



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNOMATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Terapija udarnim talasima

- diplomski rad -

Mentor: Dr Olivera Klisurić

Kandidat: Luka Tanasijin

Novi Sad, 2011

Ovaj rad nastao je kao rezultat stečenog teorijskog i praktičnog znanja tokom studiranja na Prirodno-matematičkom fakultetu. Inspirisan je saznanjem o ovom vidu terapije zahvaljujući Doc. Dr med. sci. Lukač Damiru.

Srdačno se zahvaljujem mentoru, Doc. Dr Klisurić Oliveri, kao i Prof. Dr Kapor Agneš i Doc. Dr Barak Ottu koji su uz stručne i pozitivne sugestije, ukazivanjem na greške i njihovim korigovanjem pomogli bržoj izradi ovog rada.

Zahvaljujem se i firmi North System iz Petrovaradina na ustupljenoj literaturi, Kijac Radmili na pomoći pri prevodenju sa engleskog jezika, kao i svojoj poridici i svima koji su na bilo koji način pomogli u izradi ovog rada.

Nadam se da će ovaj rad moći da posluži kao vodič ili eventualni priručnik budućim generacijama Prirodno-matematičkog i srodnih fakulteta kao i svima kojima je obrađena tema centar interesovanja.

Novi Sad, 8. jul 2011. godine

Luka Tanasijin

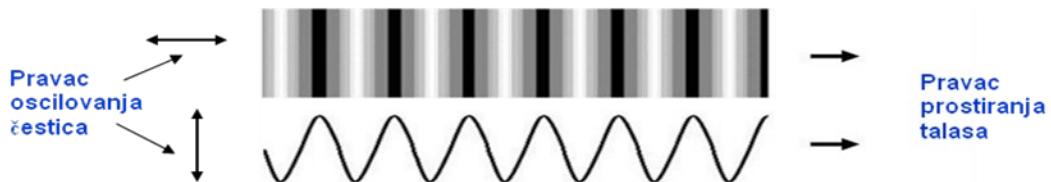
Sadržaj

1. TALASNO KRETANJE.....	4
1.1. Osnovne veličine potrebne za opisivanje talasnog kretanja.....	4
1.2. Superpozicija i interferencija talasa.....	5
1.3. Stojeci talas.....	6
1.4. Izbijanja (udari).....	8
1.5. Energija i intenzitet talasa.....	9
2. ZVUČNI TALASI.....	11
2.1. Osnovne karakteristike zvučnih talasa.....	11
2.2. Doplerov efekat.....	13
2.2. Udarni talas.....	16
3. TERAPIJA UDARNIM TALASIMA	18
3.1. Značaj udarnih talasa u praksi.....	18
3.2. Istorijski razvoj.....	20
3.3. Fizičke osnove.....	22
3.3.1. Sferni talasi pritiska.....	29
3.4. Mehanizmi delovanja udarnih talasa.....	32
3.5. Opšte napomene o lečenju udarnim talasima.....	34
4. USPOSTAVLJANJE DIJAGNOZE I NAČIN LEČENJA ROTATORNE MANŽETNE ZA TETIVNI KOMPLEKS RAMENOZGLOBA	39
4.1. Dijagnostičke metode oslikavanja.....	39
4.2. Način lečenja.....	40
4.3. Ponašanje pacijenta nakon terapije.....	43
4.4. Eksperimentalna potvrda.....	44
ZAKLJUČAK.....	46
LITERATURA.....	47
BIOGRAFIJA.....	48
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	49
KEY WORDS DOCUMENTATION.....	50

1. TALASNO KRETANJE

Talasno kretanje predstavlja kretanje poremećaja, odnosno oscilacije koje prenose energiju kroz posmatranu sredinu bez transporta supstancije. Ukoliko one izazivaju promene u materijalnoj sredini, poput vode, vazduha i čvrstih tela, nazivaju se *mehanički talasi*. Pored mehaničkih postoje i *elektromagnetni talasi* u koje spadaju: svetlosni talasi, radiotalasi, ultraljubičasti i infracrveni talasi. Oni predstavljaju periodičnu promenu električnog polja koja je praćena promenom magnetnog polja i za njihovo prostiranje nije potrebna materijalna sredina. Iako se po svojoj fizičkoj prirodi oni suštinski razlikuju, mehaničke i elektromagnetne talase je matematički moguće opisati na isti način.

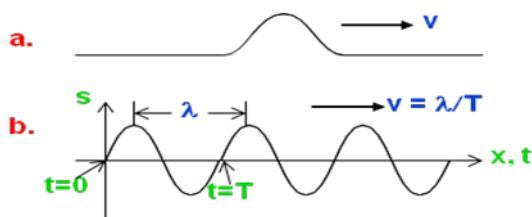
Mehanički talasi nastaju prenošenjem oscilacija sa jedne na drugu česticu u određenom pravcu. Oni mogu biti *longitudinalni*- ukoliko se pravac oscilovanja čestica poklapa sa pravcem prostiranja talasa i *transverzalni*- kada je oscilovanje čestica normalno na pravac oscilovanja talasa [Slika 1.1.]. Za transverzalne talase je karakteristično da se prostiru samo kroz čvrsta tela.



Slika 1.1. Prikaz mehaničkog talasa [3]

Talas se može javiti kao izolovani poremećaj koji se u vidu pulsa kreće kroz posmatranu sredinu pa se naziva *pulsni talas* [Grafik 1.1.a.] ili se prostire periodično u toku nekog vremena i tada se naziva *kontinuirani talas* [Grafik 1.1. b.]. Dakle, kontinuirani talasi se periodično ponavljaju u prostoru i vremenu.

Grafik 1.1. Prikaz pulsog (a.) i kontinuiranog talasa (b.) [3]



1.1. Osnovne veličine potrebne za opisivanje talasnog kretanja

Talasna dužina (λ) predstavlja udaljenost između dva brega talasa, odnosno najmanje rastojanje između bilo koja dva dela sredine koji osciluju na isti način [Slika 1.2. b.].

Ukoliko bi se izmerilo vreme između nailaska dva susedna brega talasa, dobija se veličina koja se naziva *period talasa (T)* koja predstavlja vreme potrebno talasu da dva susedna delića sredine dovede u isto stanje oscilovanja [Slika 1.2. b.].

Inverzna veličina periodu talasa je *frekvencija* (V) i ona predstavlja broj bregova talasa koji kroz jednu tačku prostora prođu u jedinici vremena.

Udajenost delića sredine od njihovog ravnotežnog položaja se naziva *elongacijom*, a maksimalna udaljenost od ravnotežnog položaja *amplitudom talasa*.

Talasi se prostiru određenom brzinom koja zavisi od osobina sredine u kojoj je talas nastao i kroz koju se prostire. Ukoliko talas pređe rastojanje jednako talsnoj dužini za vreme od jednog perioda i ukoliko je poznata njegova talasna dužina, brzina talasa se definiše kao: $v = \frac{\lambda}{T}$ [Slika 1.2. b.].

1.2. Superpozicija i interferencija talasa

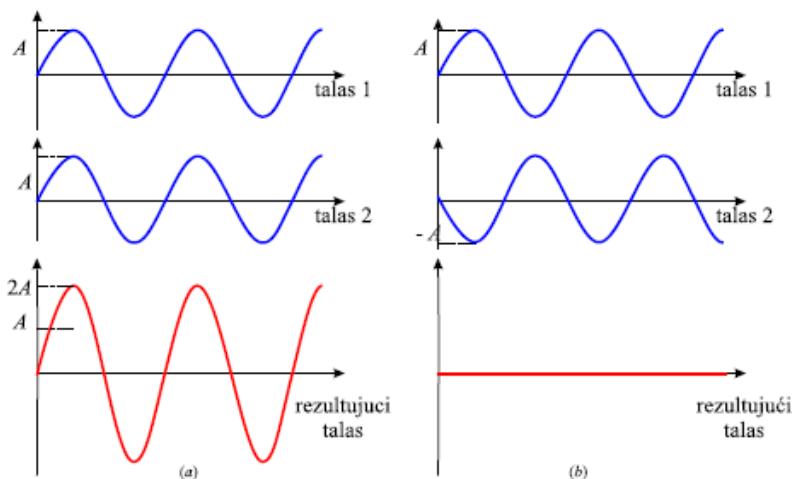
Talas koji je izazvan prostim harmonijskim oscilovanjem iz jednog izvora ima sinusoidni oblik. Međutim, većina talasa ne izgleda tako jednostavno jer su nastali tako što je sredinu istovremeno zahvatilo više sinusoidnih talasa. Ukoliko dva ili više talasa zahvate isti deo sredine, njihovo ukupno delovanje jednako je zbiru njihovog pojedinačnog delovanja u posmatranoj tački sredine. Upravo ovo sabiranje delovanja talasa naziva se *superpozicija*.

Svaka deformacija sredine odgovara delovanju sile koja je izaziva. Ukoliko postoji više talasa koji izazivaju deformacije, postoji i više sila čije se delovanje sabira kako bi se dobila rezultujuća sila, odnosno deformacija.

Kada se deformacije vrše duž jedne linije, rezultujući talas se dobija prostim sabiranjem poremećaja koji potiču od pojedinačnih talasa. Postoje dva specijalna slučaja:

- Slučaj kada dva talasa u određenu tačku dolaze u fazi [Grafik 1.2. (a)], deformacije se sabiraju i dobija se rezultujući talas sa dvostruko većom amplitudom od individualnih talasa. Ova pojava naziva se *konstruktivna interferencija*.
- Slučaj kada dva talasa u određenu tačku dolaze u kontra fazi [Grafik 1.2. (b)], deformacije u sredini su suprotno usmerene, a jednake, pa je ukupna amplituda jednaka nuli, odnosno talasi se potpuno poništavaju. Ova pojava se naziva *destruktivna interferencija*.

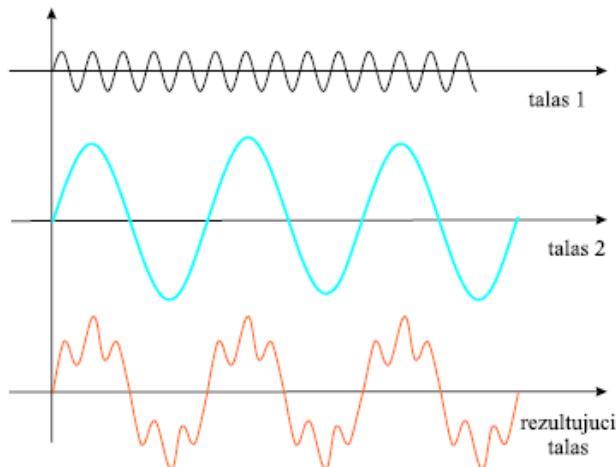
Grafik 1.2. Prikaz konstruktivne (a) i destruktivne (b) interferencije [4]



Da bi došlo do ovih vidova interferencije neophodno je preklapanje identičnih talasa, što u relanosti nije čest slučaj. Superpozicija talasa uglavnom dovodi do niza mesta na kojima se javlja konstruktivna ili destruktivna interferencija.

Kao rezultat superpozicije dva talasa koja nisu slična po svojim karakteristikama takođe se javlja rezultujući talas nastao sabiranjem elongacija koje izazivaju pojedinačni talasi [Grafik 1.3.].

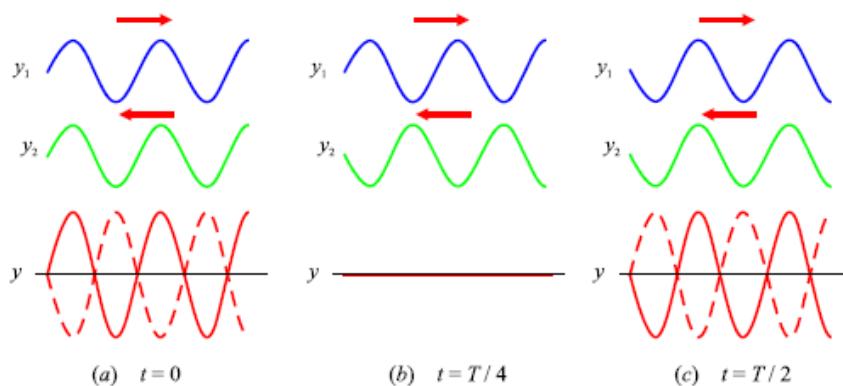
Grafik 1.3. Prikaz superpozicije dva različita talasa [4]



1.3. Stojeći talas

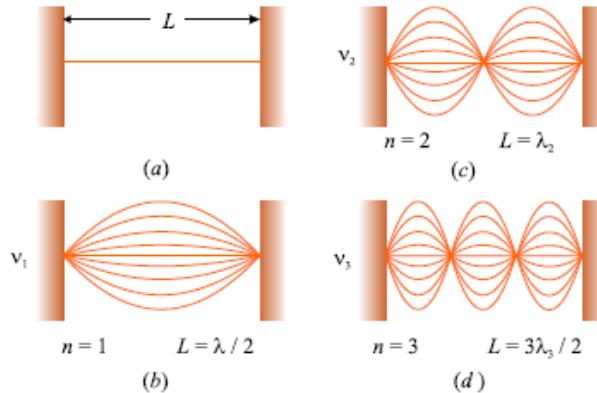
U slučaju superpozicije dva identična talasa koji se kreću u suprotnim smerovima javlja se *stojeći talas* [Slika 1.2.].

Ukoliko se posmatraju dva progresivna talasa suprotnih smerova u raznim momentima vremena [Slika 1.2.] moguće je uočiti da su u trenutku $t=0$ talasi u fazi i da izazivaju maksimalno pomeranje čestica sredine u stojećem talasu [Slika 1.2. (a)]. Nakon četvrtine perioda talasa $t=T/4$, svaki od njih se pomera za četvrtinu talasne dužine te su ova dva talasa u suprotnim fazama [Slika 1.2. (b)]. Tada delići sredine prolaze kroz ravnotežene položaje u oscilatornom kretanju koje vrše. U trenutku $t=T/2$ talasi su ponovo u fazi i proizvode oscilacije delića sredine suprotne onim u trenutku $t=0$ [Slika 1.2. (c)].



Slika 1.2. Stojeci talasu raznim momentima vremena [4]

Kada se posmatra žica zategnuta na oba kraja, stojeći talas će nastati kao neprekidna superpozicija talasa koji nailaze na krajeve žice i onih koji se odbijaju od njih [Slika 1.3. (a)]. Krajevi žice imaju nultu elongaciju i predstavljaju čvorove stojećeg tlasa. Na žici može da se formira niz stojećih talasa, odnosno niz oscilacija koje se nazivaju *normalni modovi*, a razlikuju se po frekvencijama koje je moguće lako odrediti.



Slika 1.3. *Normalni modovi na zategnutoj žici dužine L* [4]

Do oblika normalnih modova dolazi se polazeći od činjenice da međusobna udaljenost susednih čvorova i *trbuha* mora iznositi jednoj četvrtini talasne dužine. Prvi normalni mod ima čvorove na krajevima žice, a trbuhan na sredini [Slika 1.3. (b)]. To je mod koji odgovara najvećoj talasnoj dužini koja je duplo veća od dužine žice: $\lambda_1 = 2L$. Sledeći mod se javlja kada je talasna dužina jednaka dužini žice: $\lambda_2 = L$ [Slika 1.3. (c)], a treći mod odgovara slučaju u kome je $\lambda_3 = \frac{2L}{3}$ [Slika 1.3. (d)].

Može se zaključiti da se normalni modovi formiraju na zategnutoj žici dužine L pričvršćenoj na oba kraja, a da su njihove talasne dužine određene izrazom:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, \quad n=1,2,3,\dots,$$

gde n predstavlja n -ti mod oscilovanja. Koji modovi će se realizovati zavise od načina na koji se pobuđuje oscilovanje žice.

Prirodne frekvencije pridružene odgovarajućim modovima mogu se dobiti iz relacije:

$$\nu_n = \frac{\nu}{\lambda_n} = n \frac{\nu}{2L}, \quad n=1,2,3,\dots,$$

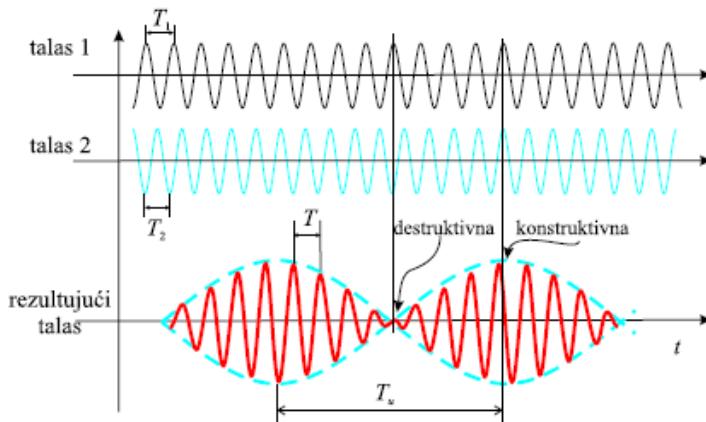
gde je ν brzina talasa koja je ista za sve frekvencije s obzirom da zavisi od sredine kroz koju se talas prostire. Najniža frekvencija ν_1 se naziva *osnovna frekvencija* i data je izrazom: $\nu_1 = \frac{\nu}{2L}$, a frekvencije ostalih modova su njeni celobrojni umnošci. Takve frekvencije formiraju *harmonijske serije*, a normalni modovi su harmonici. Osnovna frekvencija ν_1 se, u tom smislu, naziva frekvencijom prvog harmonika, frekvencija $\nu_2 = 2\nu_1$ je frekvencija drugog harmonika, a

frekvencija $\nu_n = n\nu_1$ frekvencija n -tog harmonika.

1.4. Izbijanja (udari)

Talas koji se dobija kada se superponiraju dva talasa bliskih ali ne i jednakih frekvencija ima periodične promene (fluktuiranje) u jačini. Njegova rezultujuća frekvencija je jednaka srednjoj vrednosti superponiranih talasa [Grafik 1.4.]. Takav talas ima fluktuirajuću amplitudu, takozvana *izbijanja (udare)* te se i rezultujuća frekvencija naziva *frekvencija izbijanja (udara)*.

Grafik 1.4. Izbijanja (udari) [4]



Matematički gledano, polazi se od jednačine talasa u jednoj tački prostora, a duž pravca kojim se talas prostire:

$$x = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = A \cos(2\pi\nu t),$$

gde je $\nu = \frac{1}{T}$ frekvencija talasa. Rezultat superponiranja dva talasa će biti zbir njihovih elongacija:

$$x = x_1 + x_2 = A \cos(2\pi\nu_1 t) + A \cos(2\pi\nu_2 t).$$

Ovaj rezultat se može prikazati i u sledećem obliku:

$$x = 2A \cos(\pi\nu_u t) \cos(2\pi\nu_{sr} t),$$

gde je $\nu_u = |\nu_1 - \nu_2|$ frekvencija izbijanja, a ν_{sr} srednja vrednost frekvencija ν_1 i ν_2 . Prvi kosinusni faktor ukazuje da amplituda menja svoje vrednosti periodično, a drugi kosinusni faktor ukazuje na frekvenciju rezultujućeg talasa.

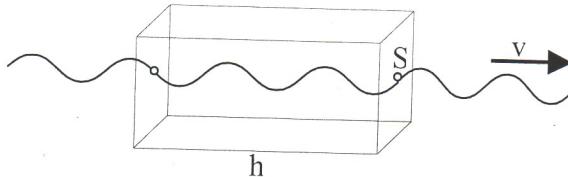
Drugim rečima, rezultujući talas osciluje frekvencijom koja je jednaka srednjoj vrednosti frekvencije pojedinačnih talasa ν_{sr} . Amplituda talasa raste do maksimalne koja je duplo veća od amplitude pojedinačnih talasa, a ta njena promena se dešava frekvencijom udara ν_u .

1.5. Energija i intenzitet talasa

Kako je već ranije rečeno talasno kretanje predstavlja kretanje poremećaja, odnosno oscilacije koje prenose energiju kroz posmatranu sredinu bez transporta supstancije.

