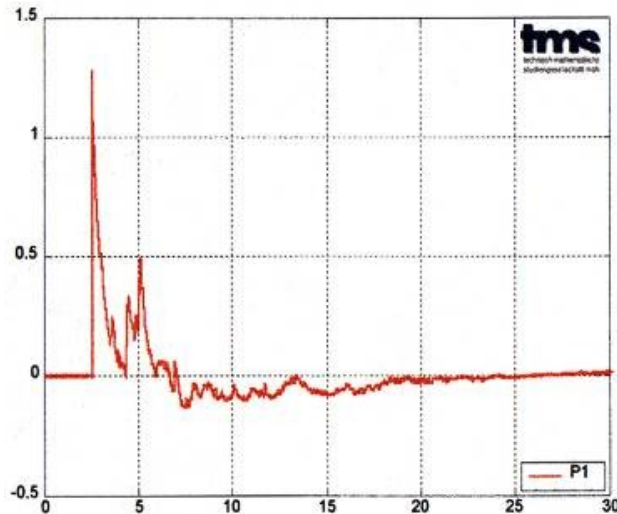
Smer kretanja vazduha (**vetra udarnog talasa**) i deformacije strukture pri prostiranju udarnog talasa u vazduhu nakon detonacije eksplozivnog punjenja:

- 1 – pre nailaska udarnog talasa,
- 2 – trenutak maksimalnog natpritiska,
- 3 – pritisak jednak ambijentalnom pritisku,
- 4 – maksimalni potpritisk,
- 5 – ravnotežni pritisak

Prostiranje udarnog talasa

Promena pritiska u sekundarnoj zoni rušućeg dejstva empirijski se opisuje relacijom:

$$p(t) = \begin{cases} 0, & t < t_a \\ p_{\max} \left(1 - \frac{t-t_a}{t_+} \right) \exp \left(-a \frac{t-t_a}{t_+} \right), & t \geq t_a \end{cases}$$



Izmerene vrednosti pritiska i impulsa pritiska pri detonaciji 1 kg pentrita u obliku cilindra vitkosti $L/D=2$

Određivanje parametara udarnog talasa

- TNT ekvivalent

Eksplziv, sastav	gustina (g/cm ³)	brzina detonacije (m/s)	faktor TNT ekvivalenta, q_{TNT}
Olovo azid	4.710	5180	0.340
Živin fulminat	4.43	4250	0.395
Amatol, 80% TNT + 20%AN	1.584	6570	0.586
Tetril	1.73	7570	1.00
TNT	1.654	6900	1.00
Pentolit, 50% PETN + 50% TNT	1.65	7400	1.129
Komp B, 60% RDX + 40% TNT	1.751	8000	1.148
RDX	1.82	8750	1.185
HMX	1.91	9100	1.256
Pentrit	1.773	8400	1.282
Nitroglicerín (tečni)	1.60	7700	1.481
Torpex, 42%RDX+40%TNT+18%Al	1.82	7600	1.667
Nuklearna bomba	19.1	100000+	400...5.2·10 ⁶

- Vrednost TNT ekvivalenta određenog eksplozivnog sastava

$$W = q_{\text{TNT}} \cdot M_{\text{E}}$$

Određivanje parametara udarnog talasa

- skalirano rastojanje od centra eksplozije

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

– R – stvarno rastojanje od centra eksplozije

- Brode:

$$p_{\max} = \begin{cases} \frac{6.7}{Z^3} + 1, & p_{\max} > 10 \text{ bar} \\ \frac{0.975}{Z} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019, & 0.1 < p_{\max} < 10 \text{ bar} \end{cases}$$

- Kinney i Graham:

$$\frac{p_{\max}}{p_0} = 808 \cdot \frac{1 + \left(\frac{Z}{4.5}\right)^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.048}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0.32}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1.35}\right)^2}}$$

Određivanje parametara udarnog talasa

- Mills (u kPa):

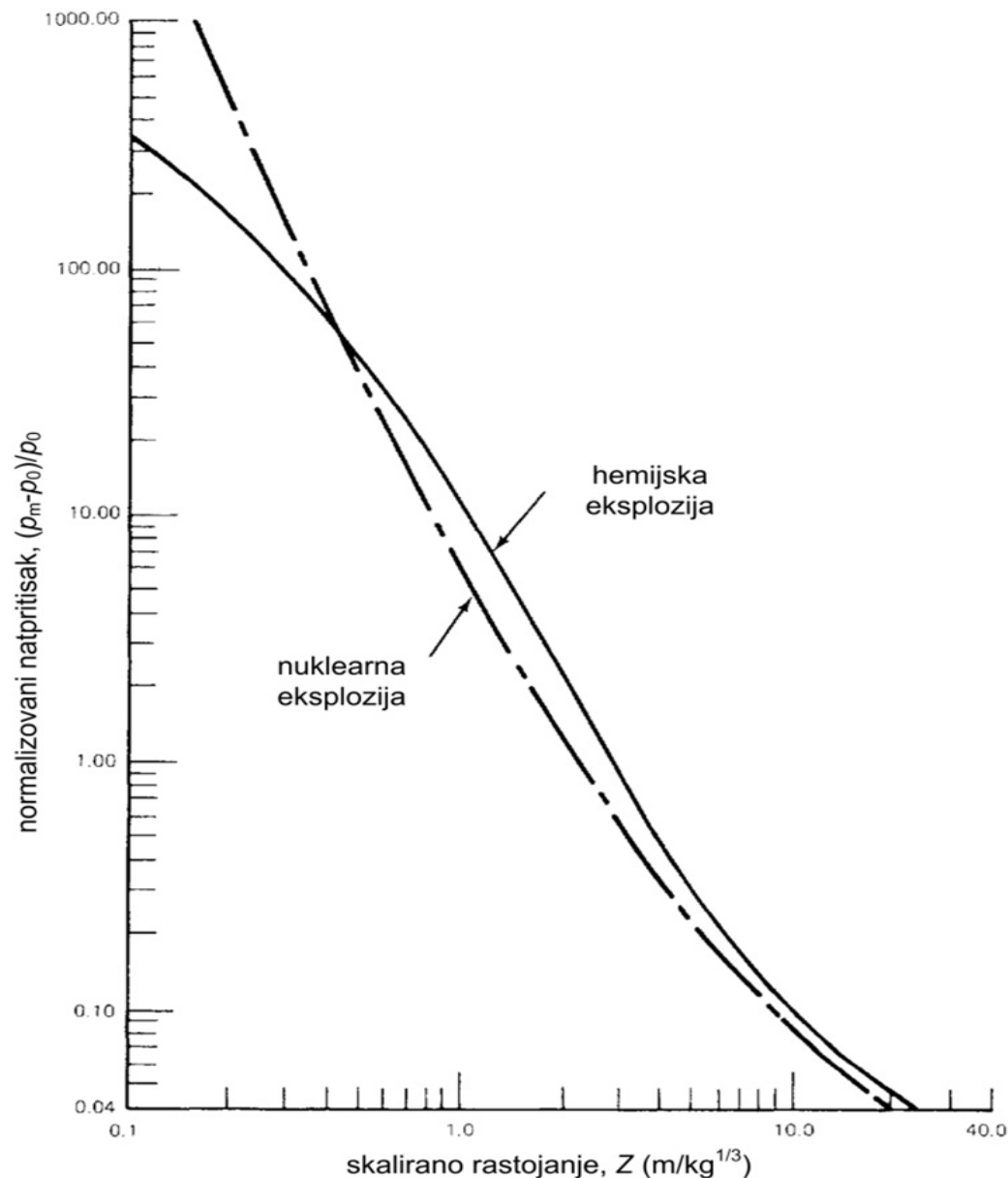
$$p_{\max} = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z}$$

- Henrych

$$p_{\max} = \begin{cases} \frac{14.072}{Z} + \frac{5.540}{Z^2} - \frac{0.357}{Z^3} + \frac{0.00625}{Z^4}, & 0.05 < Z \leq 0.3 \\ \frac{6.193}{Z} - \frac{0.326}{Z^2} + \frac{2.132}{Z^3}, & 0.3 \leq Z \leq 1 \\ \frac{0.662}{Z} + \frac{4.05}{Z^2} + \frac{3.288}{Z^3}, & 1 \leq Z \leq 10 \end{cases}$$

- Treba primetiti važnu osobinu svih navedenih relacija koja je posledica činjenice da sve zavise od skaliranog rastojanja Z .

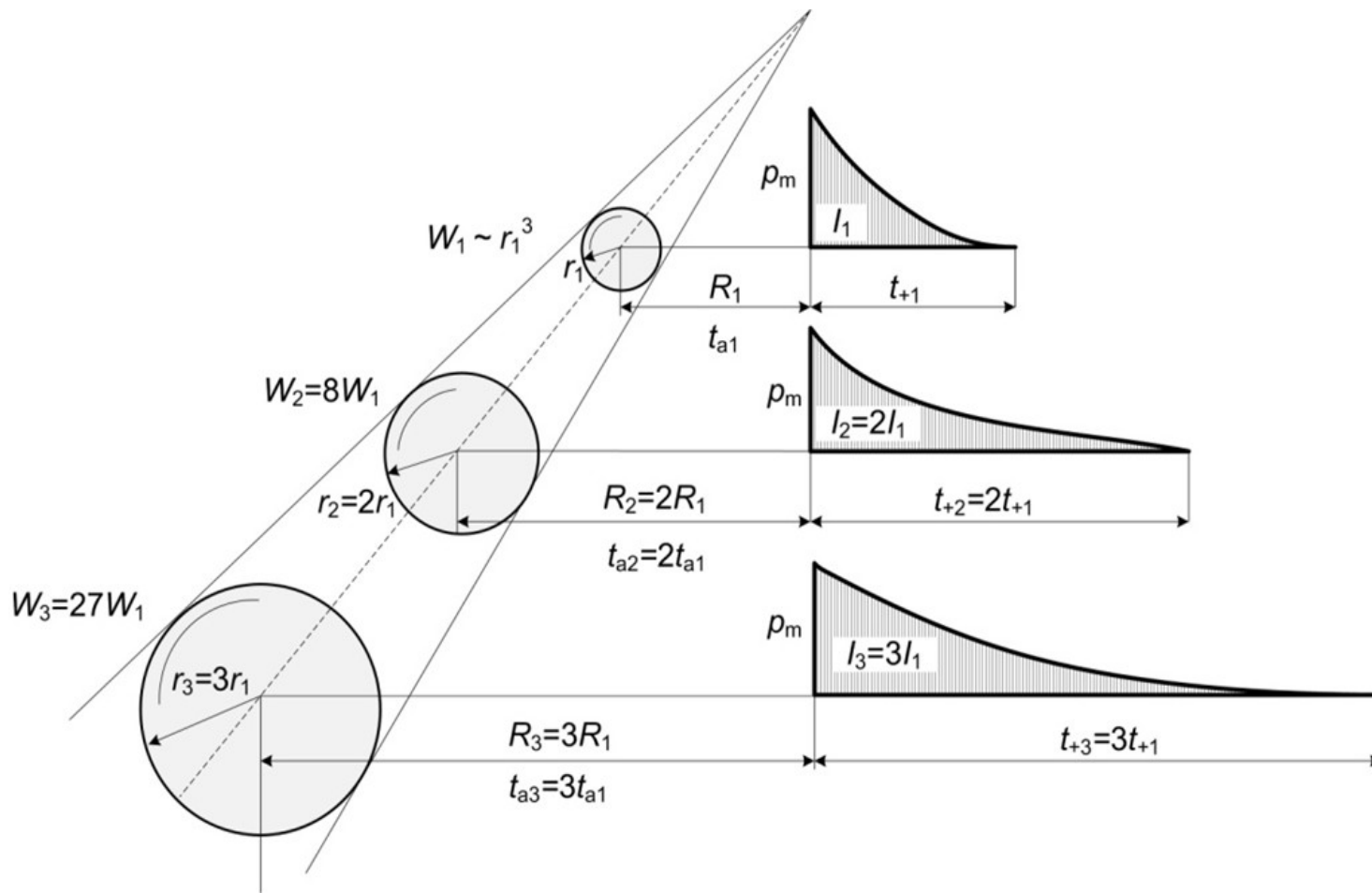
Određivanje parametara udarnog talasa



Eksperimentalno određena zavisnost normalizovane vrednosti maksimalnog natpritiska od skaliranog rastojanja od centra eksplozije Z , za hemijske i nuklearne eksplozije

Određivanje parametara udarnog talasa

- Uticaj povećanja radijusa rušućeg dejstva na promenu mase eksploziva i impuls pritiska



Određivanje parametara udarnog talasa

- Kada je poznat **maksimalni natpritisak** p_{\max} ostali važni parametri udarnog talasa mogu se odrediti na osnovu empirijskih jednačina:

