

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU, GRAĐEVINSKI FAKULTET

MARKO PRŠIĆ

PLOVNI PUTEVI I LUKE

WEB SKRIPTA

ZAGREB, 2.3.2011.

Sadržaj

0	UVOD.....	1
1	GIBANJA MORA	3
1.1	DEFINICIJA VALOVA	4
1.2	DEFINICIJA MORSKIH VALOVA.....	4
1.3	VRSTE POVRŠINSKIH MORSKIH VALOVA.....	6
1.4	IDEALNI I REALNI VALOVI	9
1.5	OPIS POVRŠINSKIH MORSKIH VALOVA	10
1.6	PROGNOZA POVRŠINSKIH MORSKIH VALOVA	11

0 UVOD

Plovni putevi i luke je obavezni kolegij Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu od 1966. godine kada ga je uveo profesor Miroslav Gjurović. Tada je sadržavao pretežno empirijska i sasvim bazična teorijska poglavlja o gibanjima mora, poglavlja o brodovima i tehnologiji lučkog prekrcaja, poglavlja o konstrukcijama i građenju morskih i riječnih luka te poglavlja o riječnim plovnim putevima. 2. profesorska generacija je profesor Zdravko Tadejević 1973. – 1983., a ovaj tekst piše 3. profesorska generacija.

Ogroman je napredak u današnjem kolegiju načinjen na području definiranja pomorskog okoliša, kroz prva tri poglavlja obuhvaćena zajedničkim pojmom „pomorske hidraulike“. Unaprijeđeno je poglavlje o građenju u moru dijelom o ponašanju materijala u moru. Poglavlje o brodovima je osuvremenjeno novim vrstama brodova i njihovim karakteristikama interesantnim za građenje luka. Poglavlje o lukama ima 3 cjeline: prekrcajne tehnologije (informativno), oblikovanje luka i lučke građevine (lukobrani i kejovi). Slijede poglavlja: urbani pomorski objekti, unutarnji plovni putevi i građevine za svladavanje visinskih prepreka na unutarnjim plovnim putevima

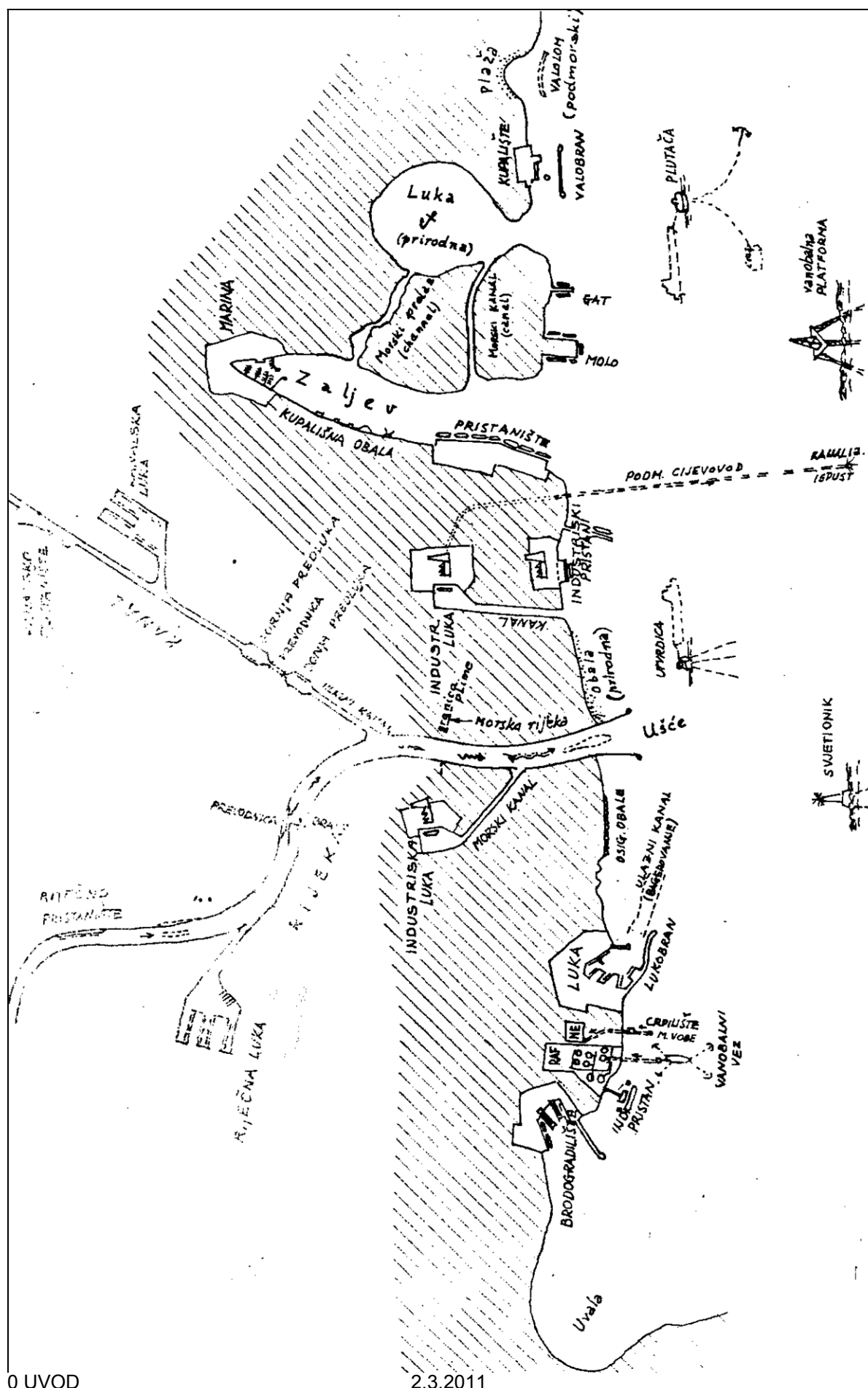
Sam naziv kolegija se zadržao po tradiciji, ali stvarni predmet kolegija je danas puno širi. Građevine kojima se kolegij bavi prikazane su na na slici 0::1. U njih su uključene sljedeće pomorske građevine:

- luke (teretne, trajektne, putničke, marine,....),
- pristaništa brodova bez zaštite lukobrana,
- uređenje prirodnih obala (plaže za kupanje, zaštita od erozije,....),
- uređenje urbanih obala (artificijelne obale, urbane marine, šetnice,....),
- zahvate rashladne morske vode i ispuste zagađene vode u more,
- vanobalne cjevovode,
- vanobalne građevine (svjetionici i privezne utvrde),

kao i građevine unutrašnje plovidbe:

- riječni i kanalski plovni putevi,
- riječne i kanalske luke (teretne, trajektne, marine,....),
- riječna i kanalska pristaništa,
- brodske prevodnice,
- uređenje prirodnih obala (plaže za kupanje, veslačke staze,....),
- uređenje urbanih obala (artificijelne obale, urbane marine, šetnice,....).

Kolegij ne izučava sve spomenute pomorske građevine ponaosob, nego kroz izučavanje gore spomenutih poglavlja (u raznim obujmima) daje osnovu za njihovo inženjersko rješavanje, a kod rijetkih i specijalnih građevina samo za razumijevanje problema. Poglavlja unutrašnjih plovni puteva uključena su informativno, a detaljno su sadržana u izbornom kolegiju Unutrašnji plovni putevi.



Objekti pomorskih građevina i unutarnjih plovnih puteva (Tadejević)

1 GIBANJA MORA

Gibanja mora su isključivo za ovaj kolegij kolokvijalno obuhvaćena pojmom pomorska hidraulika. Općenito rečeno, h i d r a u l i k a je primijenjena nauka koja izučava zakone ravnoteže i kretanja realne tekućine i razrađuje primjenu tih zakona, te se daje podijeliti na hidrostatiku i hidrodinamiku. Obzirom na mjesto gdje se voda nalazi, hidraulika se kolokvijalno može specificirati na:

- hidrauliku zatvorenih sistema
- hidrauliku otvorenih vodotoka i
- pomorsku hidrauliku.

P o m o r s k a h i d r a u l i k a bi tada bila disciplina hidraulike vezana s njom fundamentalnim zakonima. Predmet izučavanja su realni morski valovi i morske struje, te njihove interakcije i deformacije. Oni se izučavaju i u oceanografiji (grana geofizike), ali više teorijski. Metode opisivanja ovih pojava su: deterministička kao najstarija, stohastička i energetska kao najnovija. Prva metoda može opisivati samo idealizirana kretanja, a preostale i realna kretanja morske vode. Vremenski gledano hidraulika ima korijene u dalekoj prošlosti (Arhimed, Da Vinci, Galilei...) čime je stvorena prilika da se veoma rano odigraju velika otkrića njenih zakonitosti, pa se može reći da je to vrijeme već iza nas. Nasuprot tome pomorska hidraulika se počela razvijati početkom 19. stoljeća, a najveće korake bilježi nakon drugog svjetskog rata tako da se upravo sada nalazi u dinamičkom periodu velikih otkrića. Najveći doprinos razvoju nauke dali su Gerstner 1802., Airy 1845., Stokes 1880., De Vries i Korteweg 1895., Rayleigh 1990., Iribaren 1938., Miche 1940., Bretschneider 1950., Svedrup 1950., Munk 1950., Pierson 1955., Neumann 1955., James 1955., Dean 1960., Minikin 1960., Wiegel 1964., Ippen 1966., Le Mehaute 1970., Iwagaki 1970., Silvester 1974 i drugi.

Pojave kojima se bavi pomorska hidraulika u biti su stohastičke prirode no ranija nastojanja da se valovi i struje opišu deterministički (preko matematskih zakonitosti) uvela je disciplinu izučavanja i d e a l n i h m o r s k i h v a l o v a i struja te njihovih interakcija i deformacija što bi se moglo nazvati determinističkom metodom u pomorskoj hidraulici. Deterministička metoda pomorske hidraulike je temelj za razvoj i razumijevanje preostale dvije metode pomorske hidraulike, a to su stohastička i spektralna.