Preneta energija se može iskazati veličinom koja se naziva *energetski fluks*. Ova veličina predstavlja energiju koja se prenese kroz neku površinu u jedinici vremena.

Da bi se ova veličina lakše objasnila, u sredini kroz koju se prostire talas formira se paralelopiped površine S normalne na pravac prostiranja talasa [Slika 1.4.]. Visina h odabrana je tako da je brojno jednak putu koji talas pređe za vreme od jedne sekunde.



Slika 1.4. Prostiranje talasa kroz paralelopiped formiran u prostoru [3]

Gustina energije (ω_ρ) koja predstavlja energiju jedinične zapremine, dobija se kada se energija talasa ($E = \frac{1}{2} m A_0^2 \omega_0^2$)¹ podeli zapreminom paralelopipeda:

$$\omega_\rho = \frac{E}{V} = \frac{\frac{1}{2} m A_0^2 \omega_0^2}{V},$$

a kako je $\rho = \frac{m}{V}$, sledi da je $\omega_\rho = \frac{1}{2} \rho A_0^2 \omega_0^2$.

Dakle, sva energija koja se našla u jednom trenutku u paralelopipedu, proći će kroz površinu S u toku jedne sekunde, što predstavlja energetski fluks:

$$\Phi = \frac{\omega_\rho S h}{1s} = \omega_\rho S v = \frac{1}{2} \rho A_0^2 \omega_0^2 S v.$$

Energetski fluks po jedinici površine predstavlja *intenzitet talasa*:

$$I = \frac{\Phi}{S} = \frac{1}{2} \rho A_0^2 \omega_0^2 v \left[\frac{W}{m^2} \right].$$

Intenzitet talasa zavisi od karakteristika sredine (ρ) i karakteristika samog talasa (amplituda, frekvencije i brzine prostiranja).

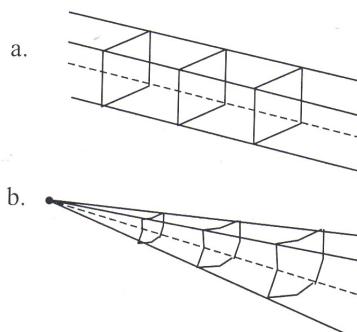
Ovakva formulacija je karakteristična za slučaj ravnog talasa kod koga je talasni front ravna površina [Slika 1.5. a.], dok se u slučaju tačkastog izvora (talasni front je sfera) energija širi kroz prostor pa će intenzitet talasa opadati sa kvadratom rastojanja [Slika 1.5. b.]:

¹ Mehanička energija linearne harmonijske oscilatora koja je jednaka zbiru kinetičke i potencijalne energije jednaka je:

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} m A_0^2 \omega_0^2 (\sin^2 \omega_0 t) + \frac{1}{2} m A_0^2 \omega_0^2 (\cos^2 \omega_0 t) = \frac{1}{2} m A_0^2 \omega_0^2 (\sin^2 \omega_0 t + \cos^2 \omega_0 t) = \frac{1}{2} m A_0^2 \omega_0^2$$

a $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ je kružna frekvencija.

$$I = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{4\pi r^2}$$



Slika 1.5. Izgled talasnog fronta ravnog talasa (a) i tačkastog izvora (b) [3]

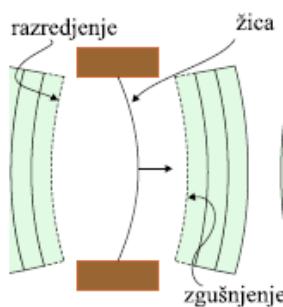
2. ZVUČNI TALASI

Zvučni talasi su mehanički longitudinalni talasi koji se prostiru kroz gasovitu, tečnu i čvrstu sredinu. Kada se govori o *zvuku* sa stanovišta čoveka podrazumeva se fiziološka senzacija

koju čovečje uho prima pod delovanjem talasa elastične sredine. Ljudsko uho osetljivo je na zvučne talase čiji je frekventni opseg 20-20000 Hz i naziva se *opseg čujnosti*. Zvučni talasi ispod ovog opsega pripadaju oblasti *infrazvuka*, dok talasi iznad pomenutog frekventnog opsega pripadaju oblasti *ultazvuka*.

Zvučni izvor je deo elastične sredine (čvrsto telo, voda, vazduh) koji osciluje zvučnom frekvencijom, a koji se nalazi u elastičnoj sredini. Najčešći izvori zvuka su zategnute strune ili žice, učvršćeni štapovi ili ploče, zategnute membrane, vazdušni stubovi i slično.

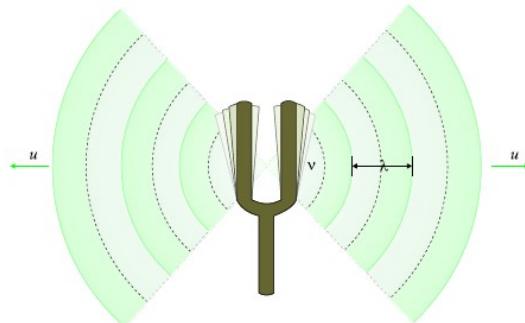
Žica koja osciluje stvara oko sebe zvučni talas [Slika 2.1.]. Oscilujući napred-nazad ona predaje energiju okolnom vazduhu, i to u vidu toplotne energije stvarajući vrtloge u njemu. Deo energije se troši na razređivanje (iza) i zgušnjavanje (ispred) okolnog vazduha što dovodi do stvaranja oblasti sa pritiscima nešto višim ili nižim od atmosferskog. Na taj način nastaje longitudinalni talas koji se naziva *talas pritiska*, koji poseduje frekvenciju jednaku frekvenciji oscilovanja žice.



Slika 2.1. Prikaz oscilovanja žice [4]

2.1. Osnovne karakteristike zvučnih talasa

Zvučni talas se kao i svaki drugi talas prostire određenom *brzinom* (v) i poseduje frekvenciju i talasnu dužinu. *Talasna dužina* (λ) je rastojanje između susednih identičnih delova talasa (na primer, oblasti gde je vazduh komprimovan) [Slika 2.2.]. *Frekvencija* zvučnog talasa (V) je jednak frekvenciji izvora koji ga proizvodi i predstavlja broj talasa koji prođu kroz određenu tačku sredine u jedinici vremena.



Slika 2.2. Prostiranje zvučnog talasa brzine u , talasne dužine λ koji je nastao usled oscilovanja izvora frekvencijom v

Brzina zvuka zavisi od karakteristika sredine kroz koju se zvuk prostire [Tabela 2.1.], i to od gustine (ρ) i elastičnih osobina sredine (E). U različitim agregatnim stanjima brzina zvuka je data opštim izrazom:

$$v = \left(\frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Što je veća gustina sredine, zvuk se brže kroz nju prostire. Takođe, u sredinama sa minimalnim elastičnim osobinama, zvuk se prostire brže. U čvrstим telima E je *Jangov moduo elastičnosti*, a u tečnostima *moduo stišljivosti*. Kod gasova je E srazmeran pritisku, koeficijent srazmernosti je odnos specifičnih toplota pri konstantnom pritisku i konstantnoj zapremini: $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, pa je tada brzina prostiranja talasa definisana:

$$v = \left(\frac{\gamma p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\gamma R T}{M} \right)^{\frac{1}{2}},$$

gde je R univerzalna gasna konstanta, T apsolutna temperatura, a M molekulska masa gasa.

Brzina zvuka zavisi od temperature sredine kroz koju se prostire. Vrednost brzine na dатој temperaturi t se može izračunati na osnovu relacije:

$$v = v_0 (1 + \alpha t)^{\frac{1}{2}},$$

gde je v_0 brzina zvuka na 0°C , a α je zapreminski koeficijent širenja koji za gasove iznosi $1/273$ po 1°C (ili po Kelvinu).

Tabela 2.1. Brzina zvuka u različitim sredinama [4]

sredina	u (m/s)	sredina	u (m/s)
<i>gasovi na 0°C</i>			
vazduh	331	čvrsta tela	
ugljen dioksid	259	guma	54
kiseonik	316	polietilen	920
helijum	965	mermer	3810
vodonik	1290	staklo	5640
		ollovo	1960
		aluminijum	5120
		čelik	5960
<i>tečnosti na 20°C</i>			
etanol	1160		
živa	1450		
voda	1480		
morska voda	1540		
ljudsko tkivo	1540		

Intenzitet zvučnih talasa može se izraziti na dva načina:

- preko amplitude oscilovanja molekula A_0 : $I = \frac{1}{2} \rho A_0^2 \omega_0^2 v$ ili
- preko maksimalne promene pritiska Δp_m : $I = \frac{\Delta p_m^2}{2 \rho v}$.

Poređenjem ove dve relacije dobija se treća: $\Delta p_m = \rho A_0 \omega_0 v$ koja pokazuje da maksimalna promena pritiska u gasu kroz koji se prostire zvučni talas zavisi od karakteristika gasa (gustine) i karakteristika talasa (amplitude, frekvencije i brzine prostiranja talasa). Ova veličina se zove *zvučni pritisak*.

Minimalna vrednost intenziteta zvuka koje ljudsko uho može da čuje naziva se *prag čujnosti*. Ovaj intenzitet iznosi $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ i određen je eksperimentalno pri frekvenciji od 1000Hz statističkim ispitivanjem mlađih i zdravih osoba. Gornja granica intenziteta zvuka koje ljudsko uho može da čuje određena je pojmom bola usled velikog pritiska koji deluje na bubnu opnu pa se naziva *prag bola* i iznosi $1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Oblast između pomenutih intenziteta je opseg čujnosti.

Nivo zvuka (L) je veličina koja se izražava u decibelima (dB) i za zvuk intenziteta I je definisan izrazom:

$$L(\text{dB}) = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right).$$

Nivo zvuka na pragu čujnosti iznosi 0 dB, a na pragu bola 120 dB [Tabela 2.2.].

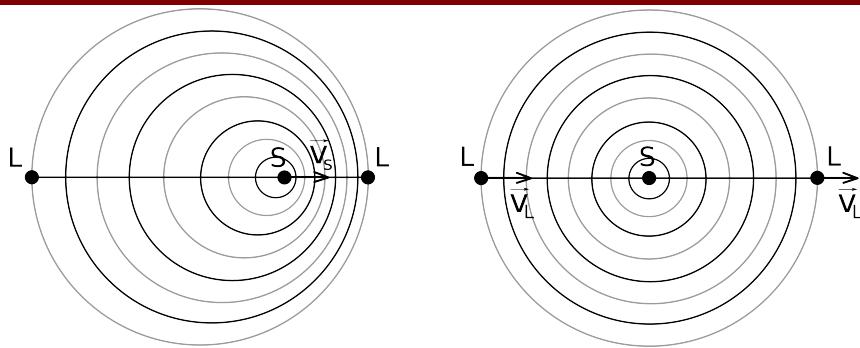
Tabela 2.2. *Intenziteti i nivoi zvuka za neke karakteristične zvučne talase* [4]

primer/efekat	I (W/m ²)	L (dB)
prag čujnosti	1×10^{-12}	0
šuštanje lišća	1×10^{-11}	10
šaputanje na 1 m udaljenosti	1×10^{-10}	20
tišina u kući	1×10^{-9}	30
prosečna buka u kući	1×10^{-8}	40
prosečna buka u kancelariji, lagana muzika	1×10^{-7}	50
razgovor	1×10^{-6}	60
bučna kancelarija, gust saobraćaj	1×10^{-5}	70
glasno odvrnut radio	1×10^{-4}	80
unutrašnjost metroa (posledice prilikom duže izloženosti)	1×10^{-3}	90
najbučnije fabrike (posledice prilikom izloženosti 8 h dnevno)	1×10^{-2}	100
posledice prilikom izloženosti 30 min dnevno	1×10^{-1}	110
prag bola, glasni rok koncerti, pneumatski čekić udaljen 2 m (posledice prilikom izloženosti u trajanju od sekunde)	1	120
mlazni avion na 30 m udaljenosti	1×10^2	140
pucanje bubne opne	1×10^4	160

2.2. Doplerov efekat

Doplerov efekat predstavlja promenu frekvencije zvuka, svetlosti ili drugih talasa, prouzrokovanoj relativnim kretanjem izvora talasa – emitera i prijemnika talasa [Slika 2.3.].

Ako se izvor i prijemnik talasa kreću jedan prema drugome, frekvencija koju prima prijemnik pomera se ka višim (raste u odnosu na frekvenciju koju odašilje izvor talasa), a ako se izvor i prijemnik talasa kreću jedan od drugog, frekvencija se pomera ka nižim vrednostima (opada). Pretpostavimo, na primer, da se tačasti izvor signala S zvučne frekvencije ν_s kreće stalnom brzinom \vec{v}_s duž prave ka posmatraču L (brzina tačkastog izvora je pozitivna kada ide prema posmatraču, a negativna kada se udaljava od njega).



Slika 2.3. Doplerov efekt pri kretanju izvora signala dok posmatrač miruje (levo) i kada izvor miruje, a posmatrač se kreće (desno) [3]

Zvučni talas ima frekvenciju v_s za neko vreme t emitovaće $v_s t$ oscilacija. U toku tog vremena talas prelazi rastojanje $v t$ (v je brzina talasa u dатој средини), a izvor se za isto vreme pomeri za $v t - v_s t$. Može se zaključiti da će talasni poremećaj ispuniti prostornu oblast dužine i sa tačke gledišta posmatrača L, njegova talasna dužina će biti:

$$\lambda_L = \frac{\text{rastojanje}}{\text{broj oscilacija}} = \frac{v t - v_s t}{v_s t} = \frac{v - v_s}{v_s},$$

a frekvencija: $v_L = \frac{v}{\lambda_L} = v \frac{v_s}{v - v_s} = v_s \frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}$.

Dakle, frekvencija zvuka je veća kada se izvor kreće ka posmatraču nego kada miruje u odnosu na posmatrača.

Ako se izvor udaljava od posmatrača, znak brzine se menja, tako da je frekvencija koju prima prijemnik: $v_L = v_s \frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}}$.

Dakle, frekvencija talasa koji dospevaju do posmatrača se smanjuje.

Neka je izvor zvuka nepokretan u odnosu na sredinu [Slika 2.3. (desno)], a posmatrač se kreće brzinom \vec{v}_L (kada se kreće ka izvoru, brzina je pozitivna, kada se kreće od izvora, brzina je negativna). Kada se posmatrač kreće ka izvoru, brzina zvuka u odnosu na referentni sistem vezan za prijemnik je $v' = v + v_L$. Frekvencija zvuka koju registruje prijemnik je:

$$v_L = v_s \frac{v + v_L}{v} = v_s \left(1 + \frac{v_L}{v} \right).$$

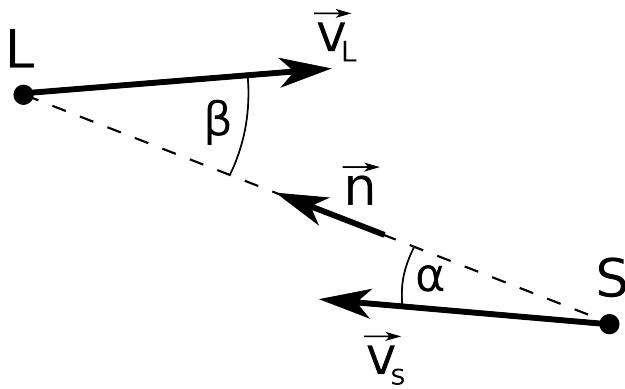
Kada se posmatrač udaljava od izvora biće: $v_L = v_s \left(1 - \frac{v_L}{v} \right)$.

Kombinovanjem relacija $v_L = v_s \frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}}$ i $v_L = v_s \left(1 - \frac{v_L}{v}\right)$ dobija se jednačina za najopštiji slučaj kada se i izvor i prijemnik zvuka pomeraju:

$$v_L = v_s \frac{v \pm v_L}{v \mp v_s}.$$

Plus u brojiocu i minus u imeniocu stoje kada se izvor i prijemnik približavaju, a minus u brojiocu i plus u imeniocu kada se udaljavaju jedan od drugog.

Ako se pravci brzina izvora i posmatrača ne poklapaju [Slika 2.4.], odnosno nisu upravljeni duž prave linije koja spaja posmatrača i izvor (tu pravu određuje jedinični vektor \vec{n}), treba uzeti u obzir njihove komponente u pravcu vektora \vec{n} .



Slika 2.4. Slučaj kada se pravci brzina izvora i posmatrača ne poklapaju [3]

Tada će frekvencija v_L koju prijemnik registruje iznositi:

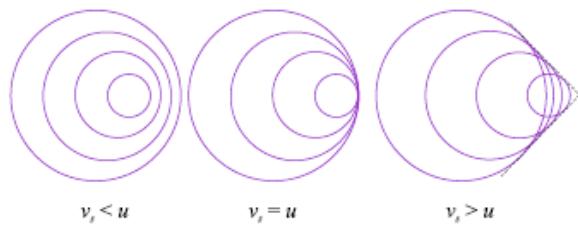
$$v_L = v_s \frac{1 - \frac{v_L \cos \beta}{v}}{1 - \frac{v_s \cos \alpha}{v}}.$$

Ako je $v_s \ll v$ tada promena frekvencije zavisi uglavnom od relativne brzine izvora u odnosu na prijemnik, pa transformacijom prethodnog izraza dobijamo da Doplerov pomak v_D (razlika frekvencija koju prima prijemnik i odaje izvor) iznosi:

$$v_D = v_L - v_s = -v_s \frac{\vec{n} \cdot \vec{\Delta v}}{v}, \text{ gde je } \vec{\Delta v} = \vec{v}_L - \vec{v}_s.$$

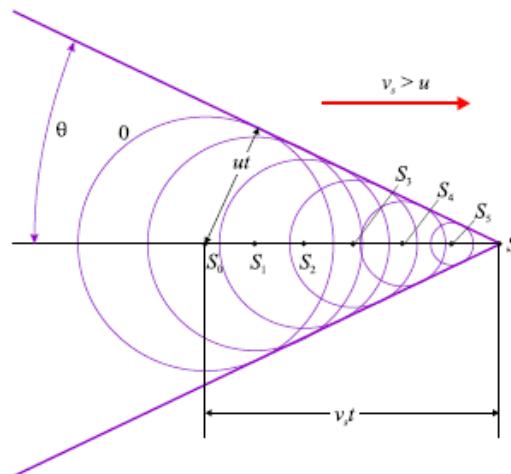
2.3. Udarni talas

Brzina izvora zvuka može imati bilo koju vrednost. Mogu se posmatrati slučajevi kada se brzina izvora zvuka približava brzini prostiranja, postaje jednaka i veća od brzine prostiranja zvuka u dатој средњи [Slika 2.5.].



Slika 2.5. Izgled talasnih frontova za različite brzine zvuka izvora u odnosu na brzinu prostiranja talasa u danoj sredini

Što je veća brzina izvora zvuka, veći je Doplerov efekat, odnosno frekvencija koju čuje posmatrač. Kada brzina izvora postane jednaka brzini zvučnog talasa, rezultujuća frekvencija teži beskonačnosti. To znači da će ispred izvora svaki naredni talas da sustigne prethodni pa će ih posmatrač sve čuti istovremeno.

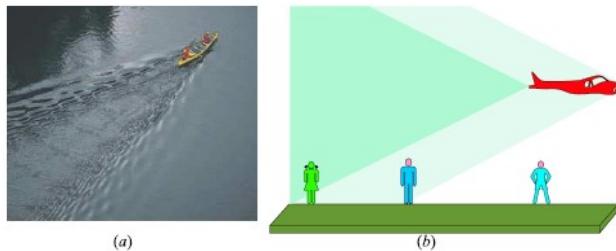


Slika 2.6. Konstruktivna interferencija sfernih talasnih frontova [4]

Između ovih talasa dolazi do konstruktivne interferencije duž linija u koje oni stižu istovremeno [Slika 2.6.]. Na taj način se čuje poremećaj koji zvuči kao eksplozija.