- vreme dolaska udarnog talasa

$$t_a = \frac{1}{a_0} \int_{r_e}^R \frac{dR}{\left(1 + \frac{\kappa + 1}{2\kappa} \frac{p_{\max}}{p_0}\right)^{1/2}} = \frac{1}{a_0} \int_{r_e}^R \frac{dR}{\left(1 + \frac{6}{7} \frac{p_{\max}}{p_0}\right)^{1/2}}$$

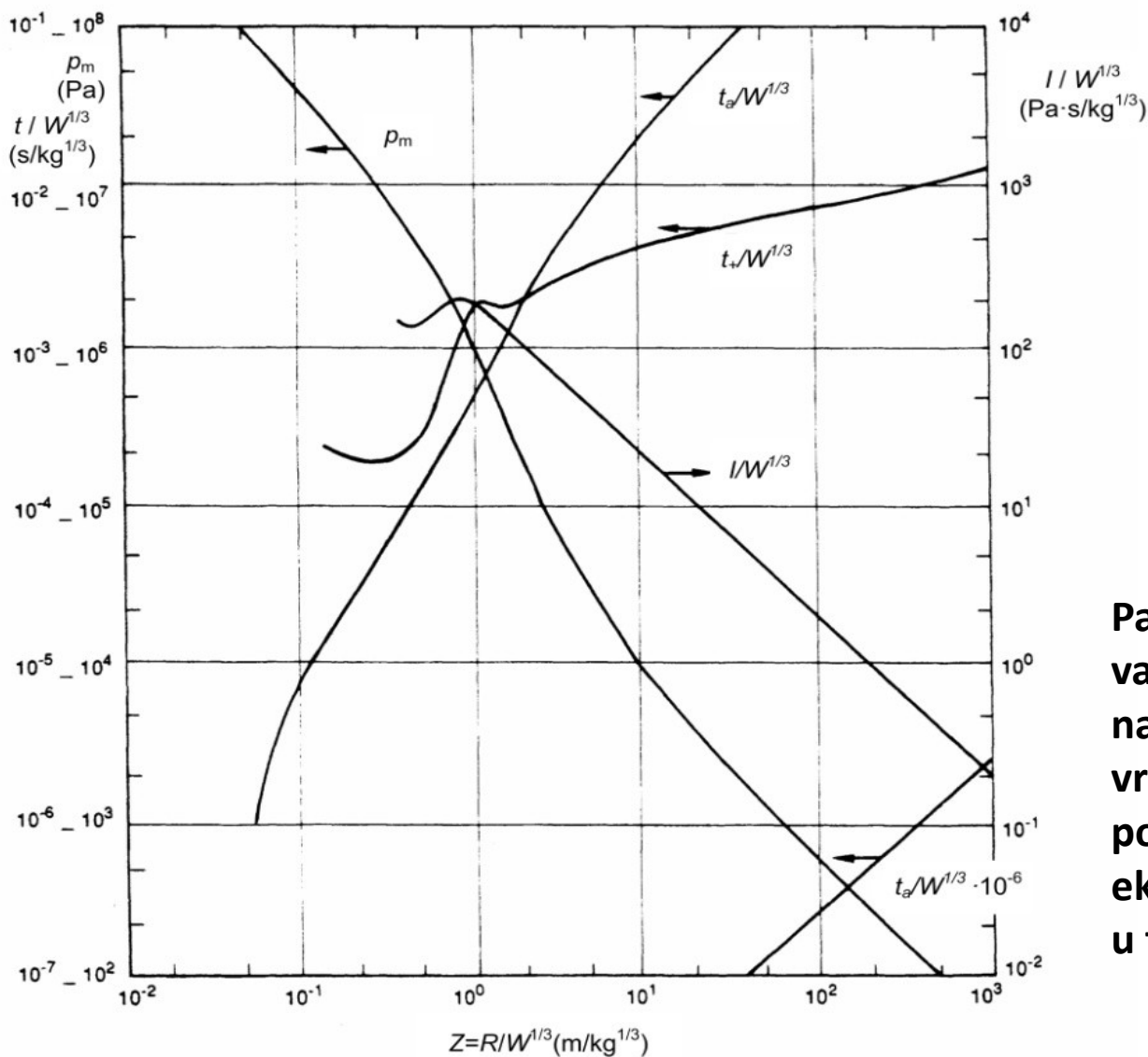
- vreme trajanja pozitivne faza natpritiska

$$\frac{t_+}{W^{1/3}} = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0,54}\right)^{10}\right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,02}\right)^3\right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0,74}\right)^6\right] \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6,9}\right)^2}}$$

- impuls natpritiska

$$\frac{I}{W^{1/3}} = \frac{0,067 \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,23}\right)^4}}{Z^2 \sqrt[3]{1 + \left(\frac{Z}{1,55}\right)^3}}$$

Određivanje parametara udarnog talasa



Parametri udarnog talasa u vazduhu (maksimalni natpritisak, impuls pritiska, vreme dolaska, vreme trajanja pozitivne faze) za sferna eksplozivna punjenja od TNT-a, u funkciji skaliranog rastojanja

Određivanje parametara udarnog talasa

- Kada je poznat **maksimalni nadpritisak** p_{\max} ostali važni parametri udarnog talasa mogu se odrediti na osnovu Rankine-Hugoniot-ovih jednačina:

- **Mach-ov broj udarnog talasa**

$$M_U = \sqrt{1 + \frac{\kappa + 1}{2\kappa} \frac{p_{\max}}{p_0}} = \sqrt{1 + \frac{6}{7} \frac{p_{\max}}{p_0}}$$

- **brzina udarnog talasa** U

$$U = \sqrt{\frac{6p_{\max} + 7p_0}{7p_0}} a_0$$

- **brzina vazduha (vetra) neposredno iza udarnog talasa**

$$u = \frac{2}{\kappa + 1} \frac{M_U^2 - 1}{M_U} a_0 = \frac{5}{6} \frac{M_U^2 - 1}{M_U} a_0$$

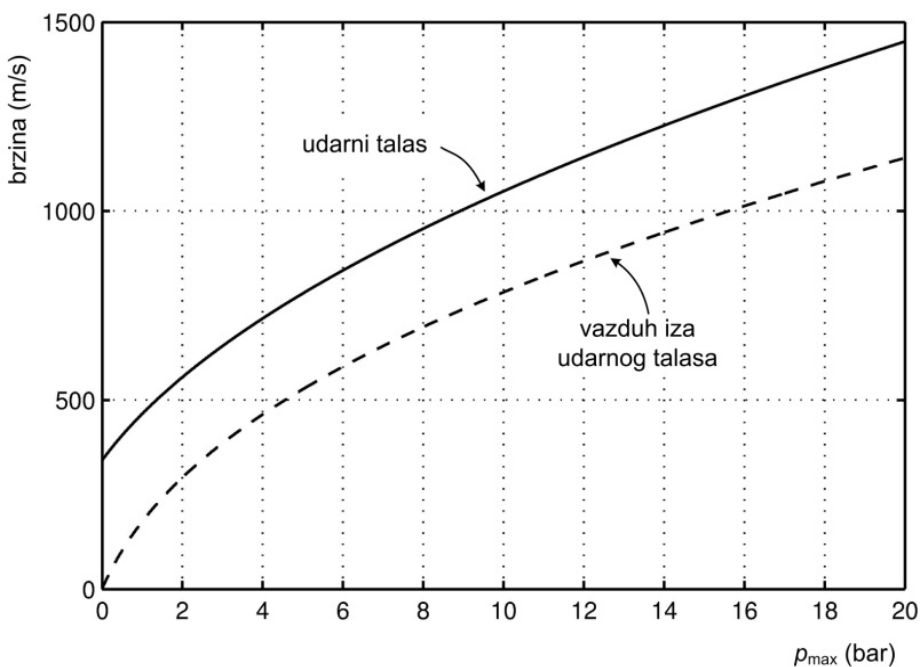
- **gustina vazduha neposredno iza udarnog talasa** ρ

$$\rho = \frac{6p_{\max} + 7p_0}{p_{\max} + 7p_0} \rho_0$$

- **maksimalni dinamički pritisak** q

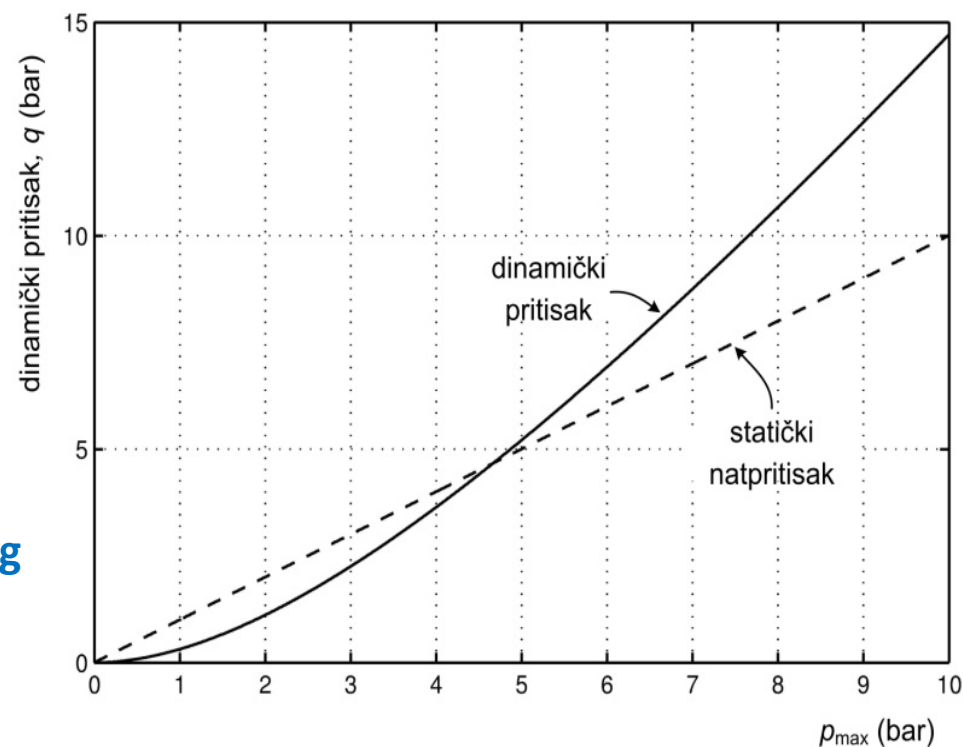
$$q = \frac{5p_{\max}^2}{2(p_{\max} + 7p_0)}$$

Određivanje parametara udarnog talasa



Brzina vazduha iza udarnog talasa u i brzina udarnog talasa U u zavisnosti od generisanog natpritiska p_{\max} , pri eksploziji u standardnoj atmosferi ($a_0=340$ m/s, $\kappa=1,4$)

Dinamički pritisak u funkciji maksimalnog statičkog natpritiska (za eksploziju u standardnoj atmosferi)



Površinske eksplozije

- svi prethodni izrazi odnose se na tzv. **sfernu eksploziju** u vazduhu
- u praksi su od velikog značaja i tzv. **površinske eksplozije**
- u tom slučaju ranije navedeni izrazi mogu se koristiti ako se energija eksplozije (odnosno masa eksploziva) uveća za određeni **faktor k_r**
 - uobičajeno se uzima da je $k_r = 1.8$
- Ovaj faktor može težiti maksimalnoj vrednosti 2, ukoliko površina predstavlja **idealan reflektor**, tj. ako nema formiranja kratera i snažnog udarnog talasa u tlu.
- Alternativno, na bazi eksperimentalnih rezultata **NEWMARK i HANSEN** su formulisali sledeću relaciju koja omogućava proračun maksimalnog natpritiska (u kPa) za slučaj eksplozije na površini tla:

$$p_{\max} = \frac{6784}{Z^3} + \frac{93}{Z^{3/2}}$$

Uticaj metalne obloge

- kada je eksplozivno punjenje **obloženo metalom** (kao npr. kod različitih tipova BG), deo toplote eksplozije troši se na ubrzavanje ove metalne obloge
- rušeće dejstvo ovakvog eksplozivnog punjenja mase M_E biće **ekvivalentno dejstvu određene mase neobloženog (golog) punjenja mase M_{BE}** , pri čemu je $M_{BE} \leq M_E$
- za cilindričnu metalnu oblogu mase M može se definisati **kritični radijus R_m** , pri kome dolazi do loma (fragmentacije) obloge, i odgovarajuća relativna deformacija:

$$\varepsilon_f = \frac{R_m - R_0}{R_0} = \frac{R_m}{R_0} - 1$$

- za **velike vrednosti relativne deformacije ε_f** dobija se:

$$k_f = \frac{M_{BE}}{M_E} = \frac{M_E}{2M + M_E}$$

- konačna formula za određivanje **merodavne ekvivalentne mase** eksplozivnog punjenja glasi:

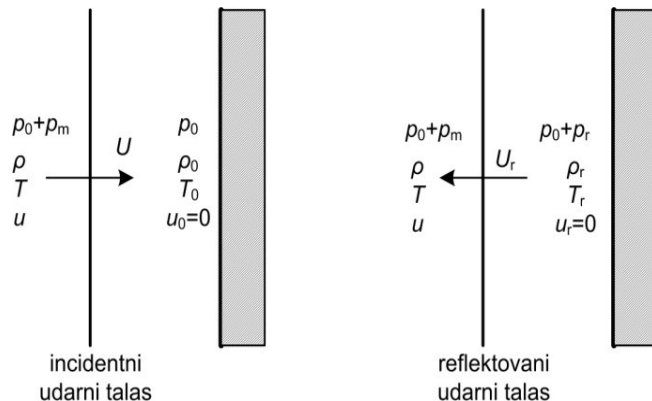
$$W' = q_{TNT} \cdot k_r \cdot k_f \cdot M_E$$

Interakcija udarnog talasa sa preprekom

- Kada udarni talas izazvan eksplozijom dođe u **kontakt sa čvrstom površinom** (preprekom), dolazi do njegovog **odbijanja** (refleksije) i **skretanja** (difrakcije)
- Najjednostavniji slučaj – normalna refleksija UT:
 - **beskonačan ravan kruti zid** na koji nailazi udarni talas pod nultim upadnim uglom
 - tada dolazi do odbijanja udarnog talasa pa je pritisak p_r u reflektovanom udarnom talasu **veći** od izvornog pritiska u upadnom udarnom talasu p_{\max} .
- Razmatranjem zakona održanja mase, količine kretanja i energije, **Rankine i Hugoniot** su izveli relacije koje omogućavaju određivanje parametara reflektovanog udarnog talasa.
- u slučaju nultog upadnog ugla i pretpostavke o politropskoj promeni stanja dobija se **pritisak u reflektovanom udarnom talasu**:

$$p_r = 2p_{\max} + (\gamma + 1)q$$

- pri čemu je q – dinamički pritisak upadnog udarnog talasa $q = \frac{1}{2}\rho u^2$



Normalna refleksija udarnog talasa pri nailasku na krutu nepokretnu prepreku

Interakcija udarnog talasa sa preprekom

- Može se pokazati da je brzina vazduha iza udarnog talasa određena izrazom

$$u = \frac{a_0 p_{\max}}{\gamma p_0} \left[1 + \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \frac{p_{\max}}{p_0} \right]^{-1/2}$$

- Kombinovanjem poslednje tri relacije dobija se konačan izraz na nadpritisak u reflektovanom udarnom talasu

$$p_r = 2p_{\max} \frac{7p_0 + 4p_{\max}}{7p_0 + p_{\max}}$$

- ako je maksimalni nadpritisak p_{\max} znatno manji od ambijentalnog atmosferskog pritiska p_0 (npr. eksplozija malog punjenja na velikom rastojanju od centra eksplozije), tada je

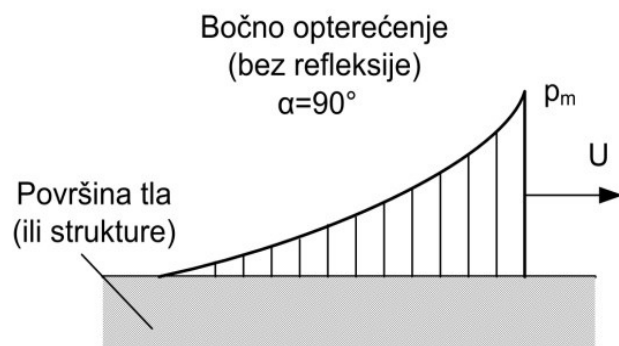
$$p_r = 2p_{\max}$$

- ako je p_{\max} mnogo veće od p_0 (npr. pri eksploziji snažnog punjenja na manjim rastojanjima), tada važi

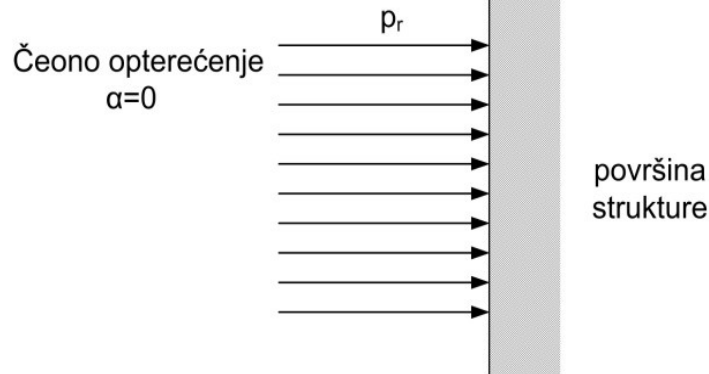
$$p_r = 8p_{\max}$$

Interakcija udarnog talasa sa preprekom

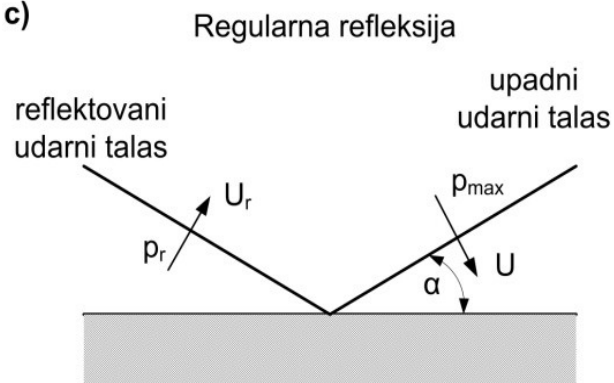
a)



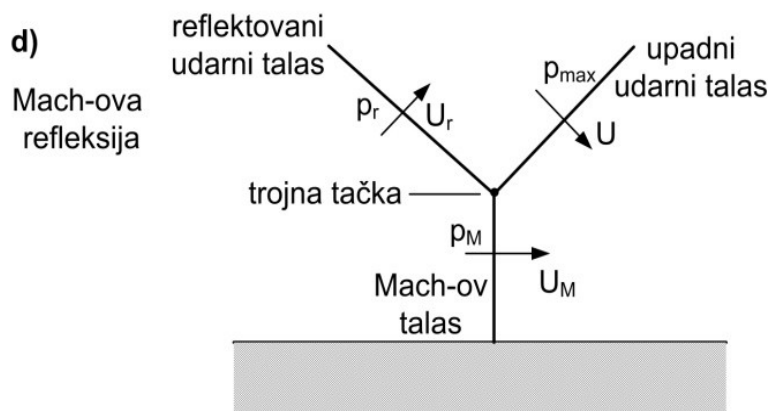
b)



c)



d)



Različiti vidovi refleksije udarnog talasa: a) bočna (nema refleksije), b) normalna (čeona), c) regularna i d) Mach-ova refleksija

Interakcija udarnog talasa sa preprekom

Kosa refleksija udarnog talasa

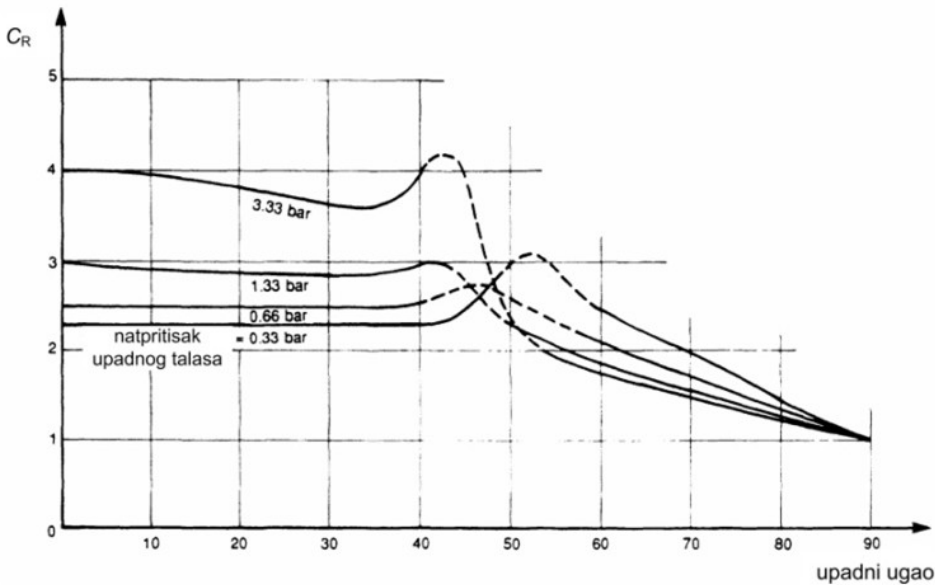
➤ *Regularna refleksija*

- pri malim upadnim uglovima α incidentnog udarnog talasa
- proces prividno podseća na odbijanje zvučnih talasa, pa otuda i termin "regularna" refleksija
- upadni ugao nije jednak odbojnom uglu i proces je generalno vrlo sličan normalnoj refleksiji
- za svaki gas postoji kritična vrednost upadnog ugla α pri kojoj je natpritisak u reflektovanom udarnom talasu p_r veći od natpritisaka p_r pri normalnoj refleksiji ($\alpha=0$).
 - za vazduh, ovaj ugao iznosi približno 40° .
- za svaku vrednost maksimalnog natpritisaka p_{\max} postoji granični, odnosno maksimalni upadni ugao pri kome dolazi do regularne refleksije.

➤ *MACHova refleksija*

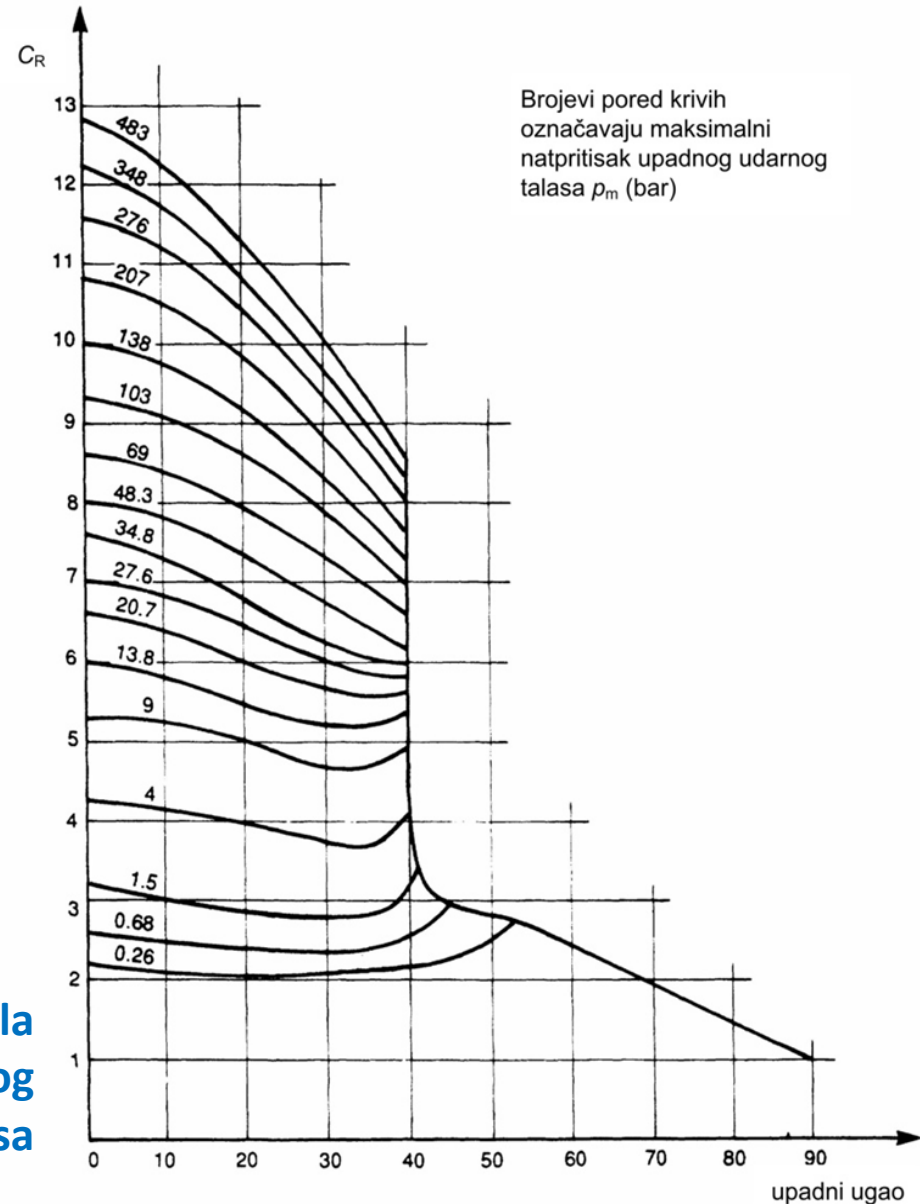
- kada upadni ugao incidentnog udarnog talasa pređe graničnu vrednost (koja zavisi od p_{\max}), dolazi do pojave tzv. *MACH*ove refleksije
- manifestuje se naglim porastom pritiska u reflektovanom talasu, usled toga što upadni talas "klizi" po reflektujućoj površini, a ne odbija se od nje kao u slučaju manjih upadnih uglova
- rezultat je interakcija reflektovanog talasa sa incidentnim talasom i njihovo spajanje, tj. formiranje trećeg udarnog talasa koji se naziva *MACH*ov udarni talas (ili *MACH*ovo stablo)
- tačka u kojoj se susreću tri pomenuta udarna talasa naziva se *trojna tačka*
- koeficijent refleksije ima maksimalnu vrednost u zoni tranzicionih upadnih uglova pri kojima otpočinje *MACH*ova refleksija
- sa daljim povećanjem upadnog ugla dolazi do smanjenja koeficijenta refleksije, koji konačno ima vrednost 1 pri upadnom uglu od 90° , što odgovara bočnom strujanju pri kome nema refleksije