Gradivo predstavlja također i neophodnu podlogu za pomorske gradnje i promet, za pristup projektiranju, izradu modela, izvođenje i održavanje pomorskih objekata. Stoga je namijenjeno studentima i inženjerima koji se obrazuju na Građevinskom fakultetu, a i drugima koji se bave istraživanjem i konstrukcijama u moru.

Razlikuju se dvije vrste gibanja mora:

- pokreti cijele morske mase – morske struje
- pokreti dijelova morske mase – morski valovi.

Prvi imaju male brzine, ali prenose velike morske vode i interesantni su prvenstveno za ekološke probleme i probleme marinskog nanosa. Ne čine velike sile na građevine pa se uzimaju u obzir samo kod vrlo vitkih konstrukcija. Drugi zahvaćaju samo dijelove morske mase i ne uzrokuju značajni transport mase. No imaju značajne brzine i uzrokuju značajne sile na sve građevine u moru. Dalje će se razmatrati samo morski valovi.

1.1 DEFINICIJA VALOVA

Valovi u moru su osim morskih valova još i elektromagnetski, svjetlosni i zvučni valovi. Svi oni pripadaju u valove u tekućinama, koji su opet dio valova u tekućinama i čvrstim tijelima. U valnoj mehanici tekućina čvrstih tijela vrši se sistematizacija po:

- uvjetima okoliša na: adijabatske i izotermske,
- stratifikaciji na: površinske i unutrašnje,
- orijentaciji ravnine osciliranja u odnosu na smjer rasprostiranja na: uzdužne, poprečne, translatorne i stojne,
- dužini perioda na: kratki i dugi,
- karakteru pobude na: pravilne i nepravilne tj. slučajne.

Uzdužni valovi se mogu pobuditi na površini i u unutrašnjosti krutih tijela i tekućina. Poprečni valovi su također mogući na površini i u unutrašnjosti krutih tijela, ali samo na površini tekućina ili na nekoj graničnoj plohi različitih gustoća u vodenoj masi. U masi vode jednake gustoće ne mogu se pobuditi, bez obzira na veliku pokretljivost vodenih čestica, jer u njoj ne postoje tangencijalna naprezanja. Poprečne oscilacije u čvrstim tijelima nastaju pod djelovanjem sila inercije i tangencijalnih naprezanja, pomicanjem atoma oko ravnotežnog položaja u kristalnoj rešetki. Kako u tekućinama nema tih sila, za pobudu poprečnih oscilacija potrebne su vanjske sile (površinska napetost, gravitacija, Coriolisova sila i magnetske sile za elektrovodljive tekućine).

1.2 DEFINICIJA MORSKIH VALOVA

Morski valovi su proces periodičkog kolebanja neke granične plohe u moru udružen s osciliranjem vodenih čestica pod djelovanjem pobuđujućih i umirujućih sila. Pobuđujuće sile dolaze od: vjetra,

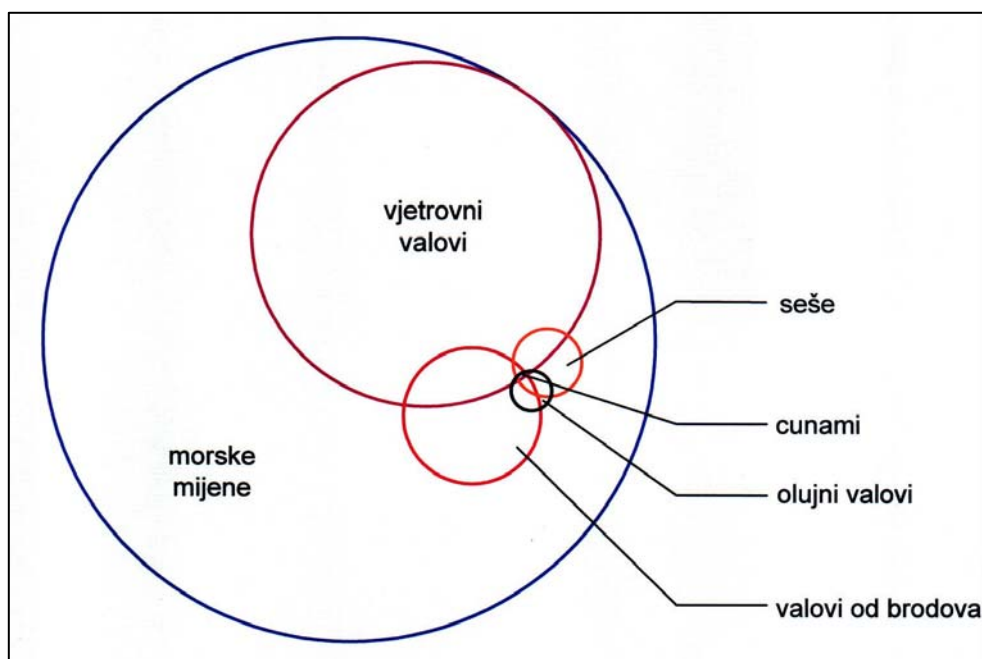
- brodova.
- gibanja meteoroloških sustava,
- seizmičkih i tektonskih poremećaja,
- zvijezda.