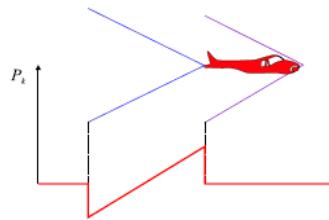
Kružnice predstavljaju sferne talasne frontove koje je izvor talasa emitovao u raznim vremenskim trenucima tokom svog kretanja. Neka se u trenutku $t=0$ izvor nalazio u tački S_0 , a u trenutku t u tački S . Za vremenski interval koji je jednak vremenu t talasni front emitovan iz tačke S_0 je dostigao poluprečnik $v t$, a za isti vremenski interval izvor zvuka se pomerio na rastojanje $v_s t$, odnosno došao je u tačku S . Ako se iz tačke S povuče tangenta na kružnicu sa centrom u tački S_0 ispostavlja se da će ona biti tangenta i svih ostalih talasnih frontova nastalih u trenucima između $t=0$ i t . Posmatrano u tri dimenzije reč je o konusu kod koga je sinus ugla θ dat izrazom: $\sin \theta = \frac{v t}{v_s t} = \frac{v}{v_s}$. Ovaj odnos brzina naziva se *Mahov broj*, a konusni talasni front koji se stvara u situacijama kada je $v_s > u$ se naziva *udarni talas*.

Interesantna analogija udarnog talasa je talasni front oblika V koji se dobija kretanjem broda na vodi u situaciji kada je njegova brzina veća od brzine talasa koji stvara na površini vode, kao i kretanje mlažnih aviona nadzvučnim brzinama pa se kao posledica čuju dve eksplozije koje potiču od kljuna i repa aviona [Slika 2.7.].



Slika 2.7. Talas oblika slova V kao posledica kretanja broda brzinom većom od brzine talasa koji stvara na vodi (a) i dve eksplozije koje potiču od kljuna i repa aviona (b) [4]

U slučaju mlaznih aviona udarni talasi nastaju kao posledica velikih razlika u pritiscima [Slika 2.8.].

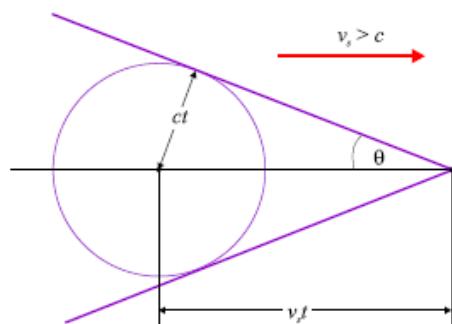


Slika 2.8. Razlika u kalibrisanom pritisku na kljunu i repu aviona [4]

Posmatrači sa zemlje imaju poteškoće u uočavanju aviona koji se kreću nadzvučnim brzinama jer ih pogledom ka nebnu traže na mestu odakle je zvuk došao. Letenjem na malim visinama, pritisak koji se tom prilikom stvara može biti destruktivni te može dovesti do oštećenja (na primer na kućama) pa je letenje nadzvučnim brzinama zabranjeno iznad naseljenih mesta.

Doplerov efekat i udarni talasi su svakako interesantni fenomeni koji su uglavnom uočljivi kod zvučnih talasa, ali su zastupljeni kod svih tipova talasnog kretanja.

Tipični V talasi se sreću kod subatomskih čestica koje se kreću kroz neki medijum brzinama većim od brzine kojom se svetlost kreće kroz njega. Ukoliko takve čestice pri kretanju zrače elektromagnetne talase (svetlost) oni se šire u obliku konusa sa uglom koji zavisi od brzine čestice [Slika 2.9.]. Ovakav tip zračenja se naziva Čerenkovljevo zračenje.



Slika 2.9. Čerenkovljevo zračenje subatomske čestice [4]

3. TERAPIJA UDARNIM TALASIMA

3.1. Značaj udarnih talasa u praksi

Terapija udarnim talasima se već duže vreme koristi kao usvojena medicinska terapija. Ortopedi i hirurzi često se oslanjaju na ovu metodu koja čini deo spektra njihovih konzervativnih tretmana. Osnovna istraživanja i brojne naučne studije u vezi sa terapijom udarnim talasima, sprovedene su na klasičnim indikacijama kao što su *kalcifikacija tetive*, *epikondilitis* (upala tetiva na unutrašnjoj ili spoljašnjoj strani nadlakatne kosti), *spina calcanei* (petni trn/izraslina na petnoj kosti) i *pseudoartroza* (patološko stanje koje karakteriše nezarastanje preloma kosti). Kada su ove indikacije u pitanju, ima više istraživanja u vezi sa efektima terapije udarnim talasima nego sa efektima bilo koje druge konzervativne metode.

Terapija udarnim talasima je alternativa hirurgiji. Važno je predstaviti ovu blagu, neinvazivnu, terapiju pacijentu koji pati od kalcifikacije rotatorne manžetne, epikondilitisa, spinae calcanei, *patelarnog tendinitisa* (upala tetive čašice- jumper's knee) ili drugih *entezopatija* (zapaljenja mekih tkiva oko zglobova). Na ovaj način pacijent često može izbeći stresne i neizvesne hirurške zahvate. Ranije se tvrdilo da terapija udarnim talasima treba da bude primenjena jedino ukoliko pacijent nije reagovao na druge konzervativne metode lečenja u trajanju od šest meseci. Ovo nije razumljivo pošto nema ni jednog naučnog dokaza da konzervativne metode daju bolji efekat od terapije udarnim talasima.

Primena terapije udarnim talasima u ortopediji nema ničeg zajedničkog sa *litotripsijom*- razbijanjem kamena u bubregu i mokraćovodu. Terapija udarnim talasima stimuliše obnovu degenerisanog tkiva. Poznavanje čelijskih i biomolekularnih procesa ove regeneracije neophodno je za primenu terapije udarnim talasima. Preduslovi uspešne terapije su odgovarajuća gustina energetskog fluksa i dubina prodiranja, frekvencija pulsa, broj tretmana i vremenski razmak između njih. Biološki odgovor i oporavak ne mogu da se dogode odmah- napredak se postiže dugoročno i pacijent mora biti upoznat sa ovim činjenicama. Lekari takođe treba da budu strpljivi, ukoliko bi tretmani bili prečesti, to bi dovelo do lošeg rezultata.

Lekari koji samo površno poznaju terapiju udarnim talasima obično baziraju svoje znanje na principima njihove primene u urologiji. Prema njihovom mišljenju, kalcifikacija rotatorne manžetne ili spina calcanei se razbijaju, mada se zna da je spina calcanei rezultat okoštavanja pripoja *fascije*². Njegovo razbijanje je nemoguće i nepotrebno.

U budućnosti primena terapije udarnim talasima neće biti ograničena na postojeće klasične indikacije. Danas već znamo dosta o ineženjeringu tkiva i na drugim mestima *mišićno-skeletnog sistema*. Ovo znači da će biti dostupne nove opcije lečenja. *Ahilodinija* (bolno zapaljenje serozne burze- kese između prednje strane Ahilove tetive i zadnje strane kalkaneusa), *tibijalni sindrom* (stručno *medial tibial syndrome*- upala tetive potkoljenice), patelarni tendinitis i *sindrom velikog trohantera* (upala trohanterične burze) bili su navedeni kao indikacije na ekspertskoj konferenciji u Dizeldorfu (Nemačka) u januaru 2008. godine. U praksi, ova stanja se tretiraju već godinama. Pretpostavlja se da se usled *vazodilatacije* (širenja krvnih sudova) i *neoangiogeneze* (nastanka novih krvnih sudova) izazvane tretmanom udarnim talasima vrlo dobro rešavaju problemi sa zarastanjem rana (posebno kod dijabetičara), rane od opekovina, kožni implantati. Naravno, ništa od ovoga nema nikakve veze sa primenom udarnih talasa u urologiji.

Stalnim praćenjem je bilo moguće prikazati učinak terapije udarnim talasima (naročito kombinovane fokusirane i sferne) posle sportskih povreda (pučanje mišića, uganuća i povreda ligamenata). Ono što se najverovatnije događa slično je tradicionalnoj *limfnoj drenaži*³. Limfni

² Fascija (opna) je fibrozno vezivno tkivo koje obavlja mišiće, grupe mišića, krvne sudove i nerve držeći ih čvrsto povezanim.

³ Limfna drenaža je nezamenjiv terapeutski postupak za stimulisanje cirkulacije limfe, poboljšanje venske cirkulacije i detoksifikaciju organizma. Ona takođe doprinosi boljoj ishrani i regeneraciji tkiva, otklanjanju viška tečnosti i jačanju imunološkog sistema.

sistem se stimuliše i degenerisano tkivo se otklanja. Ova saznanja vrlo su značajna za pacijente, pa prema tome, moraju dalje biti dopunjavana istraživanjima.

Trenutno se rade mnoga istraživanja u vezi sa pozitivnim efektima terapije udarnim talasima kod *sindroma mišićno-skeletnog bola*. Malo je ljudi koji ne pate od ovih bolnih i funkcionalno uslovljenih *miogeloza* (bolnih otvrduća u mišićima). Vrlo često terapija mišićnog bola se primenjuje bez kritičke analize. U budućnosti će broj ovih slučajeva stalno rasti i biće teško boriti se sa tim.

Još uvek znamo jako malo o razvoju miogeloza i njihovoj eliminaciji terapijom udarnim talasima. Jedno od mogućih objašnjenja jeste da fokusirani isto kao i sferni udarni talasi izazivaju oslobađanje *neovaskularnih (vazodilatacijskih) supstanci* kao posledicu lokalno povećanog protoka krvi. Međutim, još uvek ostaje pitanje kako sferni talasi izazivaju ovaj efekat uprkos svojoj manjoj dubini prodiranja. Odgovor možda leži u silama smicanja usled sfernih talasa, koje uzrokuju regionalni porast ovih vazodilatacijskih supstanci.

Miogeloze mogu biti definisane kao funkcionalno uslovljeni mišićno-skeletni poremećaji povezani sa nekom bolešću. Ugroženi su površinski i ili dublji mišićni snopovi. Diferencijalna dijagnoza pomaže lekaru da otkrije specifičnu bolest. Pošto se uzrok identificuje i uspešno tretira, pojedini *sindromi miofascijalnog bola* ponekad ostanu.

Metode oslikavanja (ultrazvuk, CT i NMR) vrlo su korisne za entezopatije. Bol u tetivama i otoci mogu biti izazvani *nekrozama* (odumiranjem), *rupturama* (prekidima), *podlivima* ili čak *tumorima*. Ultrazvuk i NMR pomažu pri identifikaciji uzroka i shodno tome treba da prethode terapiji udarnim talasima. Iznad svega, strategija oslonjena na preciznim indikacijama (potvrđena rezultatima oslikavanja) garantuje bolje rezultate tretmana.

Nakon temeljnog dijagnostičkog istraživanja, tretiranje mišića sfernim udarnim talasima može biti preneto fizioterapeutu saradniku ili iskusnom asistentu (kako bi se uštedelo vreme konsultacija). Pre ovoga važno je upotrebiti ultrazvuk ili neke naprednije tehnike oslikavanja sa ciljem da se eliminišu inflamatorni ili tumorski procesi na mekim tkivima. Ultrazvuk je od suštinskog značaja pri određivanju fokalne dubine. Uzevši ovo u obzir, medicinska znanja su vrlo važna u obavljanju ultrazvučnog snimanja (ili CT i NMR ako je nophodno) pre terapije fokusiranim ili sfernim udarnim talasima, a samo je lekar taj koji određuje indikacije i kontraindikacije i preuzima odgovornost.

Postoje *aplikatori* sa različitim nastavcima koji obezbeđuju različite dubine prodiranja udarnih talasa (vidi poglavljje 3.5.). D-actor®, a naročito V-actor® (zbog svog kapaciteta visokofrekventnih vibracija) idealni su za terapiju mišićno-skeletnih simptoma sfernim udarnim talasima.

Uprkos manjku naučnih dokaza njihove efikasnosti, privatne osiguravajuće kuće plaćaju druge konzervativne metode za tretiranje bola kao što su lokalna anestezija, regionalna blokada, akupunktura i mnoge druge. U poređenju sa ovim metodama terapija udarnim talasima je delotvorna, neagresivna i jeftina.

Na primer, terapija udarnim talasima pravi ogromne uštede jer zamenjuje skupe lekove protiv bolova kao i masažne tretmane i fizioterapiju. Kako se terapija udarnim talasima ostvaruje ambulantno, entezopatije i pseudoartoze mogu biti efikasno tretirane, a da se pri tome štede troškovi hirurgije, anestezije i hospitalizacije.

3.2. Istorijski razvoj

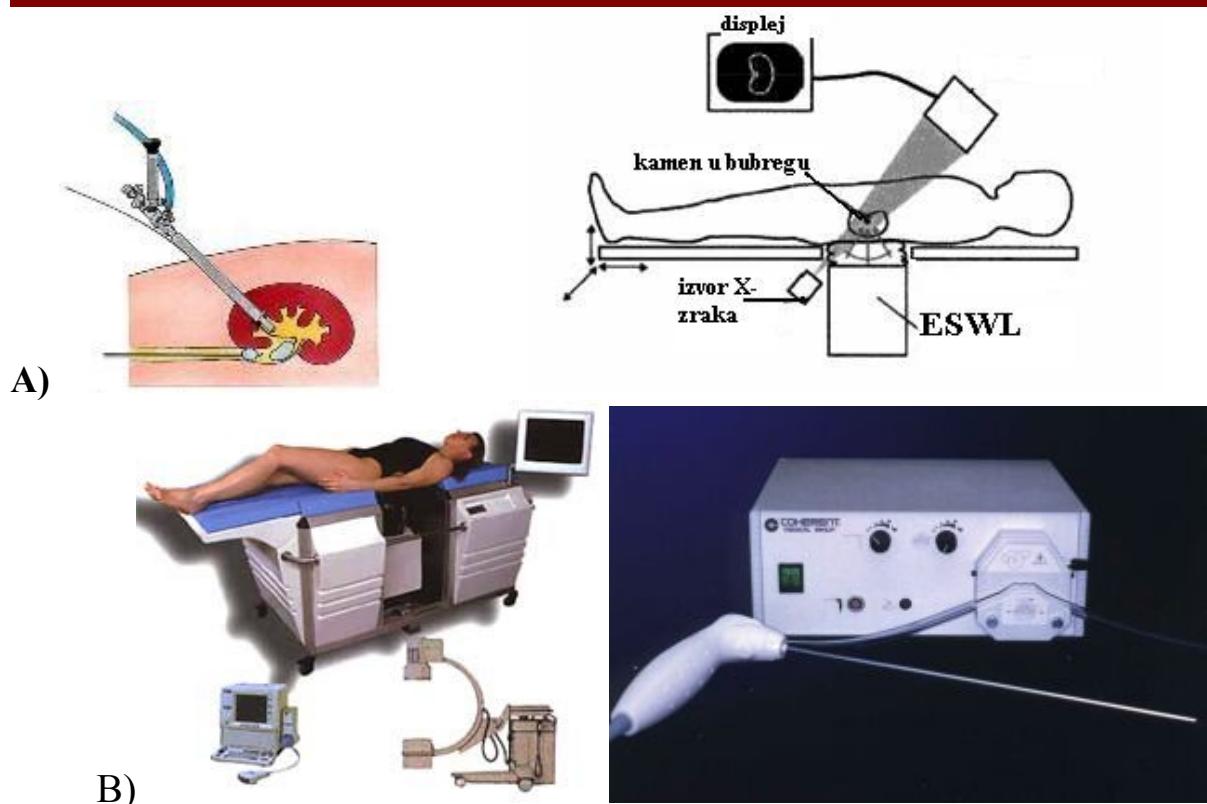
Od početnog istraživanja mogućnosti primene udarnih talasa u medicini do danas prošlo je vrlo malo vremena. Tokom Drugog svetskog rata uočeno je da su pluća brodolomaca oštećena od eksplozija plutajućih mina, iako ni jedan drugi simptom udarca ili traume nije bio prisutan. To je bio prvi uviđaj uticaja udarnih talasa od eksplozije bombi na tkivo.

U pedesetim godinama prošlog veka sprovedena su prva istraživanja upotrebe udarnih talasa u medicini. Na primer, objavljeno je da *elektrohidraulični udarni talasi* mogu zdrobiti keramičku ploču u vodi. U SAD-u je prihvaćen prvi patent elektrohidrauličnog generatora udarnih talasa (Frank Rieber, New York, Patent No. 2.559.277). Krajem pedesetih godina opisani su fizikalni parametri *elektromagnetno generisanog udarnog talasa*.

Tokom 1966. godine interes za udarni talas je stimulisan slučajno u jednoj fabrići medicinske opreme. U toku eksperimenta sa projektilima, jedan od zaposlenih je dodirnuo ploču u trenutku kada ju je projektil pogodio. Osetio je nešto slično električnoj struji kako mu prolazi kroz telo. Merenja su pokazala da struja nije prisutna. U pitanju je bio generisani udarni talas koji je putovao od ploče kroz telo. Od 1968. do 1971. godine istraživana je interakcija između udarnih talasa i tkiva životinja u Nemačkoj. Taj je program finansiralo ministarstvo odbrane Nemačke, a rezultati su pokazivali da visokoenergetski udarni talasi uzrokuju efekte u organizmu i na velikim udaljenostima. Posebno su se istraživali efekti na tkivo, kao i razlike, te prigušenje udarnog talasa na putu kroz njega. Drugo polje interesa bilo je prenošenje udarnog talasa unutar tela. Primećeno je da udarni talasi uzrokuju vrlo malo propratnih pojava na svom putu kroz mišiće, masno i vezivno tkivo. Neoštećeno koštano tkivo ostaje neozleđeno pod uticajem udarnih talasa. Opasnosti po mozak, pluća, trbušnu šupljinu i druge organe bili su deo istraživanja u ovom programu. Ispostavilo se da su najbolja sredina za prostiranje udarnih talasa voda i gel zbog svojih sličnih akustičnih svojstava, kao i tkivo.

Ova istraživanja dovela su do ideje za razbijanje kamena u bubregu (litotripsijska) sa generisanim udarnim talasima. U počecima tehnički i medicinski aspekti realizacije nisu bili jasni, ali je ideja bila rođena. 1971. godine Haeusler i Kiefer govore o prvom in-vitro razbijanju kamena u bubregu udarnim talasima bez direktnog dodira sa kamenom. Sledili su i drugi in-vitro eksperimenti sa beskontaktnim razbijanjem kamena. 1974. godine nemačka Agencija za razvoj i nauku finansirala je istraživački program „Aplikacija ESWL“ [5]. Učesnici tog programa bili su i Eisenberger, Chaussy, Brendel, Frossmann i Hepp. 1980. godine prvi je pacijent sa kamenom u bubregu tretiran prototipom litotriptora u Minhenu. 1983. godine prvi je komercijalni litotriptor instaliran u Štutgartu. U sledećim godinama nastavljaju se in-vivo i in-vitro eksperimenti sa ciljem dezintegracije kamena u žući.

1985. godine prvi je klinički tretman terapijom vantelesnih udarnih talasa izveden na kamenu u žući u Minhenu. Danas je lečenje kamena u bubregu i mokraćovodu udarnim talasima tretman prvog izbora. Moderni litotriptori dizajnirani su tako da im za rad ne treba kada s vodom ili anestezija. Za lokalizaciju kamena, litotriptori su opremljeni rentgenom ili ultrazvučnim aparatima [Slika 3.1.]. U poslednjih 16 godina tretirano je više od 16 miliona pacijanata. Terapija udarnim talasima je sigurna i efikasna metoda. Ipak nesmotrena primena terapije udarnim talasima nosi rizike ozbiljnih oštećenja tkiva.



Slika 3.1.. Prikaz ESWL-a (a) i kontaktnog litotriptora (b)

Urologija nije jedina grana medicine unutar koje su udarni talasi uspešno primjenjeni. 1985. godine sprovedeni su prvi eksperimenti za procenu uticaja na kosti. Razlog za ovo istraživanje bila je zabrinutost da bi udarni talasi mogli oštetiti kuk kao rezultat terapije na kamen u mokraćovodu. Rezultati su pokazali da nema značajnijih promena na zdravoj kosti pod uticajem udarnih talasa. Kasniji eksperimenti na životinjama ukazali su na osteogenezijski potencijal udarnih talasa i stimulaciju zaceljenja kostiju. Histološki nalazi potvrdili su uticaj udarnih talasa na stimulaciju *osteoblasta* (ćelija ogovornih za razvijanje kostiju).