Interakcija udarnog talasa sa preprekom

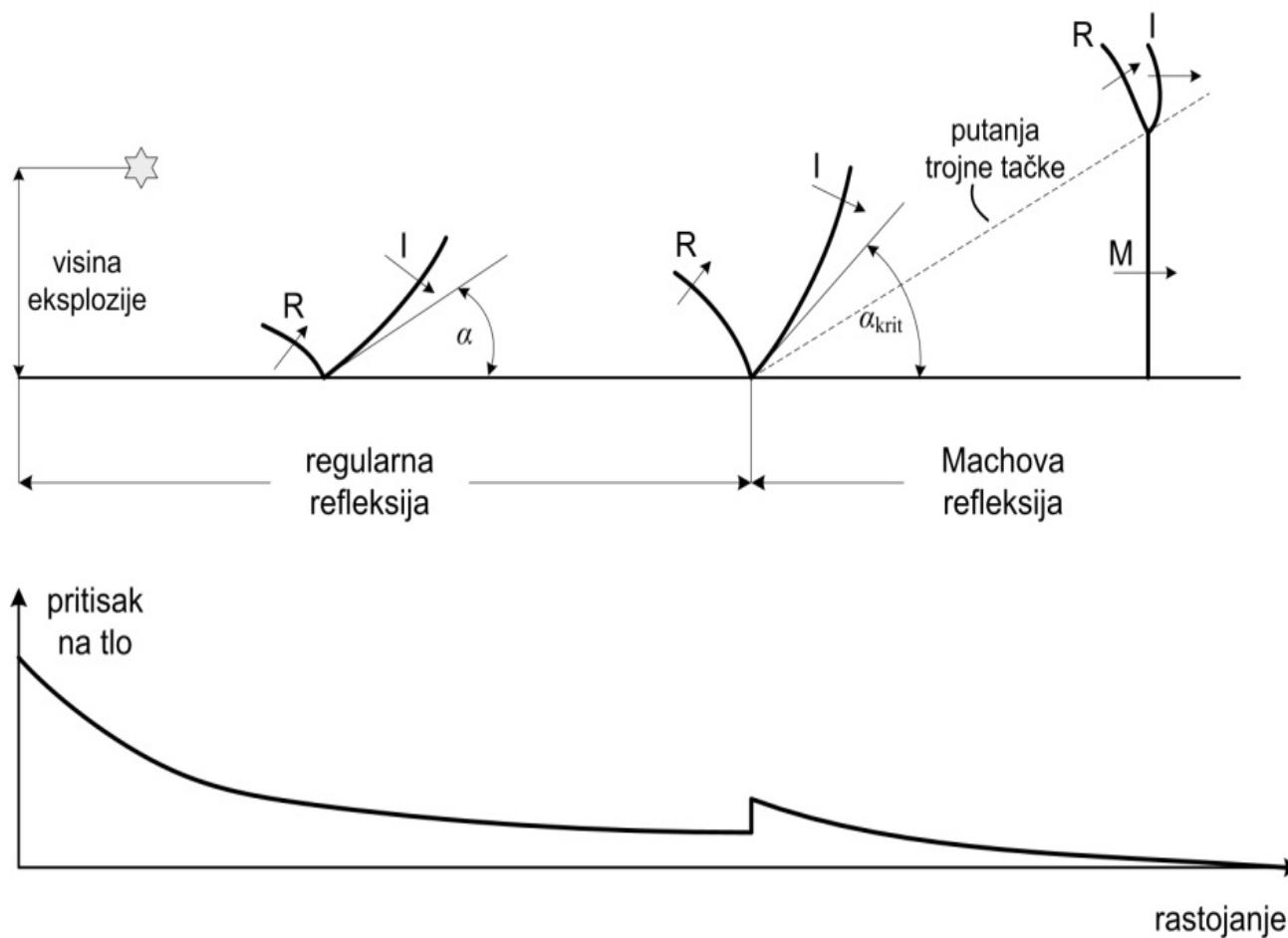


Koeficijent refleksije u funkciji upadnog ugla za male i umerene natpritiske incidentnog udarnog talasa

Koeficijent refleksije u funkciji upadnog ugla za širok domen natpritisaka incidentnog udarnog talasa



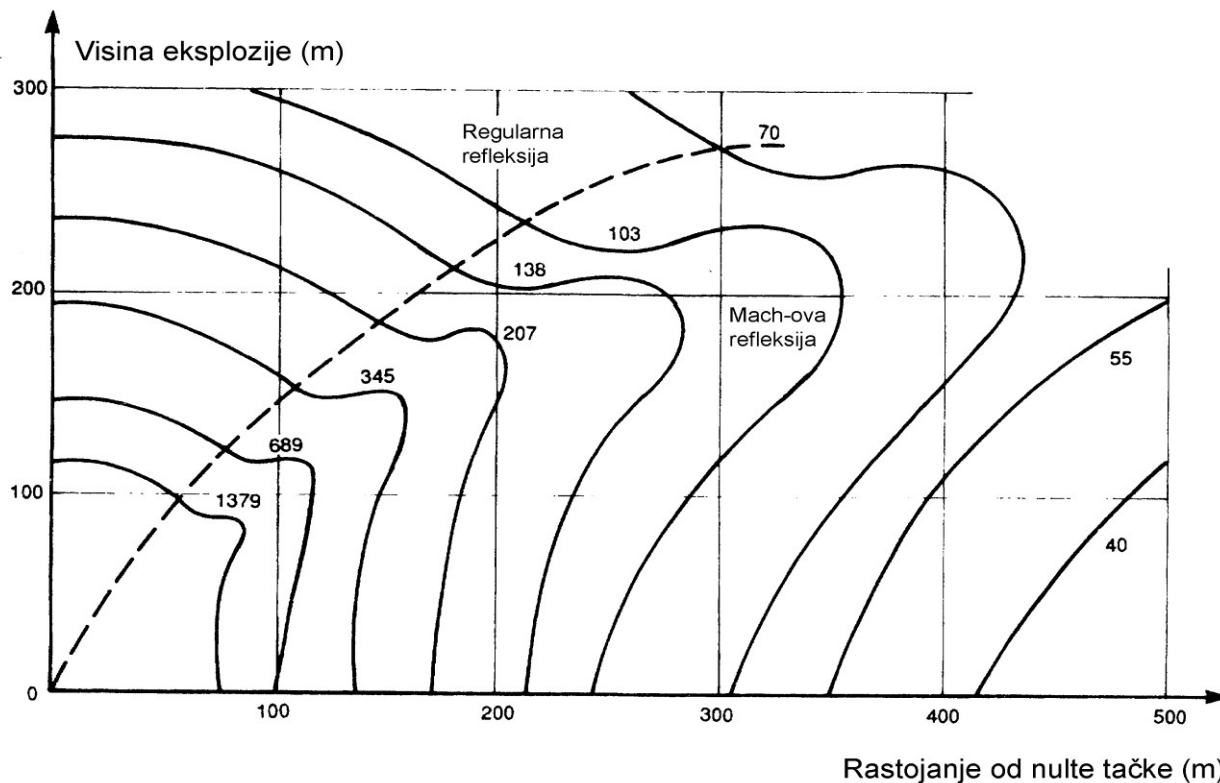
Interakcija udarnog talasa sa preprekom



Pojava **MACH**ovog talasa pri eksploziji na određenoj visini iznad tla i promena natpritiska na tlu sa porastom rastojanja od projekcije centra eksplozije

Interakcija udarnog talasa sa preprekom

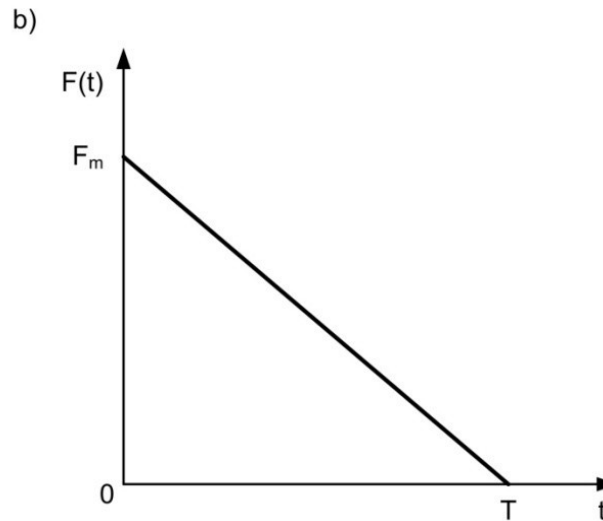
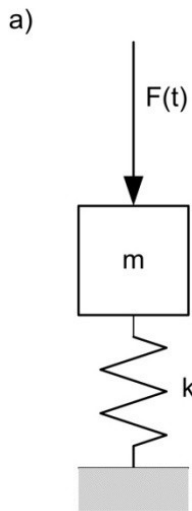
- Proučavanje Mach-ove refleksije značajno je prvenstveno sa aspekta efekata eksplozije **na određenoj visini iznad tla**, kao i eksplozija u zatvorenom prostoru



Vrednosti nadpritiska (u kPa) na tlu pri nuklearnoj eksploziji od 1 kt u zavisnosti od visine aktiviranja bombe i udaljenosti od nulte tačke (projekcija centra eksplozije na tlo)

Delovanje udarnog talasa

- **Rušeći efekat** - delovanje udarnog talasa na različite strukture - vrlo složen fenomen koji podrazumeva:
 - određivanje vremenske promene pritiska na razmatranoj strukturi,
 - modeliranje deformisanja same strukture u uslovima velikih deformacija i velikih brzina deformacija, odnosno nelinearnog ponašanja materijala.
- Proračun strukture u ovim uslovima moguć je samo **primenom numeričkih metoda**.
- Jednostavna **idealizacija sistema** – analitički pristup



Struktura pod dejstvom udarnog talasa:

a) model sa jednim stepenom slobode, b) promena opterećenja sa vremenom

Delovanje udarnog talasa

- **sila** koja opterećuje strukturu

$$F(t) = F_m \left(1 - \frac{t}{T} \right)$$

- **impuls pritiska** udarnog talasa ima vrednost

$$I = \frac{1}{2} F_m T$$

- **jednačina kretanja** sistema sa jednim stepenom slobode

$$m \ddot{x} = F_m \left(1 - \frac{t}{T} \right)$$

- **opšte rešenje** prethodne diferencijalne jednačine je

$$y(t) = \frac{F_m}{k} (1 - \cos \omega t) + \frac{F_m}{kT} \left(\frac{\sin \omega t}{\omega} - t \right)$$

- pri čemu je **ω sopstvena kružna učestanost** strukture

$$\omega = \frac{2\pi}{T_S} = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Delovanje udarnog talasa

- Parametar koji definiše karakter opterećenja je **odnos trajanja pozitivne faze impulsa T i sopstvenog perioda oscilovanja strukture T_s** , odnosno proizvod ωT
- Važna karakteristika sistema je i tzv. **faktor dinamičkog opterećenja**

$$f = \frac{y_m}{y_{st}} \qquad y_{st} = \frac{F_m}{k}$$

- Razlikujemo **tri** režima opterećenja strukture:
 1. **Kvazistatički režim** podrazumeva da je vreme trajanja opterećenja značajno veće od sopstvenog perioda oscilovanja strukture $\omega T > 40$

$$f_{qs} = \left(\frac{y_m}{y_{st}} \right)_{qs} = 2$$

- Iz poslednjeg izraza je jasno da deformisanje strukture zavisi **samo od** maksimalne sile F_m , **odnosno maksimalnog pritiska p_m** i krutosti strukture.