Umirujuće sile su:

- površinska napetost,
- gravitacija,
- Coriolisova sila.

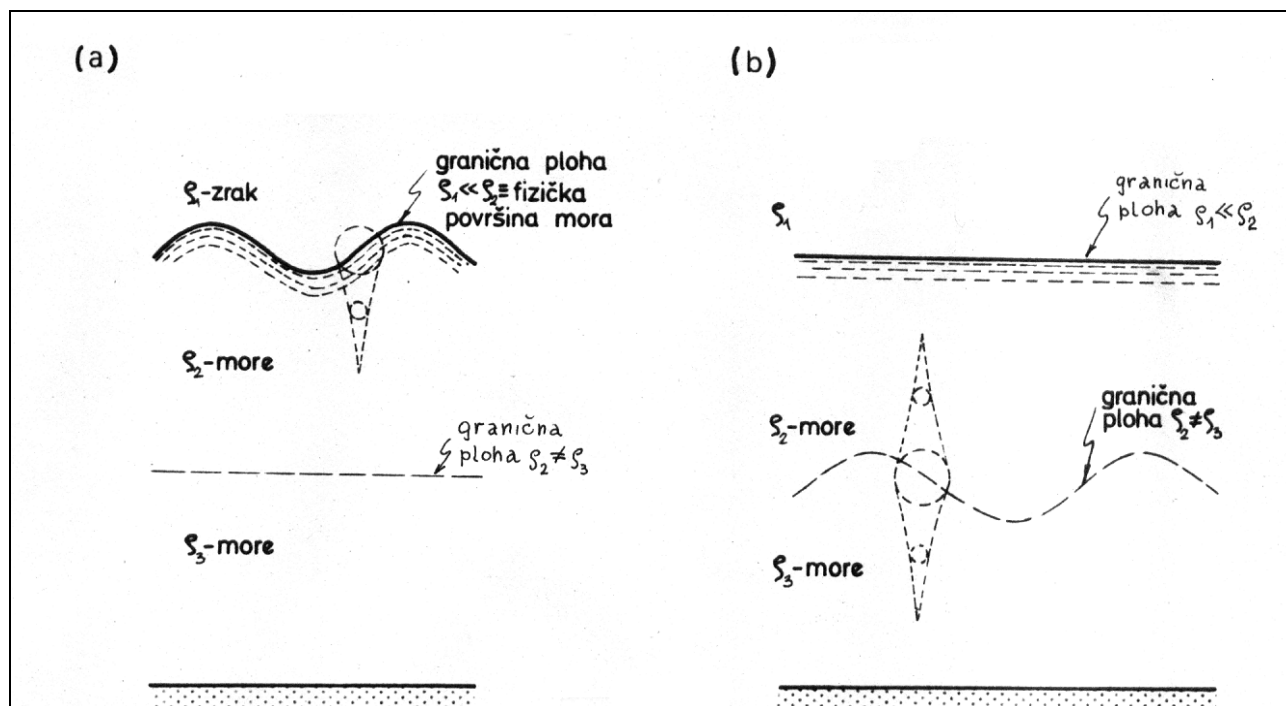
U prirodi nikada pojedine pobuđujuće i umirujuće sile ne djeluju separatno nego kompleksno s različitim intenzitetom (Sl. 1.2::1). Osim toga pobuđujuće sile su pulsirajuće i

često slučajne prirode što sve skupa realne valove čini nepravilnim po frekvenciji, smjeru i amplitudi.



Sl. 1.2::1 Nepravilni realni površinski valovi na nekoj lokaciji, kao rezultat raznovrsnih pobuđujućih i umirujućih sila koje su prikazane s orijentacionom vremenskom zastupljenosti (veličina kruga). Vidi se da nepravilni realni valovi mogu biti rezultat svih pobuđujućih i umirujućih komponenti ili samo nekih.

Prema stratifikaciji u moru (Sl 1.2::2) razlikuju se *površinski* i *unutrašnji* morski valovi. *Površinski valovi* su definirani pomacima fizičke površine mora i pomacima čestica vode. Pomaci čestica su najveći na površini mora i opadaju s dubinom te konačno zamiru. Drugi parametri gibanja vodnih čestica također opadaju s dubinom po eksponencijalnom zakonu. Kao što je fizička površina mora granična površina dvaju medija bitno različite gustoće (vode i zraka), tako se i u moru mogu iz više razloga formirati granične plohe gustoće pa se pomaci takove plohe nazivaju *unutrašnji valovi* (interni). Pomaci vodnih čestica tada opadaju i prema dnu i prema površini od granične plohe. Sva razmatranja u ovom kolegiju odnose se na površinske valove.



Sl. 1.2.:2 Morski valovi: (a) površinski, (b) unutrašnji (dubinski); $\rho_1 = \rho_z$ - gustoća zraka, ρ_2 i ρ_3 gustoće dva različita sloja mora.