1988. godine prvi je tretman pseudoartroze uspešno sproveden u Bohumu (Nemačka). U isto vreme Valchanow sa saradnicima prezentuje rad o pseudoartrozama i sporom zarastanju koštanih preloma. Njegov je uspeh bio 85%, ali detalji te kliničke studije nisu bili prikazani. U sledećim godinama različite studije prezentuju uspeh koji se kreće između 60% i 90%. Dve važne okolnosti su uticale na uspešnost primene udarnih talasa kod pseudoartroza. Uticaj udarnih talasa na hipertrofične pseudoartroze izgleda mnogo veći nego na atrofične. Stabilizacija preloma posle terapije udarnim talasom čini se esencijalnom za konačni uspeh ovog terapijskog pristupa. Nuspojave ove terapije su *hematomi* (podlivi), *petehijalno (tačkasto) krvarenje* i lokalni *otok* na mestu primene. Ove propratne pojave nestaju nekoliko dana nakon primene bez drugih komplikacija.

Prve studije i tretmani na ljudima sprovedeni su sa litotriptorima koji su dizajnirani za terapiju udarnim talasima u urologiji. Zbog anatomske decentralizacije terapijskih područja (od ramena do stopala), bilo je nužno proizvesti specijalne uređaje za primenu udarnih talasa u ortopediji. Prvi takav uređaj ugledao je svetlo dana tokom 1993. godine, a bio je opskrbljen slobodnim pomicnim aplikatorom.

Početkom devedesetih godina objavljeni su prvi izveštaji o primeni udarnih talasa na rotatornu manžetu za tetivni kompleks ramenog zgloba. Daljnja istraživanja dovela su do terapijskih protokola za lateralni epikondilitis i plantarni fascitis sa uspehom koji se kretao između

70% i 80%. Zbog rastuće važnosti terapije udarnim talasima u lečenju hroničnih stanja na mekim tkivima sistema za kretanje, proizvedena je nova generacija uređaja za ovu metodu lečenja. Do danas, naučna evaluacija terapije udarnim talasima za ortopedска stanja značajno je napredovala, te je dostupno mnogo radova na tu temu. Iako unutar njih postoji mnogo razlika u pogledu dizajna, metoda i sadržaja studija, većina njih se slaže da terapija udarnim talasima poseduje visoku efikasnost, u kombinaciji sa minimalnim propratnim pojavama.

3.3. Fizičke osnove

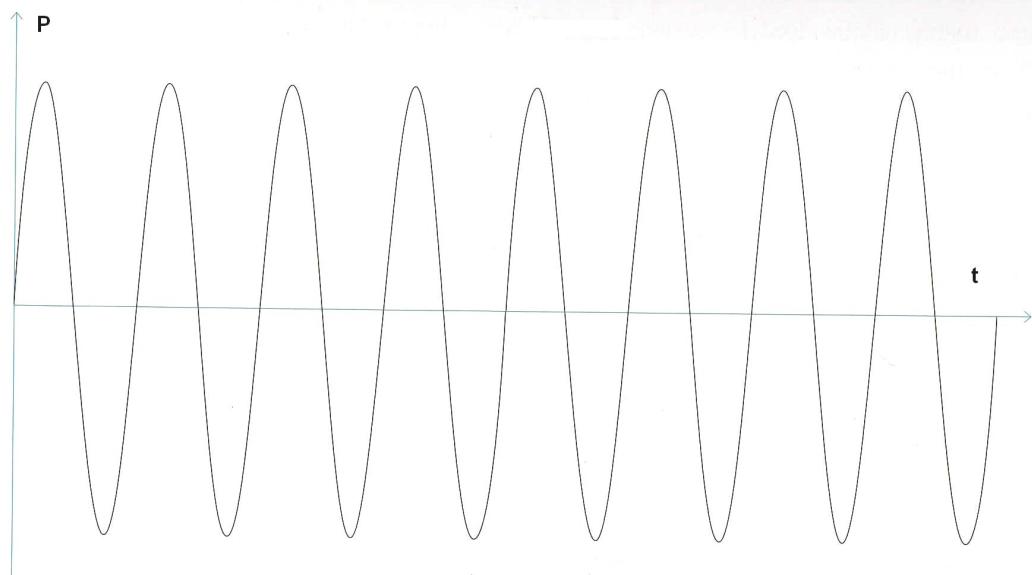
Fokusirani udarni talasi i talasi sfernog pritiska danas se koriste u medicinskoj praksi. Udarni talasi i talasi pritiska ne razlikuju se samo po svojim fizičkim karakteristikama i tehnikama korišćenim za njihovo generisanje, nego i po redu veličine uobičajeno korišćenih parametara.

Takođe se razlikuju i u pogledu terapijske dubine prodiranja u tkivo. Poseban oblik fokusiranih udarnih talasa su *ravni (nefokusirani) udarni talasi*. Oni imaju efekat neposredno uz površinu, slično talasima sfernog pritiska. Uzrokuju slabiji bol i slični su fokusiranim udarnim talasima u smislu efikasnosti. U praksi, talasi sfernog pritiska se takođe nazivaju *sferni udarni talasi*, uprkos činjenici da to fizički nije tačno.

Uprkos njihovoj povezanosti sa ultrazvukom, udarni talasi se u osnovi razlikuju po tome što imaju izrazito velike amplitude pritiska. Zbog ovoga, efekti njihovog prodiranja, shodno njihovoj nelinearnosti, u sredini delovanja (voda, ljudsko tkivo...) moraju biti razmotreni.

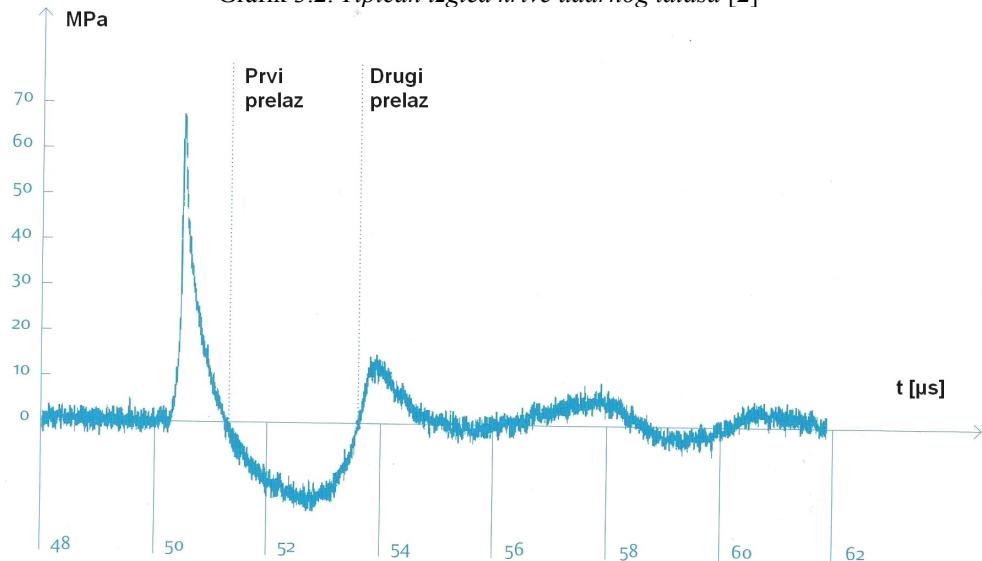
Nadalje, ultrazvuk se obično sastoji od periodičnih oscilacija sa ograničenom širinom opsega [Grafik 3.1.], dok su udarni talasi predstavljeni jednim, uglavnom pozitivnim pulsom, koji je praćen manjim *tenzilnim*⁴ komponentama [Grafik 3.2.]. Takav puls varira od nekoliko kHz do preko 10 MHz.

Grafik 3.1. Tipični ultrazvučni signal [2]

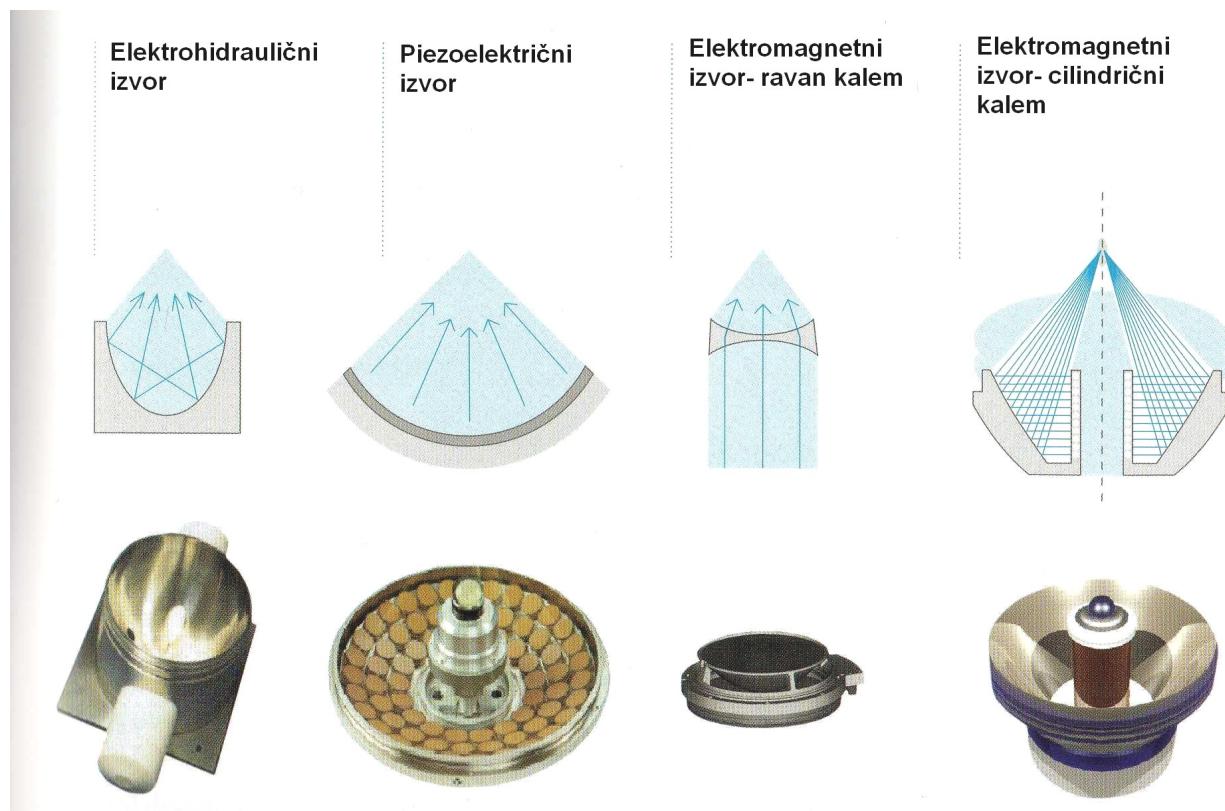


⁴ Pod tensilnim komponentama se podrazumevaju one komponente talasa koje nastaju nakon prolaska udarnog talasa, pri relaksaciji sredine.

Grafik 3.2. Tipičan izgled krive udarnog talasa [2]



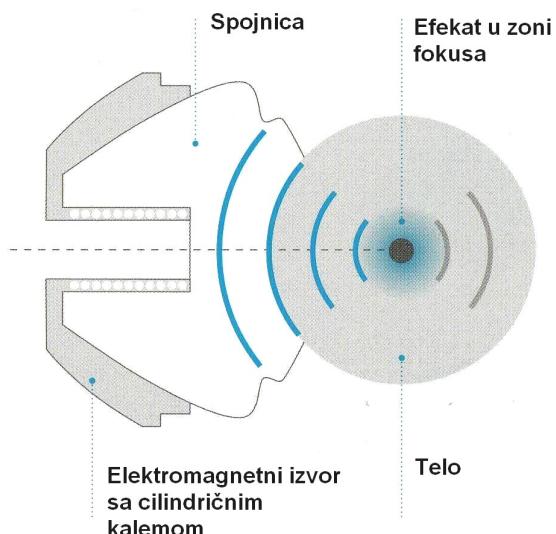
Fokusirani udarni talasi mogu biti generisani *elektrohidrauličnim*, *piezoelektričnim* i *elekromagnetnim tehnikama* [Slika 3.2.].



Slika 3.2. Izvori udarnih talasa koji se koriste u medicini [2]

Kod elektrohidrauličnog principa, udarni talasi se generišu direktno na izvoru, dok se kod druga dva principa generišu preklapanjem tek u fokalnim zonama. Piezoelektrični udarni talasi imaju najmanju zonu fokusiranja dok elektrohidraulični udarni talasi imaju najveću. Zbog ovoga, delom, zahtevana doza za lečenje zavisi od tipa uređaja.

U poslednjih nekoliko godina, trend korišćenja elektromagnetne metode generisanja postao je vrlo prisutan. Elektromagneti generatori smanjuju zahtevnost postupka i takođe omogućavaju precizno i neagresivno doziranje energije udarnog talasa, aksijalno i lateralno. Metod elektromagnetnog generisanja udarnih talasa zasnovan je na principu elektromagnetne indukcije⁵. Koristi se ili ravan kalem sa akustičnim sočivom ili cilindrični kalem. U drugom slučaju, udarni talasi se fokusiraju upotrebom *rotacionog paraboloida* (autorska prava u vlasništvu Storz Medical technology). Zbog relativno velike površine delovanja izvora udarnih talasa (u odnosu na veličinu površine fokusa), energija udarnih talasa može nežno da prođe u ljudsko telo kroz veću površinu uz samo manji osećaj bola. Energija se u potpunosti oslobađa u relativno maloj zoni fokusa u telu [Slika 3.3.].



Slika 3.3. Oslobađanje energije udarnih talasa u telu [2]

Kako su udarni talasi akustični talasi, neophodna im je sredina prostiranja. U slučaju medicinske upotrebe udarnih talasa, sredina je obično voda, gde se udarni talasi generišu izvan tela pre njihovog delovanja na biološko tkivo. Pošto se tkivo uglavnom sastoji od vode, akustična svojstva koja su data akustičnom impedancom su veoma slična, što znači da gotovo nema gubitka tokom dodira sa telom. *Akustična impedance* je definisana kao: , gde je ρ - gustina, a V - brzina zvuka.

Dodirna površina na kojoj se akustična svojstva gustine i brzine zvuka menjaju, dovodi do odstupanja od pravolinijskog prostiranja talasa odnosno do *prelamanja, odbijanja, rasejavanja i difracije*. Ovi efekti moraju biti uzeti u obzir kod primene udarnih talasa na ljude kako bi se obezbedilo da energija bude oslobođena u zoni terapije.

Iz ovog razloga prvi uređaj za razbijanje kamena u bubregu zahtevao je da pacijent bude položen u korito sa vodom. Današnji uređaji rade na principu takozvanog „suvog“ dodira, što znači da je vodeno okruženje povezano sa telom preko fleksibilne membrane. Sloj vazduha eliminisan je gelom ili tankim vodenim slojem.

Nezavisno od ovoga, mora biti obezbeđeno da nijedan organ ispunjen vazduhom (pluća) ili velike koštane strukture ne budu na putu do tačke na koju se deluje. Oni bi predstavljali prepreku na polju prostiranja udarnih talasa do ciljne zone i prema tome sprecili željeni efekat terapije. Takođe se mora imati na umu da meka tkiva (koža, masnoća, mišići, tutive...) nisu akustički homogene.

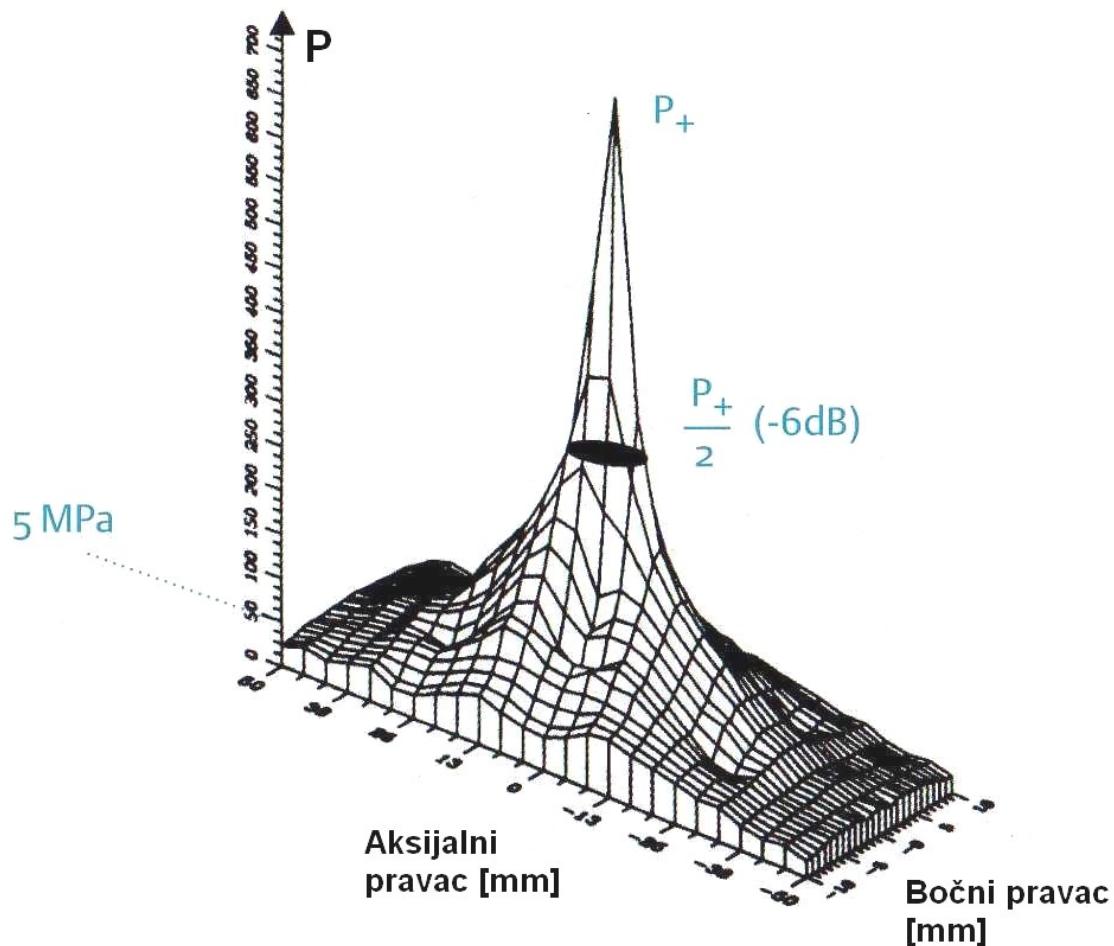
⁵ Elektromagnetska indukcija stvara potencijalnu razliku (napon) u provodniku koji se nalazi u promenljivom magnetnom polju.

Međutim, razlike u akustičnim svojstvima su znatno manje nego na granici između vode i vazduha. Pored apsorpcije i odbijanja, dolazi i do efekta prelamanja što može dovesti do odstupanja od pravolinijske putanje prostiranja udarnih talasa u telu koji je teško kontrolisati.