Delovanje udarnog talasa

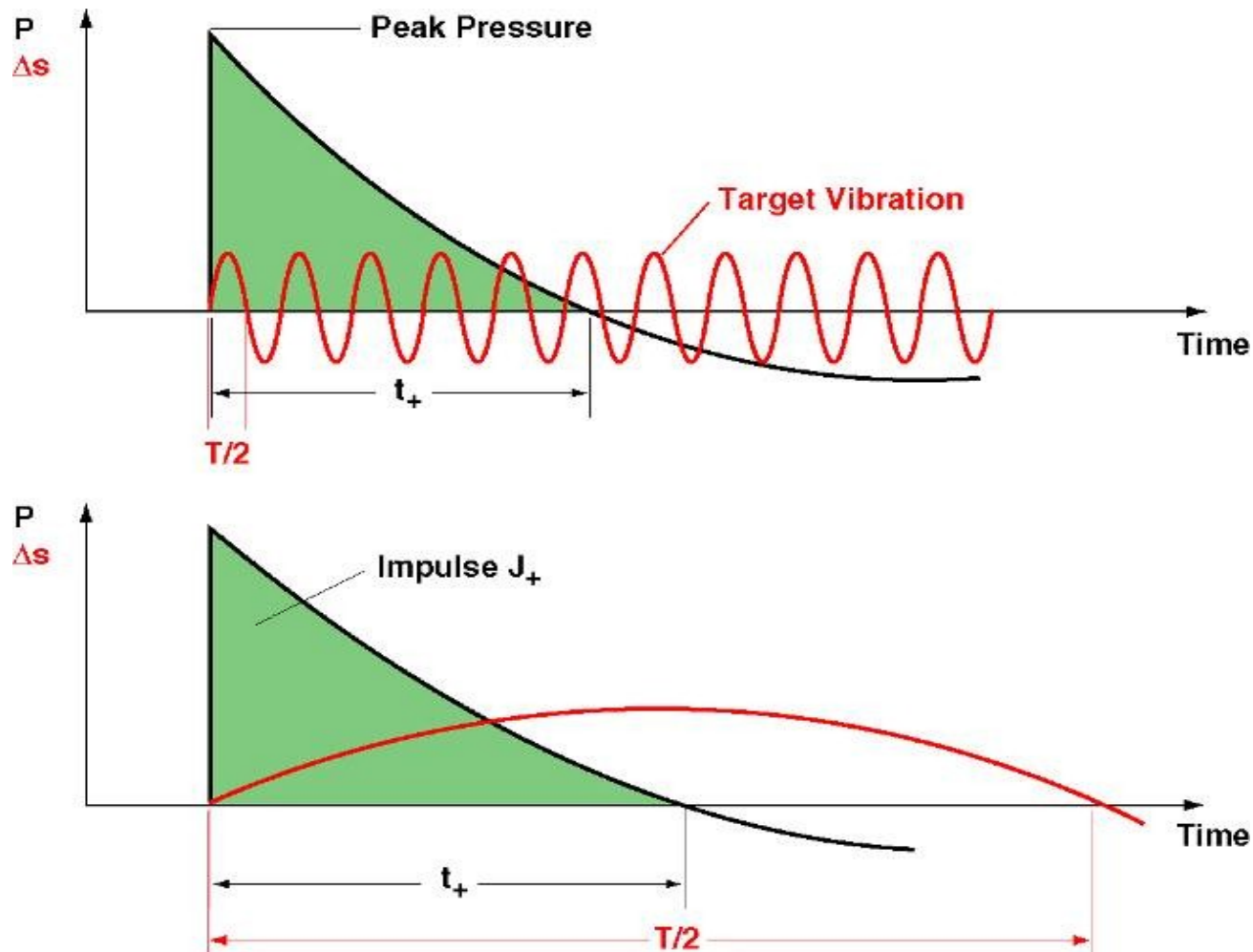
2. **Impulsni režim** implicira da je vreme trajanja opterećenja (impulsa) znatno manje od perioda oscilacija strukture $\omega T < 0.4$

- pokazuje se da važi

$$f_{imp} = \left(\frac{y_m}{y_{st}} \right)_{imp} = \frac{\omega T}{2} \quad y_m = \frac{F_m}{2k} \omega T = \frac{I \omega}{k}$$

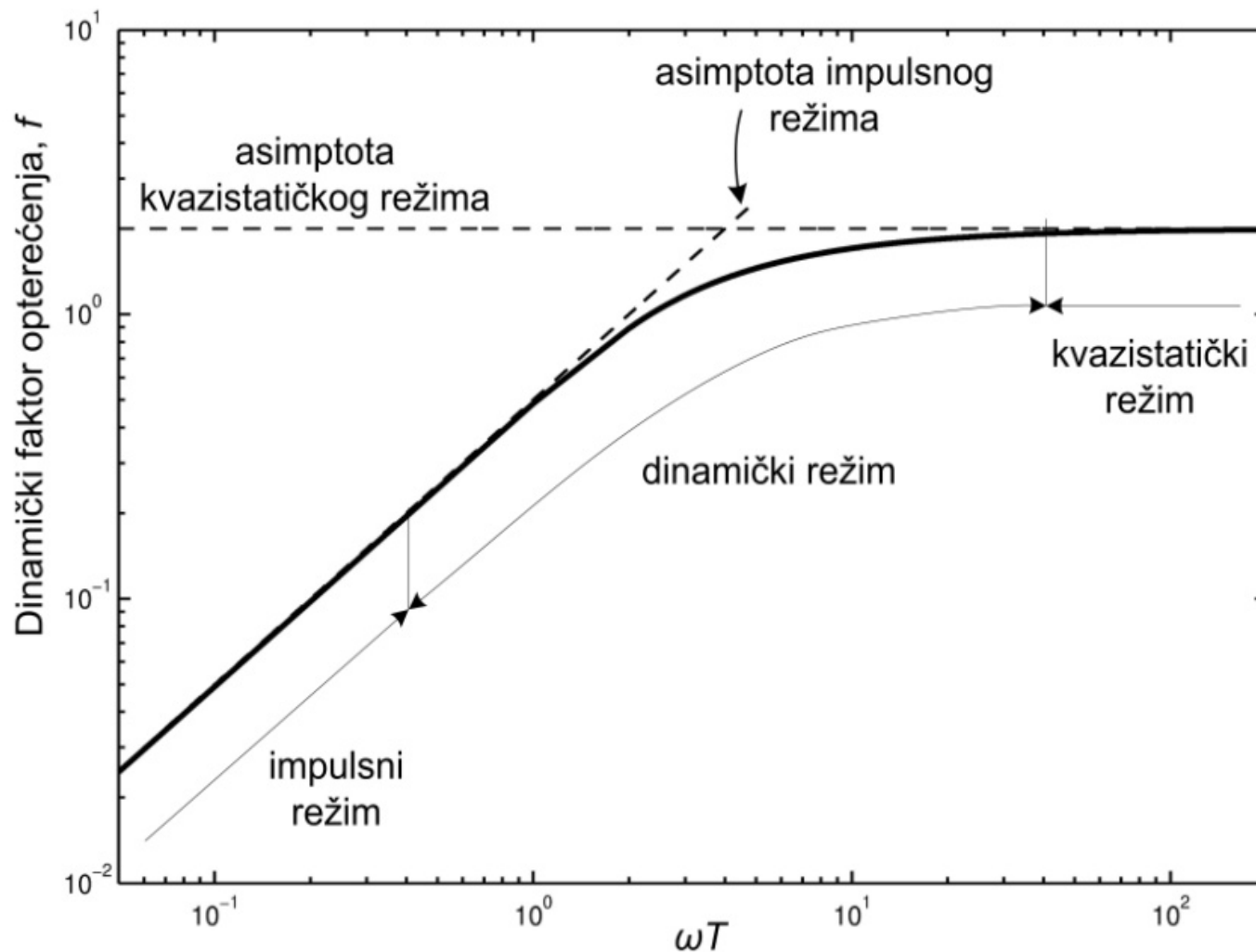
- vidi se da najveće pomeranje zavisi od **impulsa sile** (odnosno pritiska), kao i od krutosti i mase strukture
3. **Dinamički režim** podrazumeva prelaznu oblast - vreme trajanja opterećenja i period sopstvenih oscilacija strukture su istog reda veličine $0.4 < \omega T < 40$
- Za razliku od prethodna dva asimptotska režima, u ovom slučaju nije moguće jednostavno odrediti dinamički faktor opterećenja koji zavisi **i od pritiska i impulsa pritiska**.

Delovanje udarnog talasa



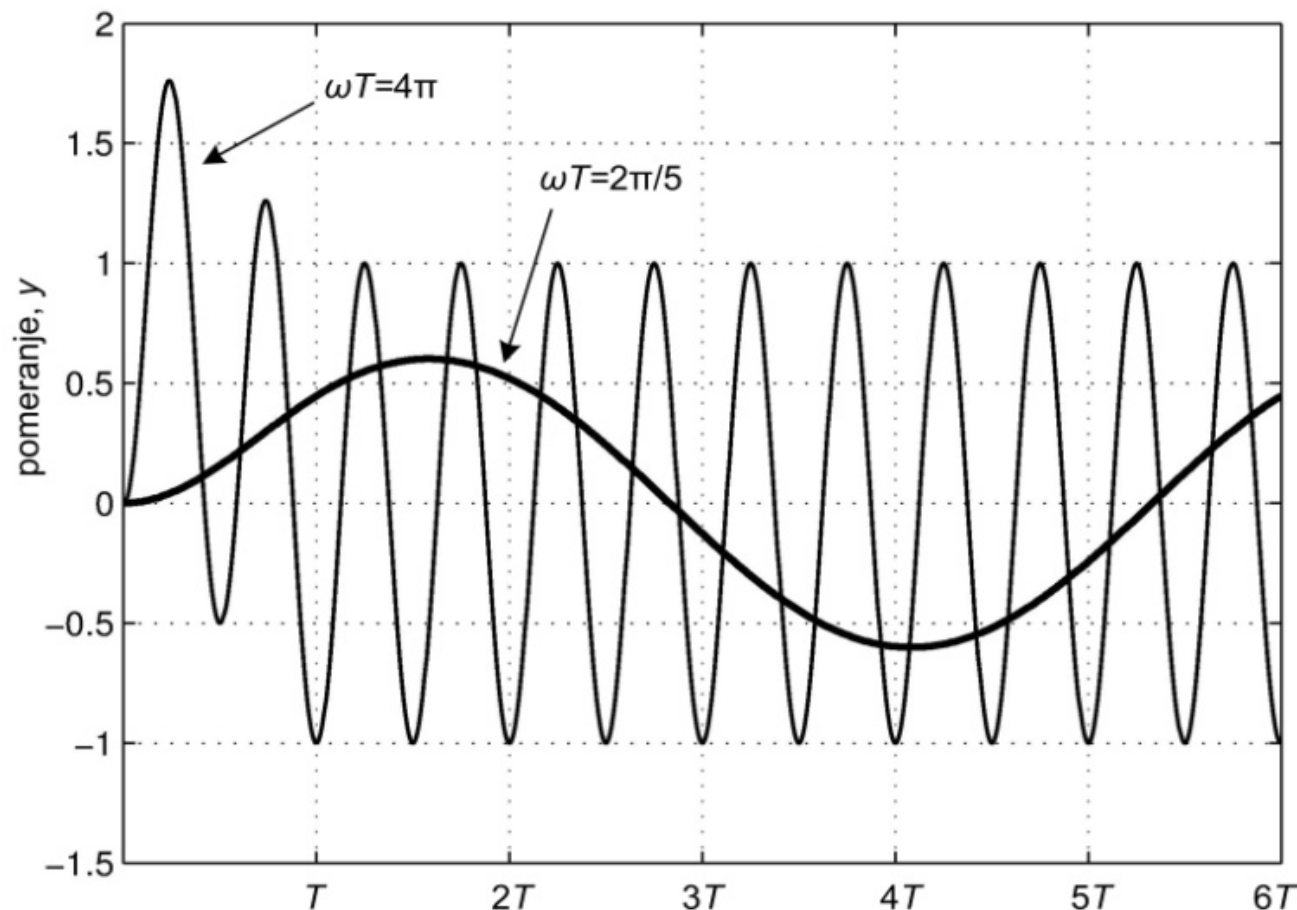
Vreme trajanja pozitivne faze opterećenja i period sopstvenih oscilacija strukture: a) kvazistatičko opterećenje, b) impulsno opterećenje