U pogledu duljine valova, kod gravitacijskih morskih valova, *kratki valovi* su oni čija valna duljina je mnogo manja od dubine mora (periodi do 30 s), a *dugi valovi* su oni čija duljina je mnogo veća od dubine mora (periodi preko 5 min.). Između je prijelazno područje gdje vrijede teorije za jedne i za druge valove. Kod planetarnih valova duljine valova se sistematiziraju u ovisnosti o smjeru valne duljine i duljine bazena, pa ako je taj omjer mali radi se o kratkim valovima, a ako je velik radi se o dugim valovima.

1.3 VRSTE POVRŠINSKIH MORSKIH VALOVA

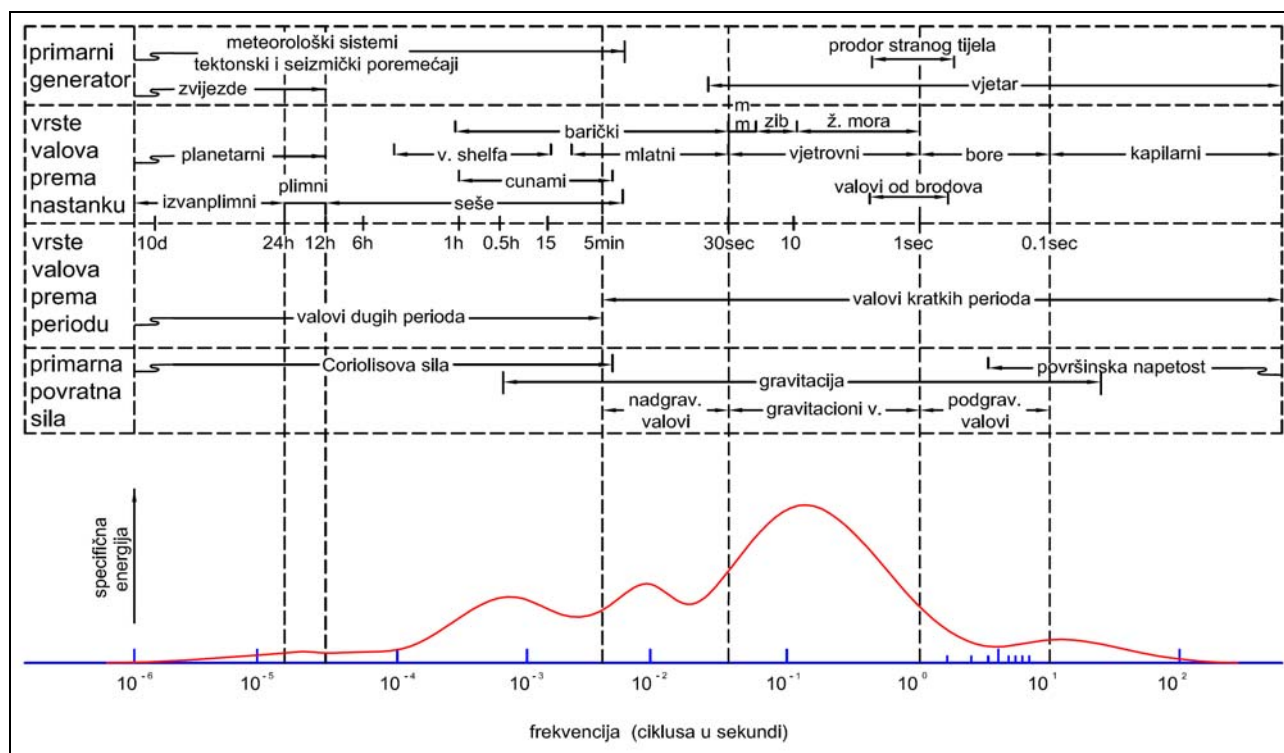
Osim što su sistematizirani prema općim karakteristikama koje vrijede za sve vrste valova u tekućinama i krutim tijelima, morski valovi se sistematiziraju i prema: *primarnoj pobuđujućoj sili* (primarnom generatoru) i *primarnoj umirujućoj* (povratnoj) sili (Sl. 1.3.:1).

Primarne umirujuće sile površinskih i unutrašnjih morskih valova su: površinska napetost, gravitaciona i Coriolisova. Sistematizacija je bazirana na omjeru valnog perioda T i perioda inercijalnih oscilacija $T_i = \pi / \omega \sin \varphi$, gdje je ω kutna brzina rotacije Zemlje, a φ geografska širina.

Prema tome se razlikuju:

- kapilarni valovi u čijem umirenju prevladavaju kapilarne sile
- gravitacijski v. u čijem umirenju prevladavaju sile gravitacije ($T \ll T_i$)
- inercijalno-gravitacijski v. u čijem umirenju sudjeluju sila teža i Coriolisova sila ($T < T_i$)

- inercijalni (giroskopski) v. u čijem umirenju prevladava Coriolisova sila ($T=T_i$)
- planetarni (Rossby-jevi) v. u čijem umirenju prevladava vrtnja i sferičnost zemlje ($T \gg T_i$).