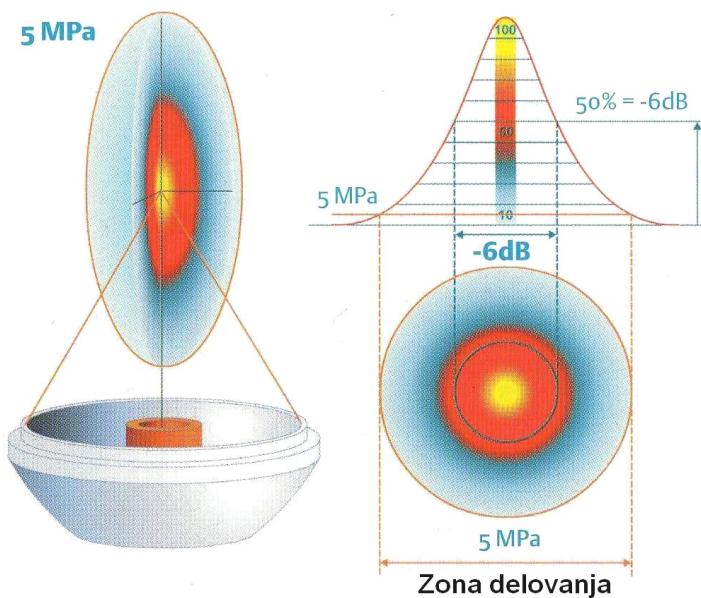
Udarni talasi se određuju mernim instrumentima koji sadrže senzore pritiska. Udarni talasi korišćeni u medicini [Grafik 3.2.] pokazuju tipične vrednosti pritiska od 10 do 100 MPa za pik P_+ što je ekvivalentno 100-1000 puta atmosferskog pritiska. Vremena rasta T_r su veoma kratka (oko 10-100 ns), u zavisnosti od metoda generisanja. Dužina trajanja pulsa T_w (od približno 0,2-0,5 μs) je takođe prilično kratko u poređenju sa talasima pritiska korišćenim u medicini, a opisanim u daljem tekstu [Grafik 3.4.]. Još jedna karakteristika udarnih talasa je relativno niska tenzilna komponenta talasa P_- , koja je oko 10% vrednosti pika P_+ .

Ako vrednosti pika P_+ izmerene u različitim pozicijama u polju udarnih talasa prenesemo u 3D sliku (duž pravca prostiranja udarnih talasa, normalno i bočno na njega), rezultat je tipičan grafik distribucije [Grafik 3.3.]. Očigledno je da polje udarnog talasa nema oštре granice nego oblik planine sa vrhom u sredini pika i manje-više strmim padinama. Ovaj fenomen naziva se „planina pritiska“. Različiti uređaji za udarne talase razlikuju se po obliku i visini u ovom 3D prikazu.

Grafik 3.3. Tipična raspodela pritiska udarnog talasa u obliku „planine pritiska“ [2]

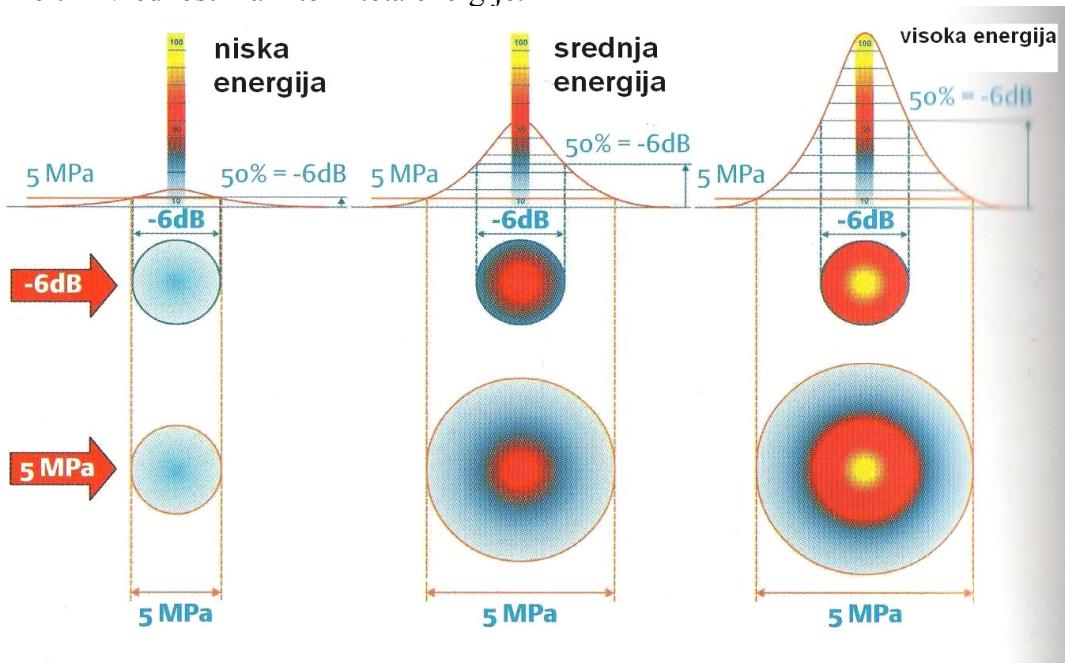


Fizički gledano, *fokalna zona* je definisana kao oblast u polju udarnog talasa u kojoj su izmereni pritisci viši ili jednaki polovini pika [Slika 3.4.]. Ona se takođe zove *fokalna zona -6dB* ili je opisana uz pomoć skraćenice *FWHM* (Full Width at Half Maximum, odnosno Puna Širina na Polovini Maksimuma). Fokalna zona je oblast najvećeg intenziteta energije. Njena veličina je gotovo nezavisna od intenziteta.



Slika 3.4. Distribucija pritiska sa fokalnom zonom [2]

Samo utvrđivanjem nivoa energije moguće je predočiti oblast u kojoj će udarni talas razviti svoj biološki efekat. Drugačije rečeno, oblast delovanja udarnog talasa u telu nije data veličinom fokusa na -6 dB. Ona može biti veća ili manja. Shodno tome, definisan je dodatni parametar koji je bliže povezan sa terapijskim efektom i nije baziran na relativnim vrednostima (veza sa pikom u centru), nego na apsolutnoj vrednosti, odnosno pritisku od 5 MPa (50 bara). Prema tome fokus pri 5MPa definisan je kao prostorna zona u kojoj je pritisak udarnog talasa veći ili jednak 5 MPa. Prepostavlja se da postoje određene granice vrednosti pritiska, ispod kojih udarni talasi nemaju ili imaju minimalan terapijski efekat. Ne postoji naučni dokaz za vrednosti od 5 MPa. Međutim, ova definicija nudi mogućnost sagledavanja promena u zoni delovanja u zavisnosti od odabrane vrednosti intenziteta energije [Slika 3.5.]. Fokalna zona na -6 dB ostaje gotovo nepromjenjena uprkos različitim vrednostima intenziteta energije.



Slika 3.5. Prikaz fokalne zone -6 dB i zone delovanja pri 5 Mpa pri različitim vrednostima intenziteta energije [2]

Energija primjenjenih udarnih talasa je važan parametar u praktičnoj upotrebi, mada je *gustina energetskog fluksa* danas čak i važnija. Može se prepostaviti da udarni talasi mogu imati

efekat na tkivo samo ukoliko je prekoračen određeni prag energije. Prateći tok krive pritiska zavisnosti $p(t)$ i akustične impedance (Z), dobijena je sledeća relacija:

$$\frac{E}{S} = \int p v dt ,$$

gde se integracija vrši po dužini trajanja pulsa. Ovo se može smatrati akustičnim ekvivalentom izrazu da je rad jednak proizvodu sile i pređenog puta, pri čemu je E/S ekvivalent radu, p sili, a $v dt$ pređenom putu. Brzina se potom može predstaviti kao $v = \frac{p}{Z}$ (jer je $p = \rho v^2$, a $Z = \rho v$), pa je

$\frac{E}{S} = \int p \frac{p}{Z} dt \Rightarrow E = \frac{S}{Z} \int p^2 (t) dt$. Ustanovljena je razlika u zavisnosti od toga da li integraljeni pritisak po vremenu uključuje pozitivne komponente pritiska ($E+$) ili takođe pokriva i negativne (tenzilne) komponente (E_{total}). Ukupna energija je obično data sa E bez indeksa *total*. Po pravilu nekoliko stotina ili hiljada pulseva udarih talasa se emituje tokom jednog tretmana, tako da se ukupna upotrebljena energija dobija njihovim sumiranjem. Jedinica za akustičnu energiju pulsa udarnog talasa se izražava u [mJ].

Kao što smo ranije naveli, terapijski efekat udarnih talasa zavisi od toga da li je njihova energija raspoređena na veće područje ili je koncentrisana na ograničenu zonu delovanja (fokalna zona). Koncentracija energije dobija se izračunavanjem energije po površini:

$$\Phi = \frac{E}{S} = \frac{1}{Z} \int p^2 (t) dt \left[\frac{\text{mJ}}{\text{mm}^2} \right],$$

i ona u stvari predstavlja gusinu energetskog fluksa. I ovde imamo razliku između integraljenja pozitivnog dela krive pritiska sa jedne strane i sa druge strane uključujući i negativni deo.

Prvi sistemi udarnih talasa radili su na elektrohidrauličnom principu. Energija obično nije bila iskazivana u [mJ/mm^2] nego u kilovoltima [kV]. Kako su ovi uređaji još uvek u upotrebi, sledeća tabela prikazuje odnos među ovim skalama vrednosti (Ossatron).

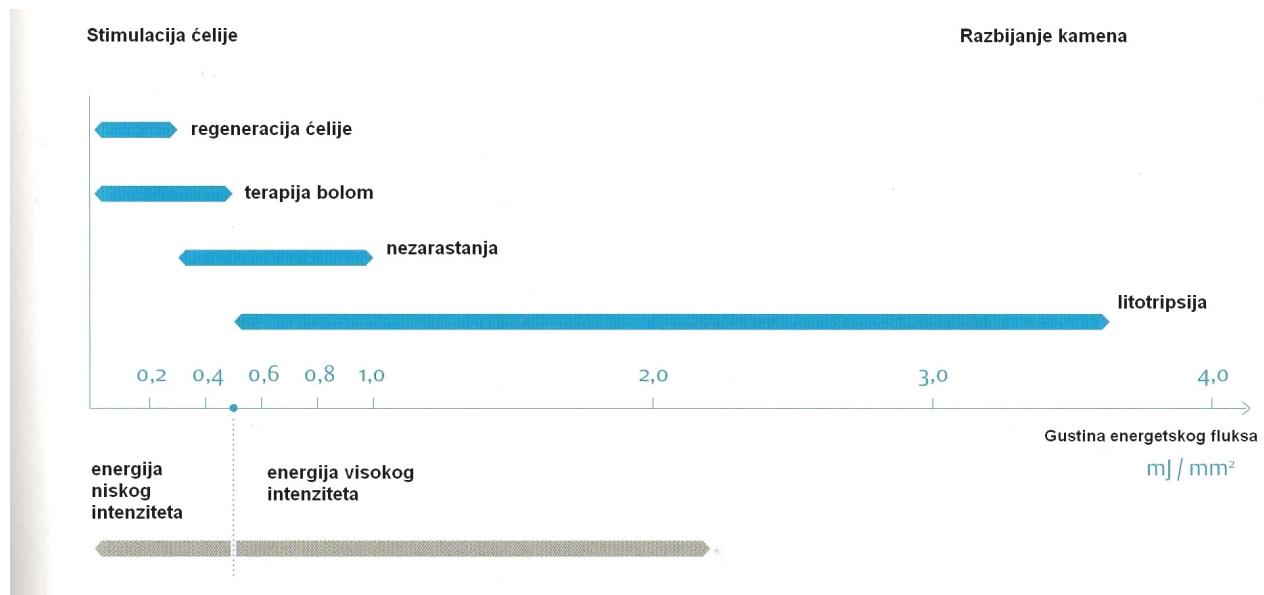
Tabel 3.1. Uporedni prikaz određenih intenziteta energije izražen preko napona i energetskog fluksa

Vrednosti energije			
Preko napona [kV]	14	24	28
Preko fluksa energije [mJ/mm^2]	0,18	0,30	0,40

Udarni talasi imaju drugačije karakteristike od ultrazvuka. Ultrazvuk proizvodi opterećenje na tkivo u visokofrekventnom opsegu od nekoliko MHz što dovodi do zagrevanja, kidanja tkiva i kavitacije pri visokim amplitudama. Jedan faktor koji određuje efekat udarnih talasa jeste direktno usmeren moment sile u pravcu prostiranja talasa. Sila koja deluje na površinu može biti uvećana da omogući razbijanje kamena u bubregu. Pošto se ovakvi dinamički efekti odvijaju na površini sa povećanjem akustične otpornosti, a gotovo nikad u homogenim sredinama (tkivo, voda), udarni talasi su idealno sredstvo za postizanje efekata u dubini tkiva a da pri tom ne ugrožavaju tkiva kroz koja prolaze.

Čak i male nehomogenosti unutar mekih tkiva trpe određeni moment sile udarnih talasa. U zavisnosti od intenziteta [Slika 3.6.], mogući su mehaničko razaranje ćelija, membrana, šupljih kostiju kao i stimulaciju ćelija preko reverzibilnih deformacija ćelijske membrane. Na ovaj način moguće je razoriti čvrste strukture (kamen u bubregu) ili iritirati, odnosno stimulisati tkivne

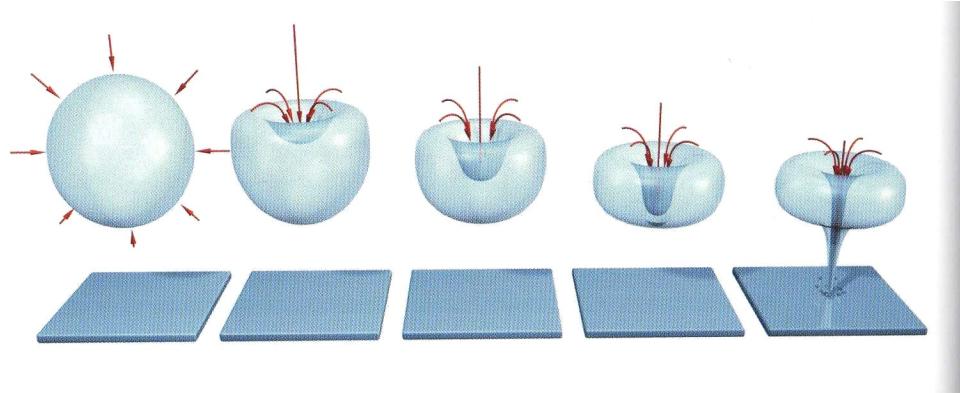
strukture, što vodi do procesa izlečenja (ovo se posebno može videti prilikom primene u ortopediji). Fokusiranje omogućava da se dejstvo ograniči na ciljnu oblast dok u isto vreme umanjuje sporedne efekte izvan te oblasti.



Slika 3.6. Tipična polja delovanja udarnih talasa u medicini i odgovarajući intenziteti energije [2]

Kao posledica terapije udarnim talasima obično se uočava poboljšanje metabolizma i povećanje krvne cirkulacije čiji je rezultat proces izlečenja.

Pored direktnog dinamičnog efekta udarnih talasa na površinama, takozvana kavitacija događa se u određenim sredinama kao što je voda i ponekad tkivo. Inplozijom kavitačijskih mehura formiraju se mikro-mlazevi [Slika 3.7.] koji sadrže veliku količinu energije i snage prodiranja, tako da ne samo da mogu erodirati čvrstu površinu kamena nego i prodreri kroz zidove malih sudova. Ovo uzrokuje mikro krvarenja ili perforacije membrana. Kavitacija nije ograničena na fokalnu zonu nego je tamo naročito izražena.



Slika 3.7. Stvaranje mikro-mlaza pri inploziji kavitačijskog mehura [2]

Fizički efekti napred opisani uzrokuju biološke reakcije. Sledeći efekti su naučno dokazani i istraženi:

- povećanje ćelijske propustljivosti,
- stimulacija mikrocirkulacije (krv, limfa),
- oslobođanje supstance P,
- redukcija nemijelinskih nervnih vlakana,

- oslobađanje azot-oksida (NO) što uzrokuje vazodilataciju, poboljšava metabolizam i angiogenezu (neovaskularizaciju) i ima antiinflamatorni efekat,
- antibakterijski efekat,
- oslobađanje faktora rasta (krvni sudovi, epitel, kosti, kolagen...) i
- stimulacija stem (matičnih) ćelija.

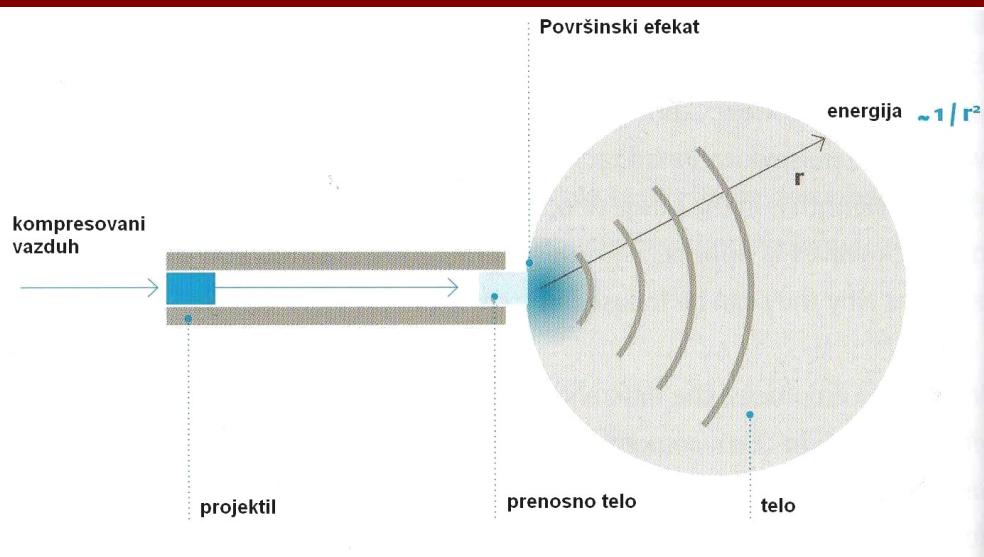
Za selektivnu primenu udarnih talasa neophodno je odrediti fokalnu zonu unutar ciljane oblasti na koju treba delovati. U slučaju kamena (litotripsija), kostiju ili nekih drugih tkivnih struktura, moguće je koristiti X-zrake ili ultrazvuk. Kod terapije bola tačka maksimalnog bola se lokalizuje prostom komunikacijom sa pacijentom. Ovaj biološki odgovor pomaže da se lokalizuju površinske i dublje tačke delovanja.

3.3.1. Sferni talasi pritiska

Osim fokusiranih udarnih talasa prethodno opisanih, u modernoj medicini se danas koriste i sferni talasi pritiska. Oni se koriste od devedesetih godina prošlog veka i isplativa su alternativa naročito u lečenju mišićno-skeletnih indikacija. Od momenta njihove primene u medicini, oni su iz marketinških razloga nazvani radikalni udarni talasi zbog velike sličnosti rezultata dobijenih nakon terapije, pa je ujedno uveden i naziv *terapija sfernim udarnim talasima*. Sa stanovišta fizike, udarni talas nije tačan naziv za sferne talase pritiska. Dužina trajanja pulsa sfernih talasa pritiska je značajno duža i talasna dužina je u rasponu od 0,15-1,5 m u poređenju sa značajno manjom talasnom dužinom udarnog talasa koja je približno 1,5 mm. Ovo objašnjava zašto udarni talasi, za razliku od talasa pritiska, mogu da se fokusiraju.

Sa ciljem da se naglase razlike između ova dva tipa talasa (i u pogledu efekta), izraz *terapija vantelesnom pulsnom aktivacijom EPAT* (Extracorporeal Pulse Activation Therapy) se preporučuje za sferne talase pritiska. Ipak, ovaj naziv može da uključi i fokusirane i nefokusirane udarne talase jer svi ovi akustični talasi pritiska imaju pulsni signal.