Delovanje udarnog talasa



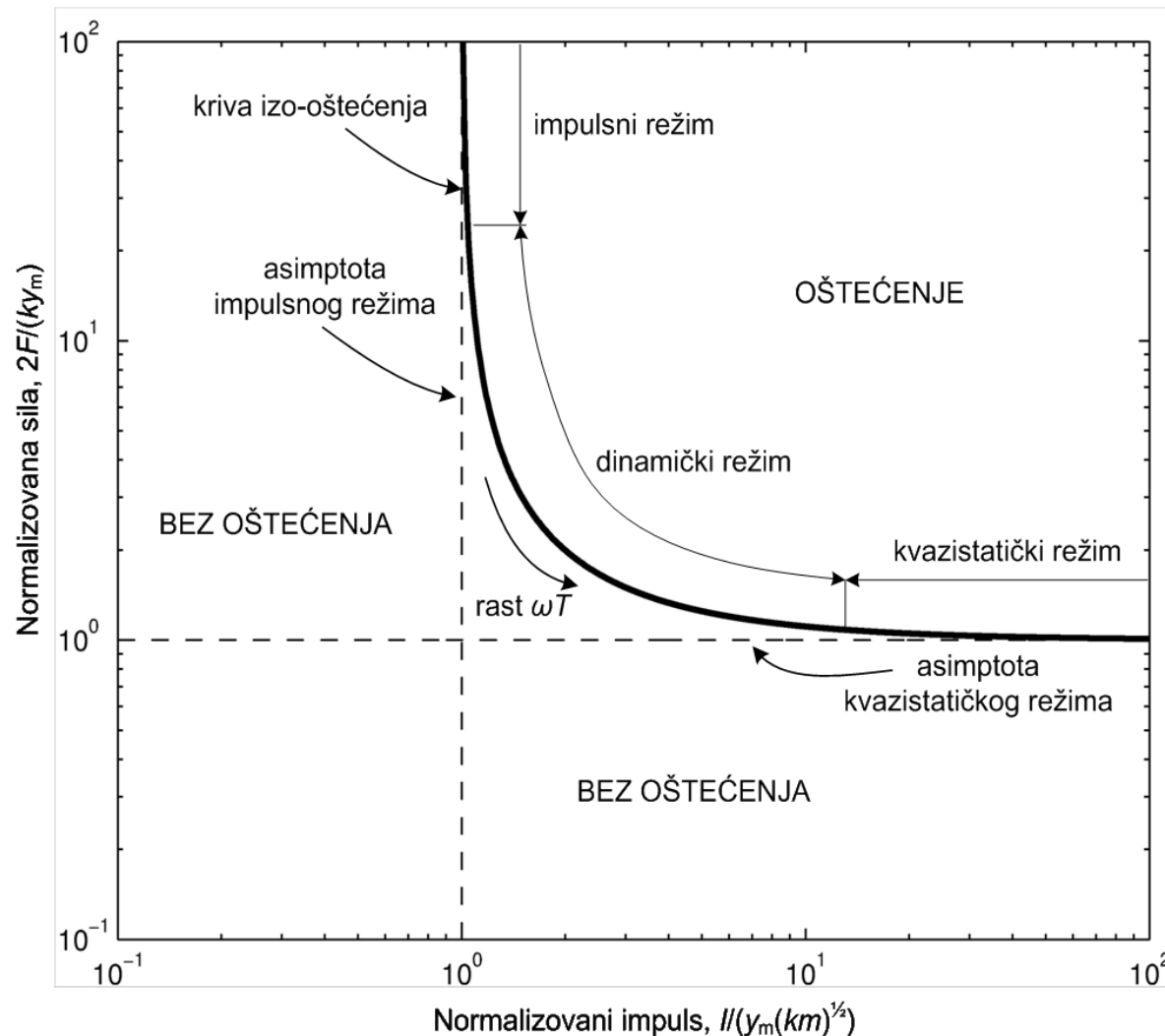
Zavisnost dinamičkog faktora opterećenja od parametra sistema ωT i režimi opterećenja strukture

Delovanje udarnog talasa



Odgovor sistema sa jednim stepenom slobode na idealizovano opterećenje usled nailaska udarnog talasa. Prikazana je vremenska promena pomeranja za sistem blizak kvazistatičkom režimu ($\omega T = 4\pi$) i impulsnom režimu ($\omega T = 2\pi/5$) opterećenja

Delovanje udarnog talasa



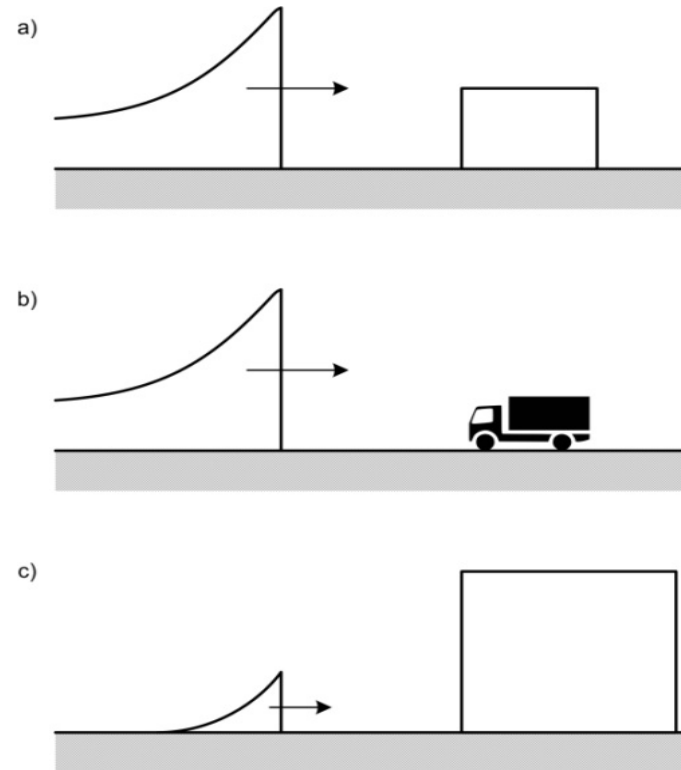
Kriva izo-oštećenja koja razdavaja zonu oštećenja strukture i zonu bez oštećenja

Mehanizmi oštećenja pri rušecem dejstvu

- Zavisno od mesta eksplozije, udarni talas može da optereti određenu strukturu **spolja ili iznutra**
- **Tip opterećenja** strukture zavisi: od veličine strukture i njenog rastojanja od centra eksplozije, orijentacije u odnosu na pravac prostiranja UT, trajanja UT, graničnih uslova i sl.

Tri osnovna tipa spoljašnjeg opterećenja strukture:

- Opterećenje **difrakcionog tipa**: snažan ravan UT koji deluje na masivnu strukturu velikih dimenzija (npr. zgrada); cela struktura biva "prekrivena" UT i izložena dejstvu natpritiska, koji može da dovede do njenog oštećenja
- UT koji deluje na pokretnu strukturu manjih dimenzija (npr. vozilo) izaziva opterećenje **aerodinamičkog tipa**; UT ponovo obuhvata celu strukturu, ali glavna oštećenja nastaju kao posledica translatornog kretanja strukture usled snažnog opterećenja
- **Lokalno opterećenje**: manje eksplozivno punjenje i slabiji UT koji deluje na strukturu velikih dimenzija; u ovom slučaju neophodno je posebno razmatrati opterećenje različitih delova strukture, uzimajući u obzir značajne razlike u osobinama udarnog talasa koji napada pojedine elemente strukture.



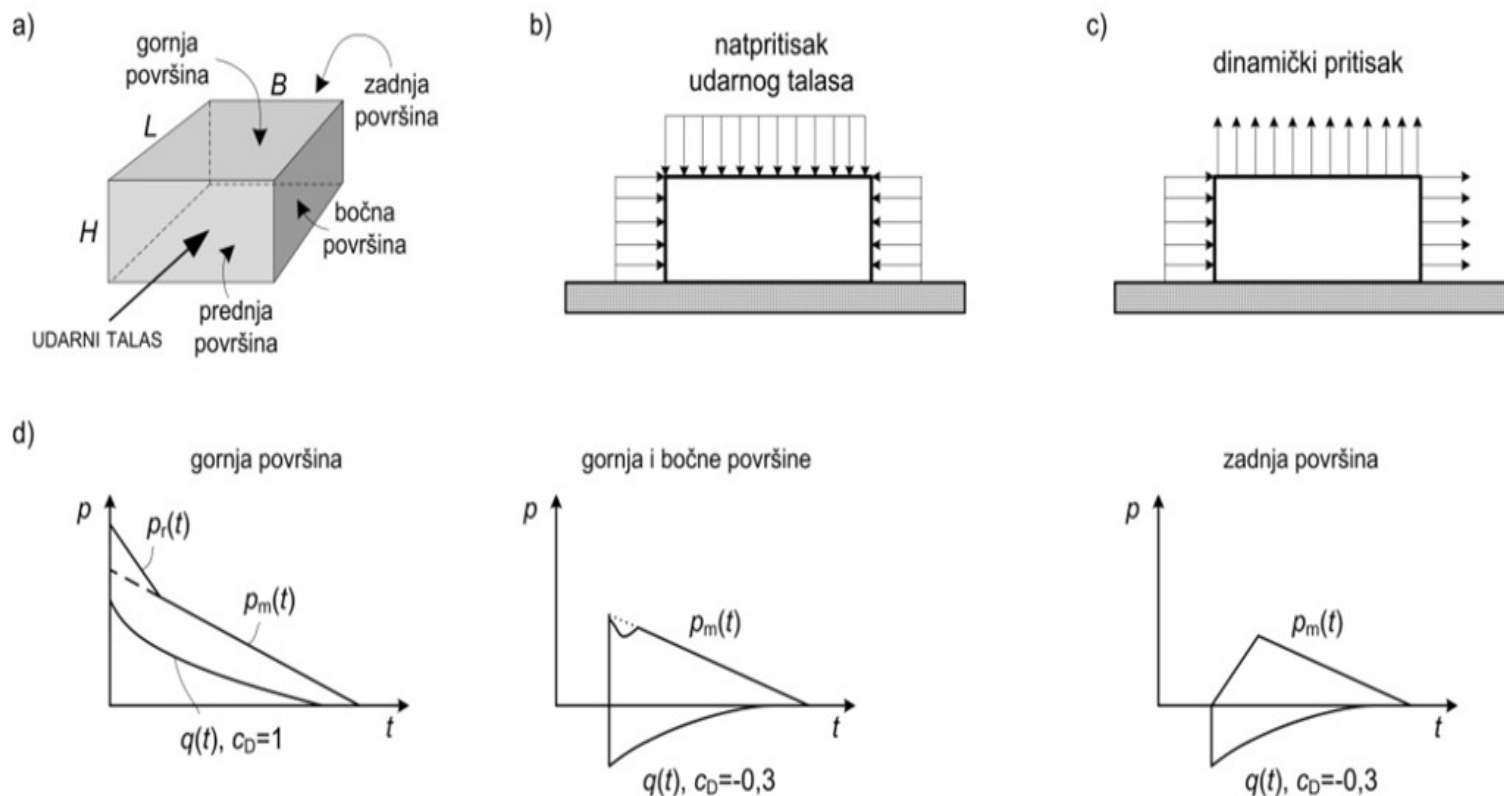
Spoljašnje opterećenje strukture:

- a) **difrakcioni tip opterećenja**
- b) **aerodinamički tip opterećenja**
- c) **lokalno opterećenje**