Sl. 1.3::1 Klasifikacija površinskih morskih valova prema *primarnoj pobuđujućoj sili* (primarnom generatoru) i *primarnoj umirujućoj* (povratnoj) sili

Prema *primarnom generatoru*, (Sl. 1.3::1), mnogo je vrsta morskih valova:

Od vjetra nastaju:

- kapilarni valovi (engl. capillary waves) $T \approx 0,01 - 0,1$ [s],
- bore (engl. ripple), $T \approx 0,1 - 1$ [s],
- valovi živog mora (Sl. 1.3::1), (engl. seas), $T \approx 1 - 10$ [s],
- zibine (engl. mixed waves), $T \approx 10 - 20$ [s],
- divovski valovi (engl. freak, mammoth w.).
- valovi mrtvog mora, bibavica (engl. swell), $T \approx 20 - 30$ [s],
- mlatni valovi (engl. surf), $T \approx 30$ [s] – 5 [min].

Kako se vidi na Sl.1.3::1, vjetrovni valovi perioda 5 – 15 [s] imaju najveću energiju i proizvode najveće sile na konstrukcije pa su stoga glavni predmet valnog izučavanja u ovom kolegiju.

Od brodova nastaju brodski valovi, $T \approx 0,8 - 2$ [s].

Uslijed promjene tlaka zraka iznad morske površine izazvanih pomacima olujnih sistema ili djelovanjem vjetrova javljaju se barički valovi ili olujna mijena (engl. surge, storm tide), $T \approx 0,5 - 60$ [min].

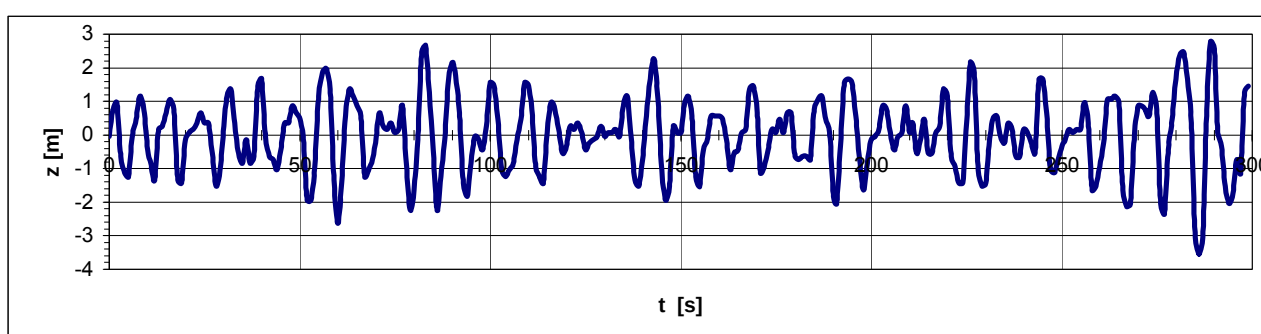
Uslijed potresa i tektonskih poremećaja u moru nastaju cunami (jap. Tsunami) valovi, $T \approx 5$ [min] – 1 [h], (Slika 1.3::3).

Ščige ili seše (engl. seiche) su stojni valovi u zatvorenim ili poluzatvorenim bazenima uzrokovani vjetrom, promjenom pritiska, seizmičkim ili dugim valovima s mora.

Valovi šelfa (engl. shelf waves), $T \approx 15$ [min] – nekoliko sati, nastaju zbog djelovanja nagle promjene dubine mora na pučinske valove.

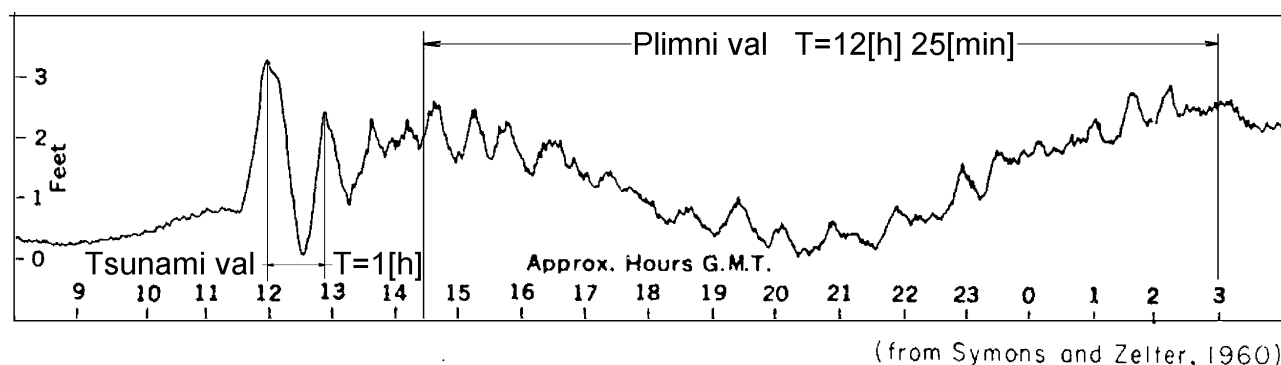
Plimni valovi (engf. tidal wave) proizlaze iz gravitacionog djelovanja Mjeseca i Sunca kao i ostalih zvijezda te rotacije zemlje, $T=12\text{h } 25\text{ min}$ ili $24\text{h } 50\text{ min}$ (Slika 1.3::3).