Talasi pritiska su generisani sudarom čvrstih tela [Slika 3.8.]. Prvo se projektil ubrzava (na primer kompresovanim vazduhom kao u slučaju vazdušne puške), do brzine od nekoliko metara po sekundi (otprilike 5-25 m/s, daleko manjim od brzine zvuka u vodi koja je 1500 m/s) i potom naglo usporava udarajući u prenosno telo (transmitem). Elastično potisnuto prenosno telo dovodi se u neposredan kontakt sa površinom tela pacijenta iznad oblasti na koju se deluje, koristeći ultrazvučni gel ili ulje za masažu. Kada se projektil sudari sa prenosnim telom, deo njegove kinetičke energije se prenosi telu koje se takođe translatorno pomera na malu udaljenost (obično manju od 1 mm) pri brzini od oko 1 m/s (a obično i manjom) sve dok naležuće tkivo ili ručica pištolja [Slika 3.9.] ne uspori kretanje prenosnog tela. Kretanje prenosnog tela prenosi se tkivu u dodirnoj tački gde se generiše sferni talas pritiska koji se divergentno širi.



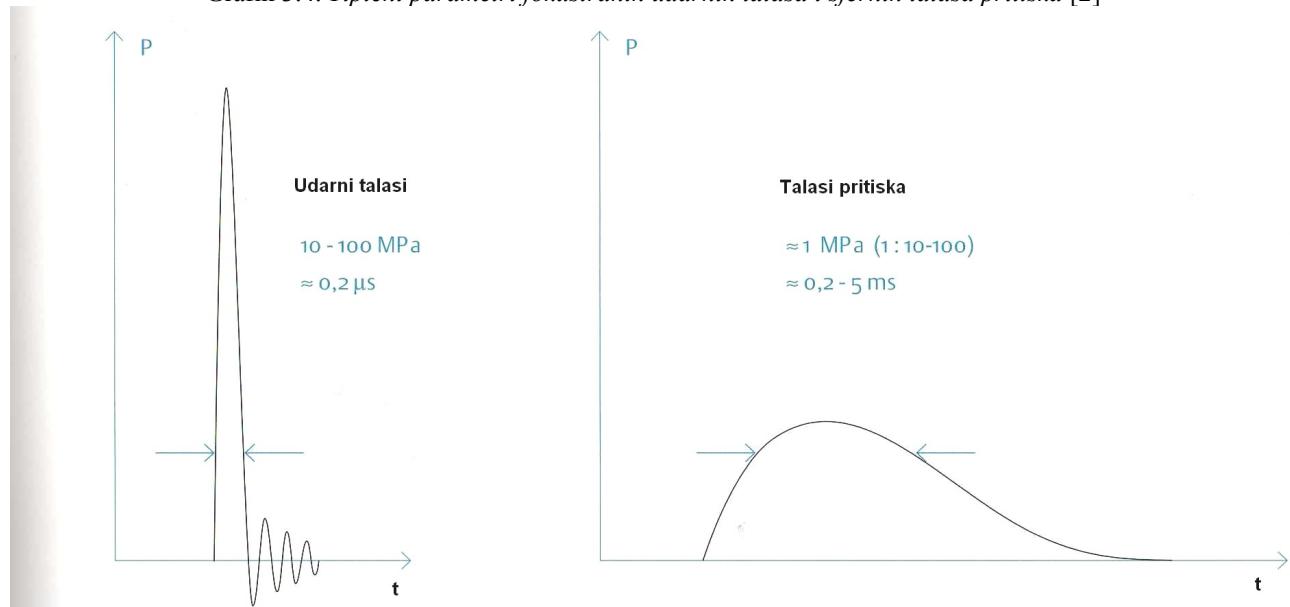
Slika 3.8. Prikaz nastanka balističkog, pneumatski generisanog talasa pritiska i njegovog površinskog efekta [2]



Slika 3.9. Ručica pištolja za terapiju sfernim udarnim talasima

Dužina trajanja talasa pritiska [Grafik 3.4.] određena je translatornim pomeranjem prenosnog tela i obično traje 0,2-5 ms unutar tkiva. Puls pritiska predatog tkivu tako traje 1000 puta duže od udarnih talasa prethodno opisanih. Pik pritiska je značajno niži kod ove metode (0,1-1 MPa).

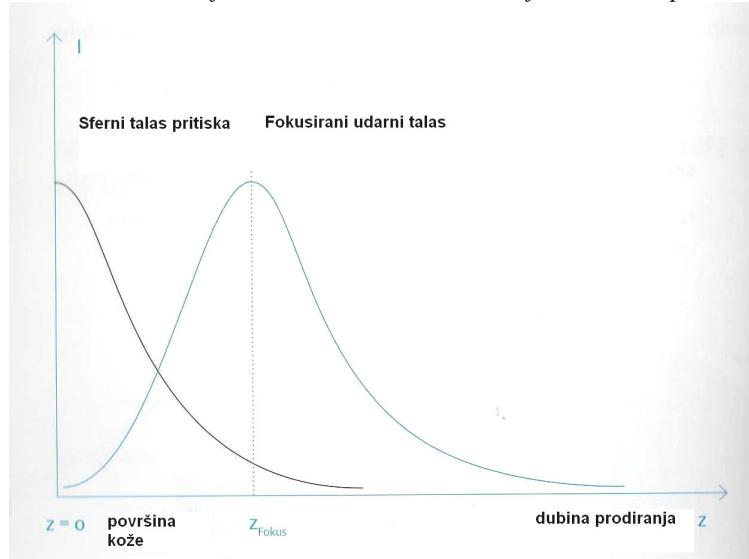
Grafik 3.4. Tipični parametri fokusiranih udarnih talasa i sfernih talasa pritiska [2]



Sudar prouzrokuje dodatni visokofrekventni akustični talas u prenosnom telu. Usled značajne razlike dve akustične impedance (metal, voda), samo mali deo (oko 10%) oscilatorne energije je izračena u tkivo ili vodu. Energija sadržana u visokofrekventnoj akustičnoj oscilaciji je nekoliko redova veličine manja od energije sadržane u navedenom niskofrekventnom pulsu pritiska.

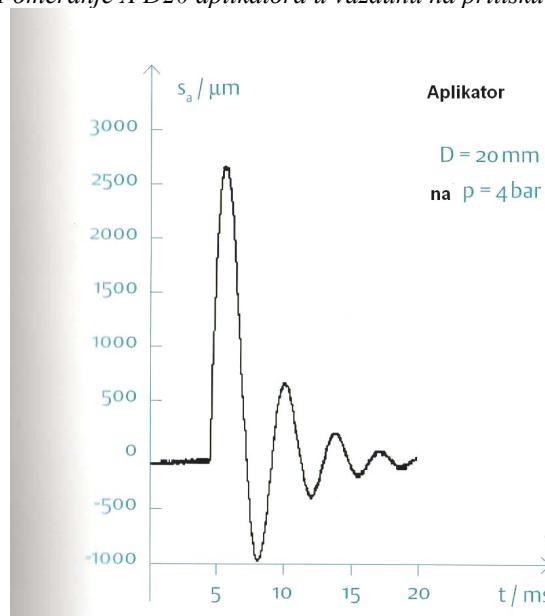
Kako je opisano, talasi pritiska prenose se od tačke dodira sa prenosnim telom i kreću se sferno u susedno tkivo. Gustina energije uvedenog pritiska talasa brzo opada sa povećanjem udaljenosti od tačke primene ($\sim 1/r^2$) te je najveći efekat u tački dodira prenosnog tkiva sa telom (transmiterom) dakle na površini kože [Grafik 3.5.].

Grafik 3.5. Krive intenziteta fokusiranih udarnih talasa i sfernih talasa pritiska u telu [2]



Zbog značajno dužeg trajanja pulsa i niske vrednosti pritiska, uobičajeno korišćeno merenje pomoću pritiska udarnih talasa nije odgovarajuće. Mnogo je efikasnije meriti pomeranja prenosnog tela [Grafik 3.6.] i silu prenetu na viskoelastično *fantomsко tkivo*. Međutim, kako ovi parametri značajno zavise od prenosnih tela (transmitera) koja se koriste, uobičajeno je da se pritisak koji ubrzava projektile, indikuje kao stepen intenziteta.

Grafik 3.6. Pomeranje A D20 aplikatora u vazduhu na pritisku od 4 bara [2]



Sferni talasi pritiska uzrokuju oscilacije u tkivu koje vode do pojačanja mikrocirkulacije i metabolizma. Uprkos brojnim terapijskim uspesima, pravi biološki efekti jedva da su istraživani.

Udarni talasi i talasi pritiska razlikuju se ne samo po svojim fizičkim karakteristikama i tehnikama generisanja, već i po vrednosti najčešće korišćenih parametara i po terapijskoj dubini prodiranja u tkivo. Osnovne razlike su ukratko sumirane u Tabeli 3.2. Zanimljivo je da stimulacioni efekti i terapijski mehanizmi izgledaju delom vrlo slično, uprkos fizičkim razlikama i, saglasno tome, različitim područjima dejstva (na površini i u dubini). Sferni talasi pritiska su vrlo pogodni za ortopedске indikacije blizu površine. U slučaju sindroma miofascijalnog bola, sferni talasi pritiska su nezamenjivi za opuštanje mišića pre ili posle tretmana fokusiranim udarnim talasima. U terapiji lociranog bola, hroničnih tendinitisa (zapaljenje tkiva tetiva) i tačaka žarišta, primena fokusiranih udarnih talasa je mnogo delotvornija. Ravnii (nefokusirani) udarni talasi se prvenstveno koriste kod lečenja miogeloza i dermatoloških ili estetskih indikacija.

Tabela 3.2. Pregled osnovnih razlika između udarnih talasa i talasa pritiska

Udarni talas		Talas pritiska
100-1000 bara	Pritisak	1-10 bara
$\approx 0,2 \mu\text{s}$	Trajanje pulsa	0,2-0,5 ms
Fokusiran	Polje pritiska	Radijalan, divergentan
Velika	Dubina prodiranja	Mala, površinska
Ćelije	Efekat	tkivo

3.4. Mehanizmi delovanja udarnih talasa

Ćelijska deoba i obnova tkiva ne bi bili mogući bez atmosferskog pritiska. Ako je pritisak previšok dolazi do *apoptoze* (programirane ćelijske smrti). Iz medicine prostora zna se da manjak gravitacione sile dovodi do smanjenja mišićnih vlakana što je praćeno *osteoporozom* (gubitak koštane mase). U slučaju *osteosinteze*, razvijanje dinamičkog pritiska u oblasti frakture je preduslov za njeno idealno zaceljenje. U slučaju *displazije kukova* (obuhvata specifične razvojne i druge anomalije) kod novorođenčadi, ciljani razvoj fiziološkog pritiska neophodan je u sprovođenju terapije imobilizacijom. Svaki mehanički stimulans kao što su pritisak, tenzija i stres uzrokuje biološku reakciju u tkivu i prema tome to može biti očekivano i od fokusiranih ravnih i sfernih udarnih talasa. Praćenjem kliničkog progrusa tokom primene terapije udarnim talasima brzo se dolazi do zaključka da umerena gustina energetskog fluksa (Φ) udarnih talasa može biti jedan od efikasnih parametara u tretmanu kod ćelijske obnove i regeneracije.

Pitanje idealne doze energije još uvek nema odgovor. Svakodnevna praksa pokazuje da češći impulsi i smanjena učestanost tretmana kao i duži intervali i niske frekvencije uvećavaju šansu pozitivnog rezultata terapije. Današnji principi tretmana udarnim talasima zasnovani su na osnovnom istraživanju. Fizičke sile koje su važne kod razbijanja kamena u bubregu nisu odlučujući faktor u primeni terapije udarnim talasima u ortopediji. Molekularno-biološki procesi su odgovorni za glavni efekat.

U eksperimentima na životnjama osteogeneza butne kosti pacova postignuta je gustinom energetskog fluksa koji nije izazvao nikakvu mehaničku destrukciju. Rezultati u tretmanu pseudoartroze takođe su unapređeni redukcijom energije i upotreboom manje pulseva. Pri ovom postupku pretpostavlja se da je postignut veći molekularni ćelijski efekat.

Iskustva u vezi sa naknadnim lečenjem preloma i pseudoartroze ukazuju da su jedan do dva tretmana i relativno niska gustina energetskog fluksa (20 kV, ili $0,25-0,3 \text{ mJ/mm}^2$, približno 3000 pulseva) dovoljni. Kod tretmana entezopatija, dva tretmana gustine energetskog fluksa $0,20-0,30 \text{ mJ/mm}^2$ dovoljna su u većini slučajeva. Gerdesmayer je otkrio da je za vreme dezintegracije

kalcificiranih konkremenata u ramenu, grupa tretirana gustinom energetskog fluksa od $0,30 \text{ mJ/mm}^2$ imala bolje rezultate od grupe tretirane nižim dozama $0,08-0,15 \text{ mJ/mm}^2$ (mada je ova grupa još uvek pokazivala napredak u poređenju sa *placebo* grupom) [1].

Mehanička energija udarnih talasa pretvara se u hemijsku energiju u vezivnom tkivu *vanćelijskog matriksa* (koji čini sve ono što se nalazi u tkivu, a ne ulazi u sastav ćelije; oznaka ECM). Uz pomoć proteinskih, takozvanih *integrina* (receptora ćelijske membrane), i jonskih kanala, ova energija se usmerava u ćelijsko jedro preko ćelijskog skeleta. U ćelijskom jedru ovaj niz signala indukuje gensku transkripciju i gensku ekspresiju što ima za posledicu formiranje mehanički senzitivnih kinaza i povećanja kolagenaza. Ovaj oblik bioinženjeringa udarnim talasima zove se *mehanotransdukcija*. Fibroci su stimulisani da formiraju kolagenska vlakna koja imaju stabilizujući efekat, na primer u oblasti tetiva. Na mehanotransdukciju utiču frekvencija, amplituda pritiska, intenzitet i trajanje tretmana udarnim talasima. Ovaj zaključak izведен je iz kliničkih observacija. Na osnovu svojih osnovnih istraživanja i naučnog znanja u vezi sa mehanotransdukcijom, Neuland i Dutchstein mogli su da daju prihvatljivo objašnjenje efekta terapije udarnim talasima [1].

Međutim, efekat terapije udarnim talasima kod sindroma miofascijalnog bola ostaje nejasan i nije naučno dokazan. Efekat sile sabijanja i sile istezanja na vlakna vanćelijskog matriksa je neophodan za održavanje fiziološke stabilnosti i obnovu tkiva. Vanćelijski matriks se sastoji od sitaste mreže polisaharida i služi kao most između kapilara i ćelija (i obrnuto). Istraživanja matriksa prepostavljaju da svaka ćelijska funkcija zavisi od strukture i funkcije vanćelijskog matriksa (osnovna supstanca) i od veze vanćelijskog matriksa sa terminalnim kapilarima, kao i sa hormonskim i nervnim sistemom. Vezivno tkivo je veza između kože, kostiju, krvnih sudova, nerava i mišića. Čak i najnormalniji pokret zgloba izaziva promenu pritiska i rastezanja kože, vantelesne bazične supstance i (mišićnih) ćelija i važan je za obnavljanje tkiva. Postavlja se pitanje da li se isti efekat postiže udarnim talasima preko vanćelijskog matriksa.

Ravni i sforni udarni talasi mogu usmeriti sile smicanja u površinske slojeve mišića i, posle otpuštanja neurovaskularno aktivnih supstanci, dospeti u dublje slojeve mišića (preko mosta vanćelijskog matriksa) koji su obično dostupni jedino fokusiranim udarnim talasima.

Pored mehanizama delovanja o kojima smo govorili, sforni udarni talasi (talasi pritiska) verovatno dovode do modulacije bola u smislu kontrairitacije u slučaju miogeloza koje su ili raširene ili blizu površine. Iritacija nocioreceptora za brzi bol (preko A delta vlakana) dovodi do parcijalne inhibicije i blokade sporih C-vlakana za spori bol.. Stimulacija visokofrekvenih mišićnih oscilacija i 3D efekat na sarkomere kao rezultat toga mogu biti zanimljiv aspekt u pogledu pitanja mehanizma delovanja.

Drugi hipotetički model koji objašnjava efekat fokusiranih i sfornih udarnih talasa mogao bi biti eliminacija *ishemije* (smanjenog dotoka krvi) koja uzrokuje bol u mišiću endotelijalnim azotoksidom ranije pomenutim. Na primer, zadebljanje ili istegnuće pektoralnog mišića osjetljivo na pritisak može uzrokovati supraventrikularne (pretekomorske) aritmije i depresije ST segmenta EKG-a. Ove srčane promene nestaju posle uvođenja nitroglicerina.

Konačno, teoretski se mogu primeniti principi *sistema neprekidne tenzije* poznatog iz tehnologije na ljudsku biologiju sa ciljem da se objasni efekat udarnih talasa. Telo ostaje stabilno dokle god su statički i elastični elementi u ravnoteži. Kosti apsorbuju pritisak dok elastične veze mišićnih sistema apsorbuju sile istezanja.

U slučaju bolesti (tj. kada je ravnoteža poremećena usled mišićnih miogeloza i skraćenja mišića) mehanotransdukcija izazvana udarnim talasima i talasima pritiska može uticati i na gipkost tkiva i mišićnih sistema i vratiti ih u elastično stanje.

Postoje brojni teorijski modeli koji mogu objasniti efekte udarnih talasa. Eksperimenti na životinjama i kliničko iskustvo obezbeđuju naučni dokaz pozitivnog efekta udarnih talasa kod tretiranja pacijenata u naknadnom lečenju preloma. Udarni talasi oslobođaju osteogene supstance koje se detektuju i pri prirodnom zarastanju preloma. U slučaju entezopatija, pozitivni efekat udarnih talasa obično može biti naučno dokazan detektovanjem faktora koji se u telu proizvode prirodnim putem, a pojačavaju krvnu cirkulaciju i stimulišu vaskularizaciju.

3.5. Opšte napomene o lečenju udarnim talasima

Kada se tretiraju obolele tetive i njeni pripoji, obično je dovoljno 3-5 tretmana u periodu od 1-2 nedelje. Pri tretiranju miogeloza vrši se 6-8 ponavljanja u periodu 5-10 dana između pojedinačnih tretmana.

Tokom terapije udarnim talasima, svako različito oseća bol. Zbog toga je važno da se nađe odgovarajuća doza za svakog pacijenta i svaku indikaciju. Tretman treba da počne u tački maksimalnog bola. Kada je prva tačka bola eliminisana analgetskim efektom udarnih talasa (nakon oko 200 fokusiranih ili 400 sfernih pulseva), ostale tačke koje nisu mogle biti ranije otkrivene često se pojavljaju u istoj regiji. Na osnovu dijaloga između lekara i pacijenta se otkrivaju i tretiraju ostala bolna mesta. Oblast sa bolnim tačkama se „skenira“. Uopšteno, terapija počinje sa niskom vrednosti energije (bar ili mJ/mm^2) koja se sa svakim sledećim tretmanom povećava.

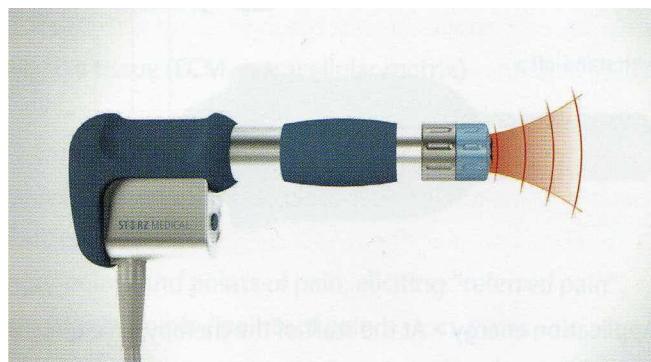
Pojedinačan bol i žarišta se lokalizuju *palpacijom* (opipavanjem) bolnih područja tokom komunikacije sa pacijentom. Često je lakše lokalizovati dubla ili difuzna bolna mesta pomoću udarnih talasa. Za dubla bolna područja u tkivu preporučuje se upotreba fokusiranih udarnih talasa. Što se više bolnih tačaka pronađe i ukloni pri jednom tretmanu, bolji su rezultati tretmana. Od suštinskog je značaja korišćenje dovoljno ultrazvučnog gela koji obezbeđuje efikasnije prenošenje udarnih talasa u tkivo.