Mehanizmi oštećenja pri rušecem dejstvu

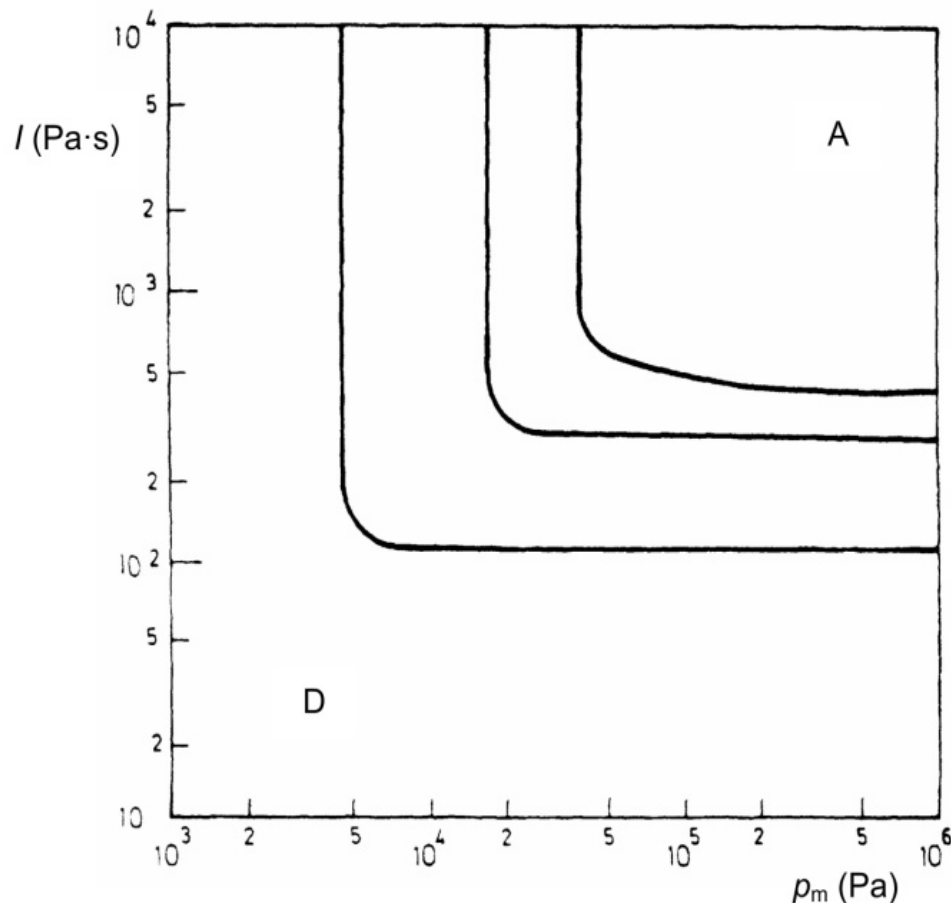
- difrakcioni tip opterećenja za slučaj strukture oblika paralelopipeda
- merodavni natpritisak se u opštem slučaju određuje iz sledeće relacije:

$$P(t) = p + c_D q$$



Spoljašnje dejstvo udarnog talasa: a) izgled jednostavne strukture u obliku kvadra, b) delovanje natpritiska na spoljašnost strukture, c) delovanje dinamičkog pritiska, d) vrednosti opterećenja na svaku od površina strukture

Mehanizmi oštećenja pri rušecem dejstvu



P-I dijagram koji definiše oštećenja manjih zgrada usled rušecog dejstva

Kategorija A - praktično potpuno uništenje

Kategorija B - veoma veliko oštećenje koje zahteva rušenje objekta; 50%-75% spoljašnjih zidova uništeno

Kategorija C_b - zgrada je privremeno nepodesna za boravak; delimično urušavanje krova i jednog do dva spoljašnja zida; neophodna popravka noseće strukture

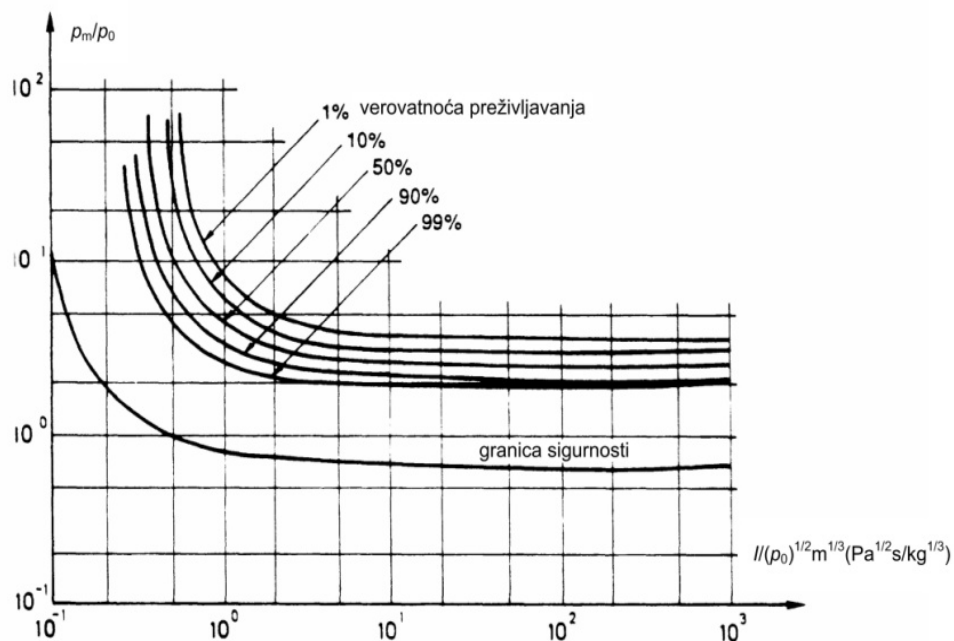
Kategorija C_a - manja strukturna oštećenja, ali dovoljna da objekat bude privremeno nepodesan za boravak; pregrade i stolarija izbačeni iz ležišta

Kategorija D - neophodne popravke, ali je objekat bezbedan za boravak; oštećenja krova i stakala

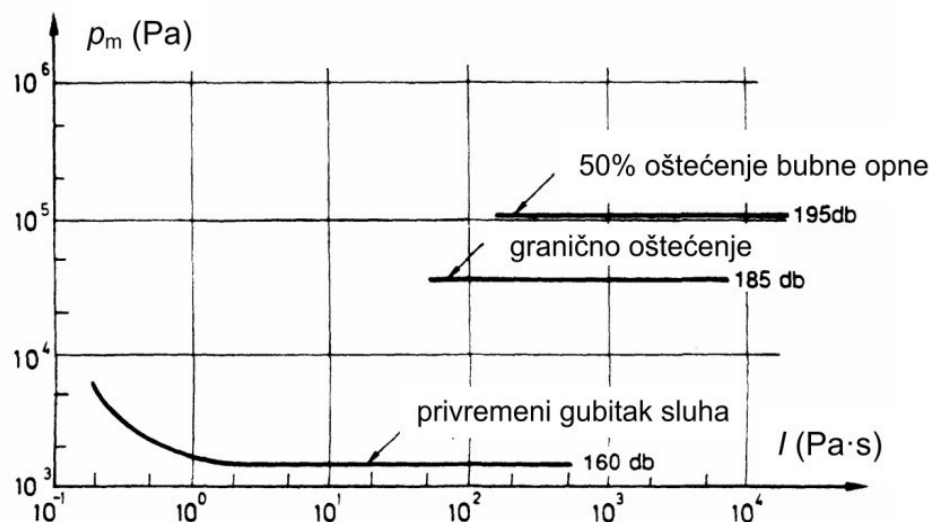
Delovanje udarnog talasa na čoveka

- Mogu se identifikovati **četiri tipa** povreda koje nastaju usled delovanja UT:
 - **Primarne povrede** nastaju kao direktna posledica dejstva natpritiska, odnosno odgovarajućeg impulsa. Ove povrede nastaju odmah po nailasku udarnog talasa, a njihov stepen može značajno da zavisi od položaja čoveka u odnosu na udarni talas, kao i od konstitucije, starosne dobi i sl. Najozbiljnije povrede su karakteristične za organe sa velikim razlikama gustina susednih tkiva. Stoga su najčešće povrede pluća, ušiju, grla, disajnih puteva i abdominalne šupljine
 - **Sekundarne povrede** nastaju kao posledica udara i penetracije “projektila” koji su formirani usled eksplozije (fragmentacija metalnih struktura, građevinskog materijala, stakla itd.)
 - **Tercijarne povrede** su indirektna posledica rušućeg dejstva u smislu da nastaju usled pomeranja celog tela (koje može biti izazvano snažnim udarnim talasom), posledičnog pada i udara.
 - **Kvaterne povrede**: U ovu grupu povreda svrstavaju se sve moguće posledice rušućeg dejstva koje ne pripadaju nekoj od tri prethodno pomenute kategorije. Ovde prvenstveno imamo u vidu moguće opekotine, trovanje gasovima i sl.

Delovanje udarnog talasa na čoveka



P-I dijagram za oštećenje pluća usled delovanja udarnog talasa



P-I dijagram koji opisuje oštećenje bubne opne pri delovanju udarnog talasa

Delovanje udarnog talasa na čoveka

- **Primer:** delovanje udarnog talasa, koji predstavlja rezultat detonacije 27 kg TNT-a, na čoveka mase 70 kg koji se nalazi na rastojanju od 3 m od centra eksplozije.
- Lako se određuje **skalirano rastojanje** $Z=1 \text{ m/kg}^{1/3}$
- **natpritisak** = 9 bar, **impuls** = 480 Pas
- normalizovane vrednosti:
 - **natpritisak**= 8,91 i **impuls**= 0,366.
- Prema P-I dijagramu koji pokazuje **stepen oštećenja pluća**, verovatnoća preživljavanja je 99%
- Pokazuje se da je **verovatnoća pucanja bubne opne** nešto veća od 50%
- Ovo potvrđuje tezu o **visokoj otpornosti čoveka** na primarno delovanje udarnog talasa.
- Praksa pokazuje da su **indirektni efekti eksplozije** (tj. sekundarni, tercijarni i kvaterni) glavni uzroci povreda čoveka.

Rušeće dejstvo pri detonaciji u tlu

- U slučaju **površinskih eksplozija**, kao i eksplozija iznad površine tla, dolazi do prenosa dela energije na podlogu.
 - kod površinskih eksplozija utvrđeno je da se oko **1/3 energije prenese na tlo**
 - pri visini centra eksplozije koja odgovara dvostrukom radijusu EP, na tlo se prenese **samo oko 2% energije**
 - dakle, i u ovim slučajevima dolazi do deformisanja tla, ali je ono neuporedivo manje nego u slučaju podzemnih eksplozija, kada se u tlu formira rupa, koju nazivamo **krater**
- Posle detonacije na određenoj dubini dolazi do **formiranja šupljine u tlu** koju ispunjavaju gasoviti PD:
 - oni se naglo **šire i pomeraju, sabijaju, deformišu i rastresaju** okolno tlo
 - istovremeno se generiše **udarni talas** koji se širi sferno
 - **kretanje UT naviše**, ka površini tla, izaziva najpre izbacivanje zemljišta naviše usled **spallinga**
 - **talas razređenja** koji se kreće u suprotnom smeru, ka centru eksplozije, interaguje sa gasovitim PD u šupljini čija se zapremina povećava
 - to dovodi do izbacivanja dela zemljišta (koje se nalazi iznad šupljine) naviše i **stvaranja kratera**
- ako je centar eksplozije **na suviše velikoj dubini**, PD nemaju dovoljnu energiju da izbace veliku masu tla iznad šupljine, pa **ne dolazi do formiranja kratera**
- za određeno EP postoji optimalna dubina pri kojoj formirani krater ima **maksimalnu zapreminu**

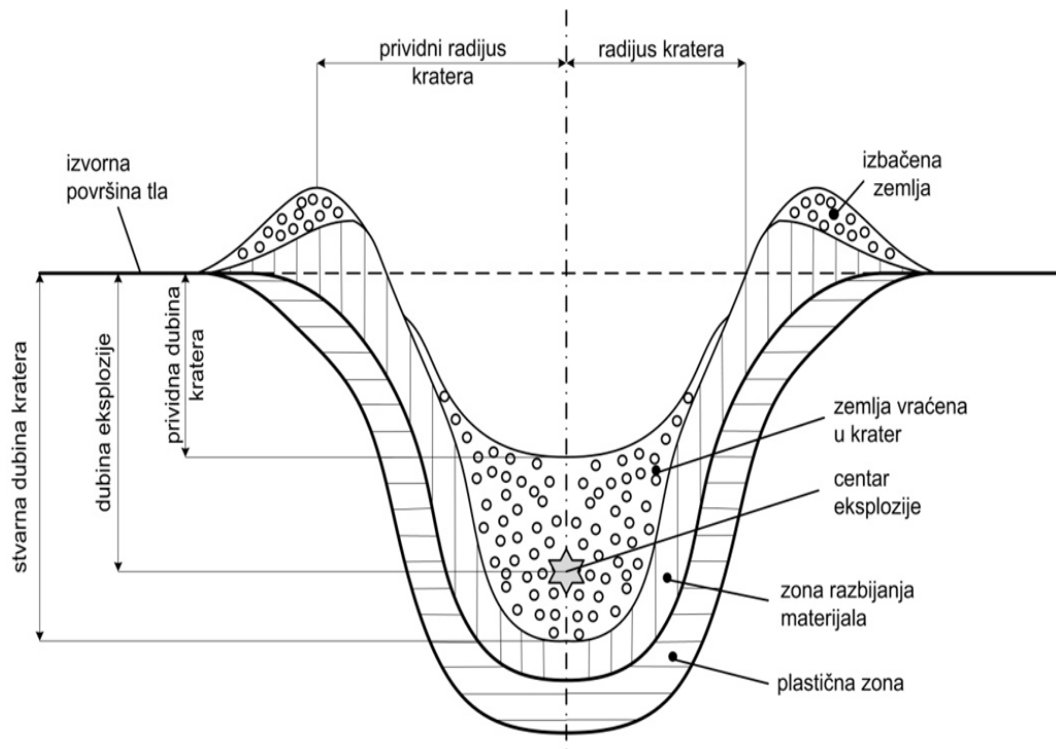
Rušeće dejstvo pri detonaciji u tlu

- Kvantitativna ocena rušućeg dejstva donosi se na osnovu **dimenzija kratera**

$$L_k = C_k \sqrt[3]{\frac{m_E}{K}}$$

- C_k - koeficijent koji zavisi od dubine h eksplozije od tla i mase eksplozivnog punjenja
- m_E - masa eksplozivnog punjenja (kg)
- K - koeficijent koji zavisi od prirode tla
- Odnos L_k/h određuje **karakter kratera**:
 - za $(L_k/h) > 1.25$, u krateru ostaje manji deo razorene sredine (**otvoreni krater**)
 - za $(L_k/h) < 1.1$, krater je ispunjen razorenom sredinom (tzv. **zatvoreni krater**)
 - za $(L_k/h) < 1.0$, dobija se tzv. **kamuflet**