Izvanplimni valovi (engl. transtidal waves), u koje pripadaju planetarni ili Rosby-evi valovi, proizvedeni su pomacima meteoroloških sistema, zvijezda i zemljine kore, $T \approx$ nekoliko dana do nekoliko stotina godina.



Sl. 1.3::2: Valni zapis vjetrovnih valova živog mora s valografske postaje Panon 22.12.1979. od 01^{00} do 01^{05} , period digitalizacije 1[s], reprezentativni valni

parametri: $\bar{H}=2,56$ [m], $H_s=3,98$ [m], $H_{1/10}=5,07$ [m], $H_{\max}=6$ [m], $\bar{T}_0=3,79$ [s], $T_s=4,22$ [s], $T_{1/10}=4,16$ [s], $T_{\max}=4,6$ [s]



Sl. 1.3::3 Mareogram dugih plimnih valova s registriranim dugim cunami (potresnim) valovima max. visine 3,3[ft]=1[m]. Mareografski zapis na otoku Johnston, Havaji 24. i 25.05.1960.

1.4 IDEALNI I REALNI VALOVI

Svi gore spomenuti valovi se javljaju u prirodi i stoga se imenuju: *realni valovi* (Tab. 1.4::I). No postoje valovi u laboratorijima i valovi u vidu matematičke predstave koji se imenuju: *idealni valovi*. U odnosu na realne valove oni su restriktivni, manje ili više vjerni, modeli realnih valova.

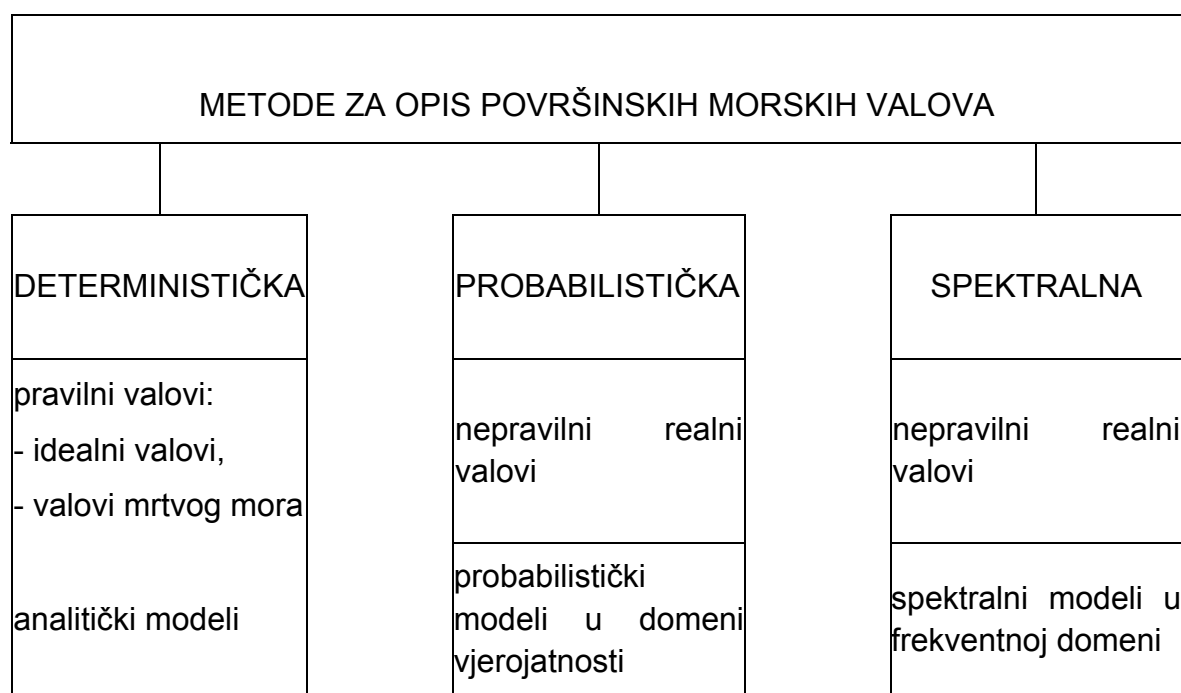
REALNI MORSKI VALOVI		
Površinski valovi		Unutrašnji valovi
kratkih perioda (do 30s)	dugih perioda (preko 5 min)	
vjetrovni valovi od brodova	ščige - seše olujni valovi cunami plimni valovi izvanplimni	

Tab. 1.4::I Vrste realnih morskih valova po stratifikaciji

1.5 OPIS POVRŠINSKIH MORSKIH VALOVA

Svaki opis morskih valova sadrži dvije stvari: *opis valnog profila* i *opis gibanja vodnih čestica*. Povijesno gledano, a i po složenosti, razvijene su tri metode opisa morskih valova:

- deterministička,
- stohastička (još i statistička, probabilistička, ili statističko-vjerojatnosna i
- spektralna.