Procedura tretmana klasičnih slučajeva indikovanih za terapiju udarnim talasima menjala se tokom godina. U prošlosti su bili tretirani samo pripaji tetiva. Danas se sve više uključuje i muskulatura. Moderni sistemi za terapiju udarnim talasima nude jedinstvenu mogućnost tretiranja tetiva i mišića istovremeno. Pripaji tetiva se sve više tretiraju samo fokusiranim udarnim talasima. Zatim se mišići sa kojima su tetive u vezi opuštaju sfernim udarnim talasima i uklanaju se miogeloze.

Sferni udarni talasi:

Sferni udarni talasi se sve više koriste u tretmanu sindroma miofascijalnog bola skeletnih mišića (miogeloza). Terapija počinje pri pritisku 1,8-2 bara. Ukoliko pacijent podnosi dobro ovu energiju i ukazuje na smanjenje bola, energija se može polako povećavati. Uopšteno govoreći, terapije se sprovode pri pritisku 2-3,5 bara. U zavisnosti od dubine bolne mišićne regije, neophodno je povećati pritisak pištoljem kako bi se osloboidle neovaskularne supstance kao rezultat sila smicanja (takozvana *tehnika pritiskanja*). Pri tretiranju osetljivih pacijenata, preporučuje se korišćenje niže početne frekvencije kako bi se pacijent navikao na udarne talase. Frekvencija se može povećavati tokom tretmana. Bolne miogeloze se tretiraju pri frekvenciji 12-15 Hz. Za opuštanje mišića frekvencija se povećava na 18-21 Hz i prati se pravac mišićnih vlakana. Broj pulseva zavisi od veličine i zadebljanosti obolele mišićne oblasti. Uglavnom se kreće između 1200 i 2400 pulseva.

Upotreba specijalnih transmitera za pištolj sfernih udarnih talasa [Slika 3.10.] preporučuje se u tretmanu većih i zadebljanih mišićnih grupa (tj. D-Actors® D₂₀ ili D₃₅ od Storz Medical-a [Slika 3.11.]). Ovi transmiteri ne prenose u tkivo samo akustične talase, nego i vibrirajuće impulse.



Slika 3.10. Pištolj sfernih udarnih talasa [2]

	A6, Ø 6 mm, AkuSt transmiter, radijalni udarni talasi Akupunktura udarnim talasima		F15, Ø 15 mm, »Focus Lens« transmiter, »Fokusirana« energija Površinske bolne regije, maseterični mišići, vrat, individualne triger tačke
	C15, Ø 15 mm, CERAm-x®, RSWT transmiter Aplikacija bez gela, za sve indikacije		D20-S, Ø 20 mm, D-ACTOR® transmiter, radijalni udarni talasi i vibrirajući pulsevi Terapija miofascijalnih triger tački, mišića i vezivnog tkiva, popravka fibroznih promena (karpal tunel sindrom), tretman dubljih mišićnih regija (npr.piriformni mišić, mišić gluteus minimus)
	R15, Ø 15 mm, RSWT transmiter, radijalni udarni talasi Tretman svih indikacija		D35-S, Ø 35 mm, D-ACTOR® transmiter, radijalni udarni talasi i vibrirajući pulsevi Terapija miofascijalnih triger tački, mišića i vezivnog tkiva, velikih leđnih mišića, zatetanje kože, lokalizacija triger tački, obnavljanje fibroznih promena (karpal tunel sindrom), tretman dubljih mišićnih regija (npr.piriformni mišić, mišić gluteus minimus)
	DI15, Ø 15 mm, Deep Impact® transmiter, »Energetski mlaz« Duboke ciljana područja, triger tačke, hronične bolesti, visoko-energetska aplikacija, idealna kombinacija sa D20-S/D35-S transmiterima za tretiranje problema sa mišićima		

Slika 3.11. Kratak pregled transmitera sfernih (radijalnih) udarnih talasa

Fokusirani udarni talasi:

Fokusirani udarni talasi posebno su korisni u tretmanu indikacija kao što su:

- insercione tendinopatije/entezopatije i kalcifikacije i
- žarišta i tačke bola u dubljim mišićnim slojevima.

Koristeći različite nastavke (adaptere) [Slika 3.12.] moguće je menjati dubinu prodiranja tako da ona i dubina bolne oblasti/dubina tačke žarišta budu iste. Za delotvoran tretman fokalna zona treba da se poklopi sa zonom dejstva. U zavisnosti od nastavaka, terapeutski efekat fokusiranih udarnih talasa dopire do dubine 12,5 cm.

Bez nastavka



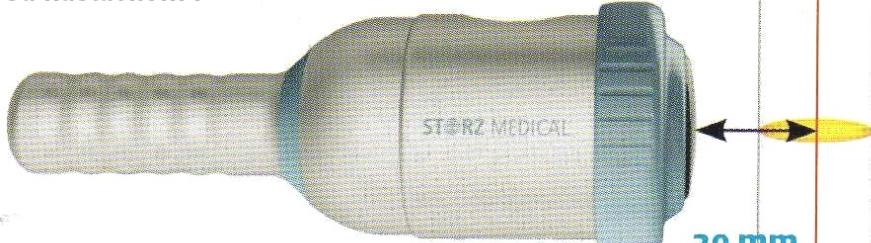
Fokalna zona

35 - 65 mm

Terapeutski
efekat

0 - 125 mm

Sa nastavkom I



Fokalna zona

15 - 45 mm

Terapeutski
efekat

0 - 105 mm

Sa nastavkom II



Fokalna zona

0 - 30 mm

Terapeutski
efekat

0 - 90 mm

Slika 3.12. Pištoli fokusiranih udarnih talasa (Storz Medical) sa elektromagnetskim kalemom (gore) i različitim adapterima za različite dubine prodiranja (redom na dole) [2]

Na početku terapije doza energije od $0,10 \text{ mJ/mm}^2$ koristi se da se lokalizuje tačka bola. Čim pacijent ukaže na umanjenje bola (posle približno 200 pulseva), energija se lagano povećava u skladu sa individualnim odnosom pacijenta prema bolu. Energija tretmana treba da bude između $0,10$ i $0,35 \text{ mJ/mm}^2$. Najbolji rezultati se postižu stalnim dijalogom sa pacijentom oslanjajući se na „biofeedback“ (pacijent prepoznaje bol ili ga definiše). Pacijenti sa akutnim indikacijama (nasuprot hroničnim problemima) treba da budu tretirani nižom vrednošću energije.

Kod tretmana bolnih tačaka fokusiranim zvučnim talasima, može biti korišćena najviša moguća frekvencija, u zavisnosti od nivoa energije (2-5 Hz). Iskustva u poslednjih nekoliko godina pokazuju da pri tretmanu miogeloze postižemo najbolje rezultate sa frekvencijom 2-4 Hz.

Kombinovani tretman sfernim i fokusiranim udarnim talasima:

Kombinacija sfernih i fokusiranih udarnih talasa objedinjuje prednosti obe tehnike. Sferni udarni talasi opuštaju mišice i vezivno tkivo (vanćelijski matriks). Sa fokusiranim udarnim talasima je moguće lokalizovati i tretirati pojedinačna mišićna zadebljanja (miogeloze) i pripojne teticu u različitim slojevima.

Sferni udarni talasi su pogodni za:

- opuštanje muskulature,
- smanjenje napetosti mišića,
- lokalizaciju i tretman površinskih žarišta,
- tretman širih područja i
- aktivaciju vezivnog tkiva (vanćelijskog matriksa).

Fokusirani udarni talasi su pogodni za:

- insercione tendinopatije, entezopatije,
- razbijanje kalcijumskih depozita,
- lokalizaciju žarišta i tačaka bola, simuliranje bola
- površna i duboka žarišta/ tačke bola

Pri korišćenju kombinovane terapije udarnim talasima, prvo počinje tretiranje tačke maksimalnog bola/žarišta fokusiranim udarnim talasima. Potom se u okolnom tkivu „skeniraju“ ostale tačke. Nakon toga se koristi tretman sfernim udarnim talasima za opuštanje mišića i za uklanjanje površinskih tačaka žarišta.

Sferni udarni talasi su pogodni za opuštanje ekstremno zadebljale ili napete mišićne grupe u kojoj su locirane miogeloze. Dublje miogeloze mogu biti lakše otkrivene fokusiranim udarnim talasima ili palpacijom.

Uopšteno govoreći, tokom prvog tretmana ne treba primenjivati veliki broj pulseva. U početku, preporučljivo je upotrebiti ne više od 1500-1800 fokusiranih i 2500-3000 sfernih talasa. Kasnije, broj pulseva može da se povećava.

V-actor®:

Pištolji poput V-actor®-a [Slika 3.13.] izazivaju same vibracione pulseve koji se koriste kao dopuna terapiji udarnim talasima. Visokofrekventne vibracije (35 Hz, fiziološko podrhtavanje mišića) aktiviraju i tretiraju meko tkivo, vezivno tkivo i mišice.

Vibrirajuća terapija-V-Actor



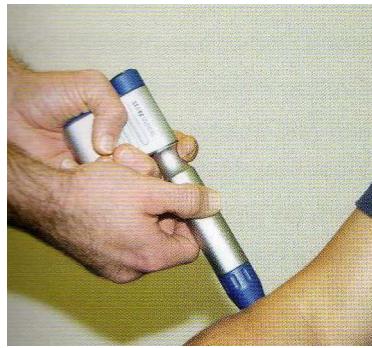
Slika 3.13. Pištolj V-actor®-a sa nastavcima

Upotreba V-actor®-a je preporučljiva nakon terapije udarnih talasa kako bi aktivirala tkivo unutar velike regije. Pored toga, tretman V-actor®-om je veoma opuštajući i pozitivno prihvaćen od strane pacijenta za razliku od terapije udarnim talasima koja često može da bude bolna.

Dijagnoza i merenje uspešnosti terapije sa F-metrom:

U svakodnevnoj praksi i procena bola i merenje uspešnosti terapije može biti problematično. Najvećim delom vremena pacijentov bol meri se pomoću *vizuelne analogne skale* (VAS). Sa svojim brojnim modifikacijama, VAS je pouzdano sredstvo za dokumentovanje trenutne situacije. Međutim, ova metoda ima svoja ograničenja i druge metode moraju biti uključene radi obezbeđenja detaljnijih informacija.

Takozvani *F-metar* [Slika 3.14.] razvijen je za diferencijaciju i procenu miofascijalnih žarišta. On je praktično rešenje za procenu miogeloza, miofascijalnog bola u specifičnim oblastima i sličnih oblasti osjetljivih na palpaciju. Senzorna glava instrumenta postavlja se na tačku bola i sve više pritiska dok pacijent ne oseti karakterističan bol. F-metar automatski meri ostvareni pritisak i iskazuje ga numeričkom vrednošću.



Slika 3.14. Primena F-metra [2]

Vrednosti svake pojedinačne tačke žarišta i oblasti žarišta tako mogu biti dokumentovane. Preciznost mernog instrumenta u mnogome olakšava lokalizaciju i dijagnozu pojedinačnih tačaka žarišta. To omogućuje klasifikaciju svake oblasti bola, što olakšava lokalizaciju najbolnije tačke (koja mora biti prva tretirana), naročito ukoliko postoji nekoliko aktivnih tačaka žarišta. Takođe obezbeđuje informacije koje su od pomoći za dalju terapiju, a program tretmana može biti određen brzo i efikasno.

Osim toga, F-metar je jednostavna metoda za dokazivanje uspešnosti terapije. Poređenjem pojedinačno merenih vrednosti, moguće je dokumentovati napredak posle svakog tretmana. Ako vrednosti rastu, osjetljivost na pritisak je smanjena, što znači da je tretman uspešan.

Terapija često traje mesecima naročito ukoliko se leče pacijenti sa teškim simptomima miofascijalnog bola. Neki pacijenti ne podnose dobro taj postepeni napredak i zbog toga žele da prekinu tretman. F-metar vizuelno prikazuje napredak. Pacijenti u stvari mogu da prate te rezultate i tako su motivisani da nastave.

Kako F-metar pokazuje objektivne rezultate terapije, takođe se koristi za dokumentovanje u naučnim studijama.

4. USPOSTAVLJANJE DIJAGNOZE I NAČIN LEČENJA ROTATORNE MANŽETNE ZA TETIVNI KOMPLEKS RAMENOG ZGLOBA

4.1. Dijagnostičke metode oslikavanja

Kod oboljenja kod kojih može biti indikovana upotreba terapije udarnim talasima koriste se tri metode oslikavanja:

1. X- zračenje,
2. ultrazvuk i
3. nuklearna magnetna rezonanca (NMR)

X zračenje se koristi kod kalcifikacija, promena na kostima, za eliminisanje preloma, a ponekad u tri ravni- radiološke slike unutrašnje/spoljašnje rotacije.

NMR se koristi za potvrdu degenerativnih struktura, delimičnih ruptura [Slika 4.1.]. Edem koštane srži se može povremeno videti tokom oslikavanja NMR-om. Ovaj tip oslikavanja je takođe pogodan kao poslednji metod u slučaju postojanja određenih sumnji te njihovog uspešnog otklanjanja.



Slika 4.1. *Tendinitis, peritendinitis koji ukazuje na zapaljenje serozne burze- kese između prednje strane Ahilove tetine i zadnje strane kalkaneusa, delimična ruptura i degeneracija [2]*

U prvim godinama primene terapije udarnim talasima pretpostavljalo se da su sistemi ultrazvučne lokalizacije sa integriranim in-line skenerom optimalni. Kao posledica ekonomskog pristupa i ideje o kontroli bola razvijeni su jeftiniji sistemi koji nisu uključivali in-line skenere. Ovi novi sistemi su bili uglavnom sferni, u kojima integracija in-line ultrazvuka nije moguća iz tehničkih razloga. Danas se veliki broj terapeuta oslanja na ultrazvučnu dijagnostiku i lokalizaciju spoljnim ultrazvučnim sistemom, pošto ultrazvuk (pored X- zraka i NMR) nudi odličan anatomske prikaz i omogućuje korisniku da izvede važna dinamička ispitivanja. Fakultativna kombinacija sa ultrazvučnim sistemom, ne kao skupa in-line integracija nego kao jeftina i jednostavna inovacija u uređaju za udarne talase, interesantna je i praktična.

Dinamički ultrazvuk ima brojne prednosti, na primer u tretmanu rotatorne manžetne za tetivni kompleks ramenog zgloba. Ovde je kalcijumski depozit na istom pravcu sa nadgrebenom tetivom. Kalcifikacije u subakromijalnoj burzi ili avulzione rupture rotatorne manžetne mogu biti indikovani ograničenom pokretljivošću. Ako ima nekoliko kalcificiranih depozita oni mogu biti topografski locirani (u različitim ravnima) na tetivama rotatorne manžetne. Kalcifikacije u oblasti rotatorne manžetne mogu biti različitih struktura. Radiološki jasno ocrtane, tamne senke (Tip: Gärtner 1) imaju snažan ehogeni refleks kao i jasnu akustičnu senku u vreme ultrazvučnog oslikavanja.

Tečni, kalcificirani fokusi slični zubnoj pasti, radiološki prozirni i nejasno oivičeni (Tip: Gärtner 2 ili 3) nemaju akustičnu senku. Koristeći rotatornu manžetu kao primer vidi se da dinamičko ultrazvučno oslikavanje (u kombinaciji sa diferencijalnim dijagnozama) pomaže i kod otkrivanja potpunog ili parcijalnog kidanja, povlačenja, rupture mišića i tanjenja nadgrebene tetive, lokalne zapaljenske reakcije, *subakromijalnog burzitisa, impingamenta* (zapaljenja tetiva rotatorna manžetne), promena na glenoidalnom labru (hrskavičavom prstenu na ivici glenoidalne šupljine lopatice) ili kidanja duge tetive bicepsa.

Ultrazvučna diferencijalna djagnostika nije bitna samo za lokalizaciju i dijagnozu patološko-anatomskih strukturnih promena na tetivama, kalcificiranih depozita, neovaskularizacije i promena na kostima (na primer posle injekcije kortizona ili kristala) nego i za ispitivanje epikondilopatija. Tumorski procesi na kostima ili procesi na mekim tkivima i radikalne frakture glave lako se identifikuju.

Artrozne promene na humeroradijalnom zglobu ili osteochondritis dissecans na glavi humerusa često uključuju reaktivna izlivanja. Ultrazvuk takođe omogućuje lekaru da identifikuje retku pojavu *sinovitisa* (zapaljenja sinovije zglobova) i kidanje duge tetive bicepsa kod sportista. Reumatske promene uzrokuju razaranje hrskavice i kostiju, širenje zglobne kapsule i intraartikularna izlivanja. Ukoliko diferencijalna dijagnostika prethodi terapiji udarnim talasima postiže se bolji kvalitet i bolji rezultat tretmana.

Oslikavanje ultrazvukom ima mnoge prednosti pri ispitivanju entezopatije Ahilove tetive (vretenasto zadebljanje, peritendinozne promene koje uključuju umanjen echo). Ultrazvučni postupci su takođe mogući pri ispitivanju Haglundove pete, potpunog ili parcijalnog kidanja Ahilove tetive, *ksantomatoze* (nakupljanja holesterolom bogatih materija u tetivama ili drugim delovima tela), kalcificiranih depozita. Pri tretmanu *plantarnog fasciitisa*- upale plantarne fascije (sa ili bez deformacije pete) ultrazvuk se koristi za lokalizaciju zone bola koja je karakteristično zadebljana i mestimično pokazuje oblasti u kojima treba započeti procese neovaskularizacije.

Subkalkanealni burzitis takođe može biti lako dijagnostikovan ultrazvučnim oslikavanjem. Isto se primenjuje na patelarni tendinitis. Pri upotrebi ultrazvuka često se vidi prepatalarni ili infrapatelarni burzitis (subcutanea et profunda), ponekad u kombinaciji sa kalcifikacijama.

Ultrazvučno oslikavanje dobija sve veći značaj u tretmanu sindroma miofascijalnog bola. Pri tretmanu bolnih mišićnih zadebljanja, izbor dubine prodiranja (nastavaka) zavisi od utvrđivanja i merenja dubine fokusa, što je krucijalno za uspešnu terapiju. Mišićna zadebljanja i zone bez eha mogu biti tačno izmereni ultrazvukom. Pre tretmana u blizini plućnog tkiva, neurovaskularnih snopova i unutrašnjih organa, ultrazvučna lokalizacija i merenja dubine veoma su važni u smislu izbegavanja rizika od povrede pluća (plućne maramice) ili unutrašnjih organa.

4.2. Način lečenja

Rotatorna manžeta za tetivni kompleks ramenog zgloba je jedna od standardnih indikacija terapije udarnim talasima.

Etiologija:

Tačna etiologija je još uvek nejasna. U 90% slučajeva nadgrebena tetiva je oštećena u blizini velike tuberkule, a potom su podgrebena tetiva i podlopatična tetiva druga i treća. Nadgrebena tetiva ima svoju hipovaskularnu zonu u blizini pripajanja na kost. Neuobičajen biomehanički stres i decentralizacija glave humerusa (nadlakatne kosti) često dovode lokalno do subakromijalnog impingmenta (subakromijalnog zapaljenja rotatorne manžetne). Najšire prihvaćen model koji

objašnjava razvoj rotatorne manžetne za tetivni kompleks ramenog zgloba pokazuje da je metaplasija praćena aktivnom kalcifikacijom tetine. Ovo se događa u četiri faze:

Faza I	Faza II	Faza III	Faza IV
Faza transformacije	Faza kalcifikacije i transformacije	Faza resorpcije	Faza obnavljanja
Metaplasija tendocita i hondrocita usled hipoksije (nedostatka kiseonika)	Hipoksija, nakupljanje kalcijumovih kristala u citoplazmi hondrocita (ćelijama hrskavice)	Hiperemija (povećanje količine krvi), neovaskularizacija sa posledičnom fagocitozom kristala (takođe nakon udarnog talasa)	Hiperemija, formiranje novih tetivnih vlakana

Sve četiri faze patogeneze ukazuju na specifično kliničko stanje bola i tipične radiološke promene.