Izgled i geometrijske karakteristike kratera formiranog posle detonacije u tlu



Rušeće dejstvo pri detonaciji u tlu

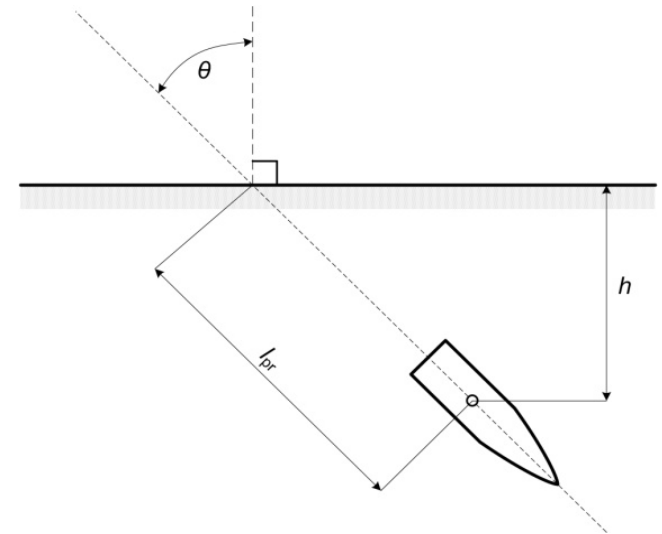
- *Prodiranje projektila u tlo*
- **Berezanska formula** (za teren) daje ukupnu dužinu prodiranja projektila:

$$l_p = \lambda k_p \frac{m}{d^2} V_C$$

Ovde je:

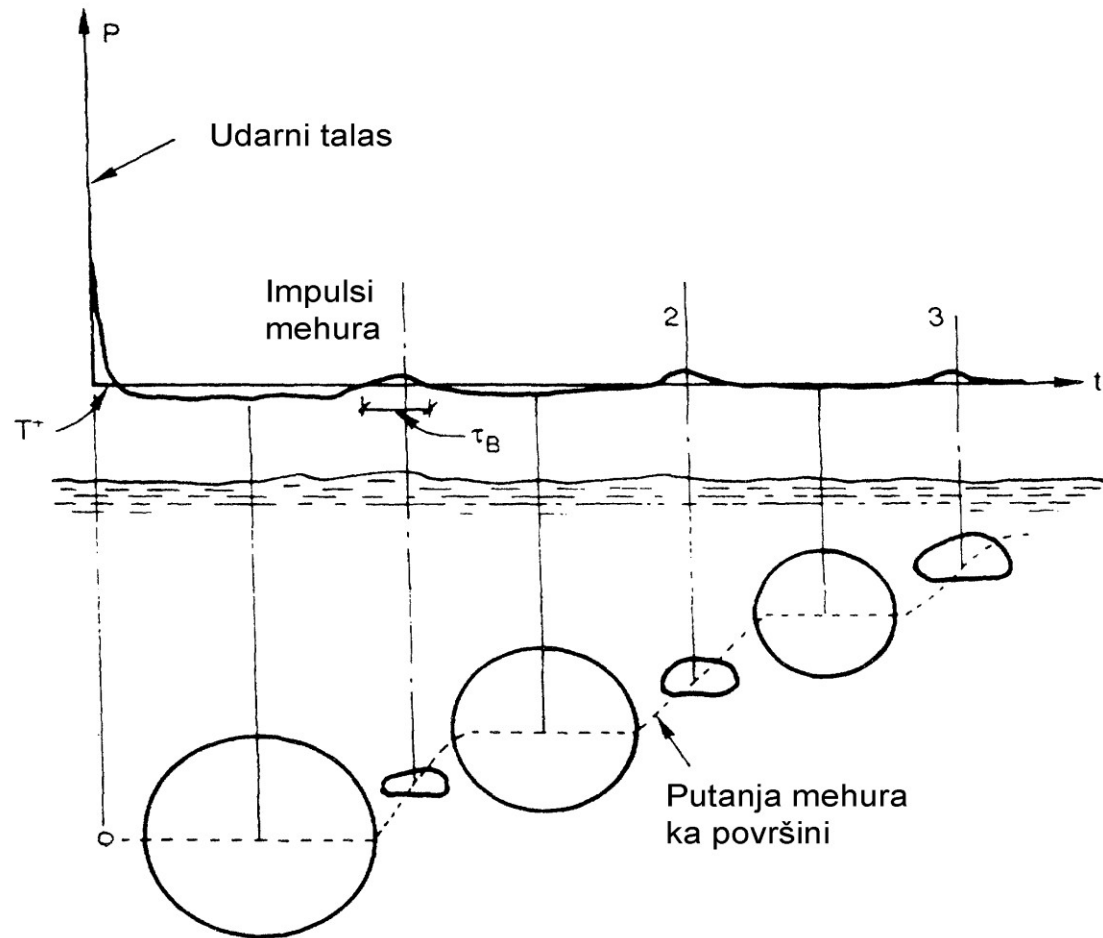
- λ - koeficijent koji zavisi od oblika projektila
- k_p - koeficijent koji zavisi od prirode prepreke
- m - masa projektila (kg)
- d - kalibar projektila (m)
- V_C - brzina projektila u trenutku susreta sa ciljem (m/s)
- Za slučaj tla manje otpornosti (**aktiviranje upaljača pre zaustavljanja projektila**):

$$l_u = V_C t_u - \frac{V_C^2 t_u^2}{4l_p} = V_C t_u \left(1 - \frac{V_C t_u}{4l_p} \right)$$



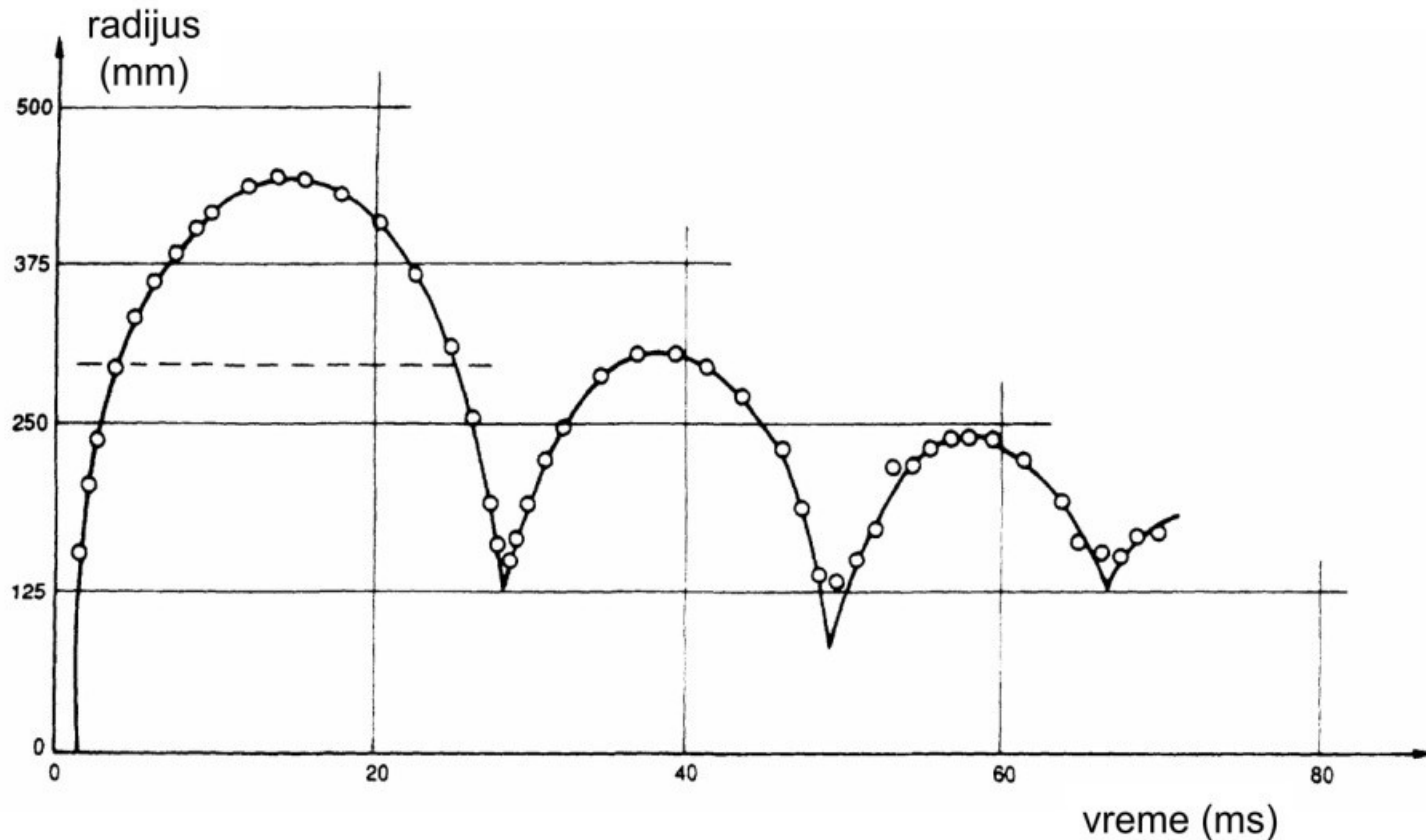
Podvodne eksplozije

- Podvodna detonacija brizantnog eksploziva za rezultat ima dva impulsa pritiska:
 - udarni talas koji se prostire kroz vodu (slično prostiranju udarnog talasa u vazduhu), i
 - pritisak u mehuru koji formiraju gasoviti PD i koji je specifičan za podvodne eksplozije.



Podvodne eksplozije

- Promena **radijusa gasnog mehura** pri podvodnoj eksploziji



Izmerena promena prečnika mehura sa vremenom pri detonaciji 250 g tetrila na dubini od 90 m

Podvodne eksplozije

- Analizom oscilovanja mehura mogu se približno odrediti **period oscilovanja τ** i **maksimalni radijus mehura r_{\max}** :

$$\tau = \frac{K_{ex} W^{1/3}}{(H + H_0)^{5/6}}$$

$$r_{\max} = \frac{J_{ex} W^{1/3}}{(H + H_0)^{1/3}}$$

- K_{ex} i J_{ex} su empirijske konstante koje zavise od vrste eksploziva,
- H je dubina na kojoj se nalazi centar eksplozivnog punjenja,
- H_0 je dubina vode koja odgovara ambijentalnom atmosferskom pritisku (približno 10 m),
- W - masa eksploziva pretvorena u TNT ekvivalent.

Podvodne eksplozije

- Parametri udarnog talasa u vodi se određuju analogno procesu u vazduhu

$$p_{\max} = \begin{cases} \frac{355}{Z} + \frac{115}{Z^2} - \frac{2.44}{Z^3}, & 0.05 \leq Z \leq 10 \\ \frac{294}{Z} + \frac{1387}{Z^2} - \frac{1783}{Z^3}, & 10 \leq Z \leq 50 \end{cases} \quad Z = R / W^{1/3}$$

- kod delovanja podvodne eksplozije od izuzetno velikog značaja interakcija udarnog talasa sa preprekama ili slobodnim površinama
- interakcija UT sa čvrstim dnom dovodi do refleksije i pojačavanja, dok pri nailasku udarnog talasa na slobodnu površinu vode (tj. granicu voda/vazduh) dolazi do formiranja talasa razređenja i slabljenja UT
- zato su ciljevi koji se nalaze na površini vode ili manjim dubinama izloženi manjim opterećenjima od onih na većim dubinama
 - pri ostalim nepromenjenim uslovima, u slučaju podvodne eksplozije podmornice će biti pod značajno većim opterećenjima nego brodovi