Tab. 1.5.:I Metode opisa površinskih morskih valova

Deterministički opis valova se primjenjuje za pravilne dvodimenzionalne valove s konstantnim parametrima valnog profila (valna visina H , valna duljina L , valni period T i valna brzina c ; odnosno pokretnim valnim profilom $\eta=f(x,t)$ koji sadrži sve prednje parametre) i parametrima gibanja vodnih čestica (putanja $x(t)$, $z(t)$, brzina v_x , v_z , ubrzanje a_x , a_z). Zbog svoje pravilnosti takvi valovi se nazivaju i idealni valovi. U prirodi su izuzetno rijetki, a donekle im se približavaju valovi mrtvog mora.

Stohastički opis valova, ili statističko-vjerojatnosni prikazuje realne nepravilne trodimenzionalne valove, na jednoj geografskoj točki za neko kratkoročno stacionarno stanje mora (10 min. do nekoliko sati) ili dugi vremenski period, reprezentativnim parametrima valnog profila koji su za to stanje mora konstantni. Valni profil i ostali parametri gibanja vodnih čestica dobiju se uvrštavanjem reprezentativnih valnih

parametara u izraz za idealne valove. Reprezentativne kratkoročne valne visine su: H_S – značajna valna visina, $H_{1/10}$ – desetinska valna visina, $H_{1/100}$, $H_{1/1000}$, H_n^{mod} – maksimalna valna visina među n valova, H_{rms} – korijen sredine kvadrata valnih visina (energetski ekvivalent nekog nepravilnog valovanja) i H_V – vizualno opažena valna visina ($H_V \approx H_S$). Reprezentativni valni periodi su: T_0 – prosječni period presijecanja mirnog raza mora, T_S – značajni valni period, $T_{1/10}$, $T_{1/100}$, T_n^{mod} i T_V – vizualno opažen valni period ($T_V \approx T_S$). Varijacije valnih perioda su mnogo manje nego li kod valnih visina, a jedne i druge se ravnaju prema Rayleighovom zakonu vjerojatnosti (kod perioda njihovi kvadrati). Za statistički opis je potreban valni zapis ili vizualno opažanje. Reprezentativni dugoročni valni parametri su: H_S^{PR} , $H_{1/10}^{\text{PR}}$, $H_{\text{mo}}^{\text{PR}}$, T_S^{PR} , $T_{1/10}^{\text{PR}}$, $T_{\text{mo}}^{\text{PR}}$, gdje je PR povratno razdoblje [god].

Spektralni opis kao i statistički služi za prikaz kratkoročnog stacionarnog stanja realnih valova. No sredstvo spektralnog opisa je matematičko: funkcija spektralne gustoće koja se često skraćeno naziva valni spektar. Osnovna je ideja spektra da se postupkom tzv. spektralne ili Fourierove analize, nađe rezultanta sume pravilnih (idealnih) valova čija je sumarna energija jednaka razmatranom realnom valovanju, pa se pojedini parametri tako definiranih pravilnih valova poredaju po njihovim frekvencijama (ω) i valnim brojevima (k). Rezultat su jednodimenzionalni spektri u frekventnoj domeni i u domeni valnog broja. Češće se koriste frekventni spektri. Tako su upotrebi energetski spektar, spektar pomaka valnog profila, amplitudni spektar, spektar valnih visina, spektar brzina vodnih čestica, spektar ubrzanja vodnih čestica... Za opis varijabiliteta valnih parametara po morskom prostoru služe dvodimenzionalni ili usmjereni spektri. Jednodimenzionalni frekventni spektar za neko konkretno stanje mora se može dobiti iz valnog zapisa, a dvodimenzionalni spektar valnog broja se dobije iz stereografskog snimka valovite morske površine. Ostali se izvode iz ova dva.

1.6 PROGNOZA POVRŠINSKIH MORSKIH VALOVA

Prognoza površinskih morskih valova je postupak određivanja reprezentativnih ili vjerojatnih parametara valnog profila, ili valnog spektra, realnih valova u prošlosti, sadašnjosti ili budućnosti. Prognoze su razvijene prema primarnom valnom generatoru, a svaka od njih ima kratkoročnu (za 10-minutno do nekoliko satno stacionarno stanje mora) i dugoročnu varijantu (za rijetke pojave, tj. za stanje mora koje se pojavljuje u nekom duljem nizu godina). Po lokaciji prognoze mogu biti globalne (npr. valna prognoza WMO za vjetrovne valove svjetskog mora ili globalni model rasprostiranja plimnih valova), regionalne (npr. valna prognoza WMO za Mediteran, valna prognoza ALADIN za Jadran ili model rasprostiranja plimnih valova na Jadranu) i lokalne koje se odnose na jednu geografsku točku. Po nastupu mogu biti vjerojatnosne i vremenske. Prve definiraju vjerojatnost nastupa neke valne veličine, a druge i vrijeme njenog nastupa.