	Faza I	Faza II	Faza III	Faza IV
Kliničko stanje bola	Nema	Hroničan, subakutan	Veoma akutan (danima do nedeljama)	Zaostali simptomi (mesecima)
Radiološke promene	Nema	Jasne konture, neprozirno Tip: Gärtner 1	Nejasne konture, prozirne Tip: Gärtner 2	Normalni ili zaostali kalcificirani depozit

Faza dva, faza kalcifikacije, može trajati godinama i dovesti do stanja hroničnog bola ukoliko faza resorpcije i faza obnavljanja tkiva tetine ne budu uvedene. Objašnjenje za ovo može biti da do povećanja količine krvi ne dolazi zbog lokalnog mehaničkog pritiska. Ako se ne uvode faze tri i četiri (nema fagocitoze kristala i obnavljanja tetivnih vlakana), *distrofična kalcifikacija* (nakupljanje kalcijuma u nekrotičnim tkivima pri normalnom nivou kalcijuma u organizmu) ostaje prisutna.

Danas, specijalisti medicine nisu baš voljni da se slože da kalcifikirani depozit treba da se razbije, mada se zna da postoji slaganje (ne neophodno) između promena u intenzitetu bola i veličine kalcificiranog depozita. Većina napravljenih studija je dala bolje rezultate posle razbijanja.

Diferencijalne dijagnoze:

- lezije rotatorne manžetne,
- isključenje sekundarnog ili funkcionalnog impingamenta (zapaljenja rotatorne manžetne),
- ukočeno rame,
- promena u pršljenovima i kičmenom stubu, vaskularni, neurovaskularni uzroci,
- neuralgična amiotrofija ramena

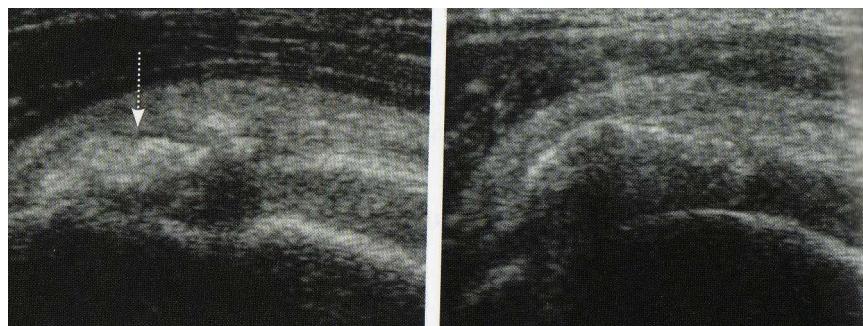
Dijagnoza:

Sistematska anamneza je neophodna za efektivan klinički pregled ramena. Merodavna observacija pacijentove pokretljivosti može se obaviti dok je on bez odeće. Ocenvivanje stanja mišićnog sistema takođe pruža važne informacije. Tokom pregleda treba posmatrati deltoidni mišić, akromioklavikularnog zgloba (zglob lopatice i ključne kosti), poziciju lopatice kao i držanje i zakrivljenost kičme. Krajnja dijagnoza treba da se bazira na palpaciji, analizi pokreta, testiranju

mišića i rotatorne manžetne. Saveteju se i specijalni impingement test i pregled akromioklavikularnog zgloba kao i detaljan pregled duge tetine bicepsa.

Dijagnostičko oslikavanje:

- ultrazvuk koji uključuje i dinamički pregled za lokalizaciju depozita,
- X-zračenje u tri ravni, radiološke slike unutrašnje/spoljašnje rotacije i
- NMR



Slika 4.2. Nadgredena tetiva sa nekoliko malih kalcificiranih fokusa (levo) i kalcifikacija sa akustičnom senkom na nadgredenoj tetivi pre terapije (desno) [2]

Nakon kliničke diferencijacije obolele tetine i dijagnoza pomoću tehnika oslikavanja, određuje se odgovarajući protokol za terapiju udarnim talasima.

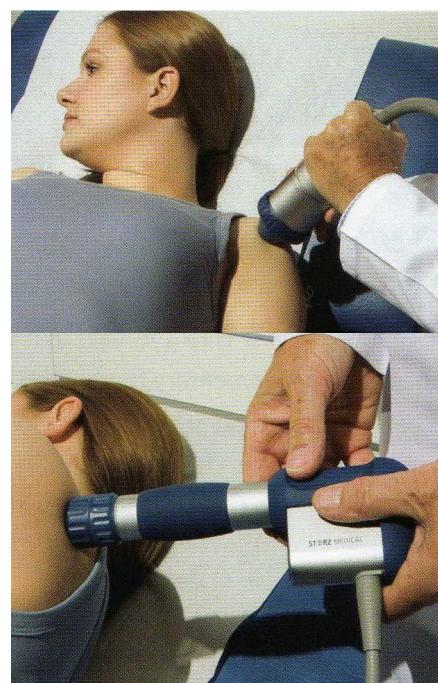
Pozicioniranje pacijenta:

Tokom tretmana ramena ležeća pozicija je najbolja za trbušnolateralnu regiju, kao i za lečenje pectoralis minora na korakoidnom nastavku. Bočna pozicija (kada pacijent leži na stolu na zdravom ramenu) je idealna za obavljanje lečenja ramena u unutrašnjoj rotacionoj poziciji (nadgredeno). Prisutan je i istovremeni efekat ekstenzije. Tokom tretmana, pištolj mora da se drži jednom rukom što terapeutu omogućuje da slobodnom rukom zateže lopaticu i glavu humerusa.

Lečenje:

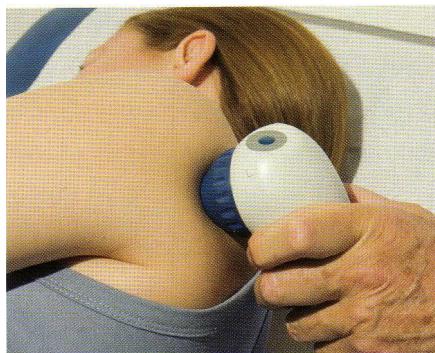
- a) Fokusirani udarni talasi
Nivo energije: $0,18\text{--}0,32 \text{ mJ/mm}^2$
Frekvencija: 4-6 Hz
Pulsevi: 1500-1800
Interval: 10-14 dana
Broj tretmana: 3
Nastavak: I ili II

- b) Sferni udarni talasi
Nivo pritiska: 2-3 bara
Frekvencija: 11-15 Hz
Pulsevi: 300-500 po oblasti
Interval: 8 dana
Broj tretmana: 3
Nastavak: Standardni ili D-ACTOR®



Dodatni tretman muskulature:

Osim tretiranja regije u kojoj je lokalizovan kalcificirani depozit, savetuje se i tretiranje pripoja titive sa fokusiranim talasima (200-300 pulsleva po regiji). Fibromijalgije takođe treba dijagnostikovati. One bliže plućima treba tretirati sfernim udarnim talasima, a one u višim regijama fokusiranim udarnim talasima.



Slika 4.3. Tretiranje pripoja titive fokusiranim udarnim talasima [2]

Ukočeno rame (uzrokovano upalom zglobne kapsule) često prati tendinitis sa kalcifikacijama. Uspešno se leči terapijom udarnim talasima.

Podlopatični mišić igra važnu ulogu kod ukočenog ramena. Problem je taj da je veoma teško dopreti do njega udarnim talasima. Tada se koristi *tehnika ubrizgavanja*⁶

4.3. Ponašanje pacijenta nakon terapije

Pre početka lečenja, od suštinske je važnosti pacijentu objasniti terapiju udarnim talasima i njene efekte. Terapija udarnim talasima je procedura tokom koje se udarni talasi usmeravaju u oblast bola, gde uzrokuju kontrolu same traume. Do procesa izlečenja dolazi u dubljim slojevima tkiva, slično spoljnim povredama. Ovo rezultira povećanjem cirkulacije krvi i formiranjem krvnih sudova, te se generiše novo vezivno tkivo. Degenerisano tetivno tkivo se regeneriše i zateže. Bitno je objasniti pacijentu tako da on, odnosno ona, razume zašto je proces izlečenja terapijom udarnim talasima dugotrajan proces.

Moguće je dati primer naknadnog lečenja preloma kostiju. Trajno formiranje nove kosti nakon terapije se takođe ne događa trenutno. Kada tretiramo impengement supraspinatusa, kalcificirani depozit počinje da se smanjuje već nakon nekoliko nedelja.

Uopšteno govoreći, pacijenti se mogu baviti sportom i raditi nakon terapije, mada se na ova i slična pitanja izbegava odgovor na bazi šablonu. Dakle, vreme oporavka se procenjuje individualno. Nakon tretmana ramena treba da se izbegavaju prekomerni pokreti. Plivači i teniseri ne smeju trenirati šest nedelja, bilo da se amaterski ili profesionalno bave ovim sportovima.

Nakon terapije teniskog lakta (epicondilitis), teniseri ne bi trebalo da igraju dve ili tri nedelje. Međutim, mogu igrati sa elastičnim zavojem koji smanjuje opterećenje mišića podlaktice. Nakon 10-14 dana može se raditi sa ručnim uređajima (poput kompjuterskog miša). Specijalisti

⁶ Tehnika ubrizgavanja razvijena je od strane Danila Jankovića i koristi 30° zakriviljenu iglu dugačku 7-10 cm. Infiltracija igлом se najbolje vrši u sedećem položaju sa glavom i ramenima spuštenim ka napred u cilju podizanja srednjeg ruba lopatice.

sportske medicine u poslednje vreme su raskrinkali mit o efektivnosti vežbi istezanja pošto one mogu dovesti do delimičnog kidanja aktin-miozinskih kompleksa obolelog mišića. Prema tome vežbe istezanja treba zameniti vežbama kretanja.

Posle tretmana insercione tendinopatije terapijom udarnim talasima, od suštinskog je značaja naglasiti da je regija na koju je delovano opuštena. Plantarni fascitis (upala plantarne fascije) ili ahilodinija zahtevaju visokokvalitetne uloške koji pomažu smanjenju bola. Posebno stariji pacijenti kod kojih se najčešće i javlja, treba da koriste uloške. Diskutabilno je da li je ekscentrično istezanje dobro za unutrašnje mišiće stopala. Sportove koji uključuju skakanje treba izbegavati, a pacijenti bi trebalo da se okrene bicikлизму, plivanju ili gimnastici 4-6 nedelja.

Kako bi se osigurao uspeh terapije udarnim talasima, važno je uzeti u obzir starost pacijenta, vrstu posla koji obavlja, hobije i slične navike. Jedino tada se može dati praktičan savet i izbeći stroga i stereotipna pravila.

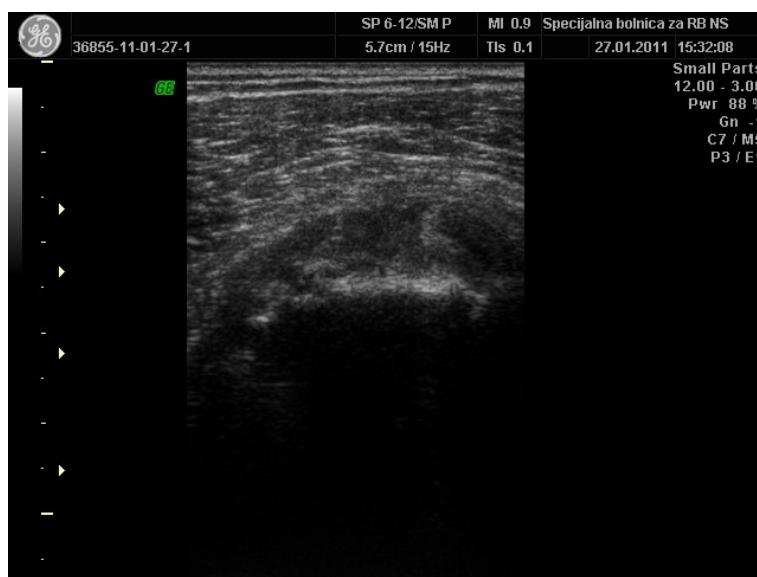
4.4. Eksperimentalna potvrda

Na primeru kod jednog pacijenta može se jasno videti napredak pri lečenju terapijom udarnim talasima.

Prvo je sprovedeno ultrasonografsko dijagnostičko oslikavanje:

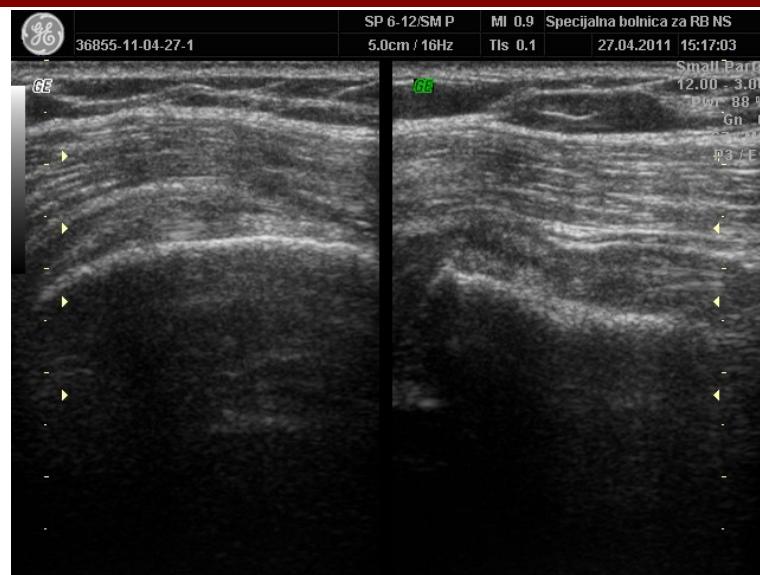
Izveštaj: tetiva m.suprapsinatusa hronično izmenjena sa fibroznim trakstaim promenama, manjim kalcifikatom, hipoehogenom tečnom kolekcijom i velikom diskinezijom na stres testu. Rotatorna manžetna hronično hiperehogeno izmenjena bez sigurnih znakova otvaranja na stres testu. Predleže se šok vejv terapija.

Dijagnoza: tendinitis chr tendo m.suprapinatus l.dex. Laesio rotator cuff. l.dex [Slika 4.4.]



Slika 4.4. Desni m. supraspinatus pre terapije udarnim talasima

Pacijent je bio podvrgnut jednom tretmanu terapijom fokusiranim udarnim talasima nakon čega se već vidi značajno poboljšanje na nadgrebenoj tetivi [Slika 4.5.]:



Slika 4.5. Levi m. supraspinatus zdrav (levo) i desni m. supraspinatus nakon jednog tretmana fokusiranim udarnim talasima (desno)

Na osnovu svega gore navedenog može se zaključiti da je sa svakom narednom terapijom moguće pacijenta dovesti u stanje potpunog izlečenja.

ZAKLJUČAK

Iako je od prvih sprovedenih istraživanja vezanih za primenu udarnih talasa u medicini prošlo više od pola veka, ova metoda terapije kod nas je još uvek nova. U svetu je terapija udarnim talasima našla primenu i u:

- kardiologiji (angina pektoris bez mogućnosti revaskularizacije, ishemična bolest srca, izostanak reperfuzije nakon perkutane koronarne intervencije, difuzna koronarna bolest),
- kozmetologiji (anti-celulit i „anti-age“ terapija, oblikovanje tela) i
- veterini.

U saradnji kompanija koje proizvode ove medicinske aparate sa različitim medicinskim institutima, sprovode se istraživanja koja u sve većem broju potvrđuju uspešnost terapije udarnim talasima u svim navedenim oblastima medicine. Na ovaj način, kao i uz dobar marketing, iskreno verujem da će ovaj vid terapije zaživeti i kod nas, te da će jednog dana zaista postati isplativa alternativa hirurgiji.

LITERATURA:

1. Žikić, Božidar. *Kurs opšte fizike- molekulska fizika, termodinamika, mehanički talasi.* Beograd: IRO „Građevinska knjiga“, 1988.
2. Dreisilker, Ulrich. *Shock wave therapy in practice- Enthesiopathies.* Heilbronn: Level Books, 2010.
3. Stanković, Slobodanka, Petar Slankamenac. *Dijagnostički ultrazvuk.* Novi Sad: Solaris, 2011.
4. Ljubiša Nešić, „Glava 9 - Talasi”, Prirodno-matematički fakultet Niš. <http://tesla.pmf.ni.ac.rs/people/nesiclj/predavanja/biologija/2009z/glava9.pdf> (preuzeto 11.5.2011).
5. Michael Thiel Ph.D., Martina Nieswand, Ph.D., Michael Dörffel, Ph.D., „Prikaz fizikalnih principa, povijesti i temeljnih istraživanja“, Scipion fizioterapija d.o.o Rijeka, <http://www.scipion.hr/cd/113/gcgid/3/Kontakt--Scipion.wshtml> (preuzeto 11.5.2011)
6. Robin O. Cleveland, PhD, James A. McAteer, PhD, „The Physics of Shock Wave Lithotripsy”, Boston University’s College of Engineering, <http://www.eng.bu.edu/~robinc/pubs/ClevelandMcAteerSTEU06.pdf> (preuzeto 16.6.2011)

B I O G R A F I J A:



Rođen sam 18. avgusta 1984. godine u Novom Sadu. Osnovnu školu „Dositej Obradović“ i srednju Medicinsku školu „7. april“ završio sam u Novom Sadu sa odličnim uspehom. Školske 2003/2004. godine upisujem Prirodno-matematički fakultet, smer Medicinska fizika na Departmanu za fiziku. Tokom studija sam pomagao u realizaciji jednog međunarodnog stručnog seminara u organizaciji ACIMSI- Centra za medicinsku fiziku i medicinsko inženjerstvo. Od svoje devete godine intenzivno se bavim folklorom, da bih 2003. godine počeo da primenjujem stečena znanja u ovoj oblasti i u pedagoškom radu sa decom, vodeći školu folklora u svojoj osnovnoj školi. Uporedo sa tim počeo sam da pohađam i seminare folklora organizovane od strane Centra za proučavanje narodnih igara Srbije i Saveza amatera Vojvodine.

**UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Diplomski rad

VR

Autor:

Luka Tanasijin

AU

Mentor:

Dr Olivera Klisurić

MN

Naslov rada:

Terapija udarnim talasima

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2011

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada:

Broj poglavlja/broj strana/broj tabela/ broj slika/broj grafika/broj referenci/broj priloga: 4/50/4/33/10/5/0

FO

Naučna oblast:

Fizika

NO

Naučna disciplina:

Medicinska fizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

Talasno kretanje, zvučni talasi, terapija udarnim talasima, postavljanje dijagnoze i način lečenja kalcifikacijskog zapaljenja tetiva ramenjače

PO

UDK

Čuva se:

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena:

nema

VN

Izvod:

Rad govori o talasnom kretanju uz poseban akcenat na zvučnim talasima kao osnovom za razumevanje udarnih talasa koji su našli široku primenu u različitim vidovima medicinske terapije. Kao jedan od primera uspešne terapije udarnim talasima u radu je naveden primer lečenja kalcifikacijskog zapaljenja tetiva ramenjače

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

13.06.2011.

Datum odbrane:

DO

08.07.2011.

Članovi komisije:

KO

Prof. Dr Agneš Kapor

član:

Doc. Dr Olivera Klisurić

član:

Doc. Dr Otto Barak

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS
KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

Final paper

CC

Author:

Luka Tanasijin

AU

Mentor/comentor:

PhD Olivera Klisurić

MN

Title:

Shock wave therapy

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2011

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description:

4/50/4/33/10/5/0

PD

Scientific field:

Physics

SF

Scientific discipline:

Medical physics

SD

Subject/ Key words:

Wave motion, acoustic waves, shock wave therapy, diagnosis and treatment of calcific tendinitis of the shoulder

SKW

UC

Holding data:

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note:

none

N

Abstract:

This study refers to wave motion, particularly stressing acoustic waves as the basis of shock waves which are widely applied in a variety of medical treatments. As an example of successfull SWT application, treatment of calcific tendinitis of the shoulder is represented as well.

13.06.2011.

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

08.07.2011.

DE

Thesis defend board:

DB

President: PhD Agneš Kapor

Member: PhD Olivera Klisurić

Member: PhD Otto Barak