

IV. ODABIR I PRORAČUN KABLOVA

U analizama i proračunima sistema napajanja posmatrane grupe potrošača u okiru gradskog konzuma polazi se od činjenice da se u gradskim konzumima primjenjuju kablovi.

Odabira se:

- odgovarajući tip i
- presjek kabla,

u skladu sa važećim Preporukama.

Za odabrani tip i presjek kabla potrebno je utvrditi da li on zadovoljava što se tiče:

- **normalnog pogona kao i**
- **u stanju kvara na kablu.**

Kabl se provjerava na:

- **dozvoljeno strujno opterećenje (normalni-ustaljeni režim i privremeni nužni pogon),**
- **dozvoljenu struju kratog spoja i**
- **dozvoljeni pad napona.**

1. Dozvoljeno strujno opterećenje kabla

Dozvoljeno strujno opterećenje kabla treba da bude ograničeno tako da toplota proizvedena u kablovskom vodu bude odvedena u okolinu tako da se ne prekorači maksimalno dozvoljena temperatura provodnika (npr. 90⁰C za kabl sa UMP - X, u normalnom-ustaljenom režimu).

Pri tome se polazi od:

- **poznate vrijednosti nazivne (naznačene) struja kabla ($I_n [A]$),** koje se daju u tabelama odgovarajućih priručnika i katalogima proizvođača kablova, i
- **uticajnih faktora za konkretne uslove polaganja.**

Naznačene (nazivne) struja kablova daju se za referentne uslove:

- **temperatura tla $\theta_{tr} = 20^0C$,**
- **specifična toplotna otpornost tla $\rho_{tr} = 1 Km / W$ (za kabl 110 kV $\rho_{tr} = 1,2 Km / W$)**
- **dubina polaganja $h = 0,7m$ ($h = 1m$ za kabl 35 kV, $h = 1,2m$ za kabl 110 kV),**
- **jedan kabl u rovu,**
- **ili - promjenljivo distributivno opterećenje sa $m = 0,7$ za NN i SN mrežu i $m = 0,8$ za mrežu 110 kV, ili – konstantno opterećenje (npr. industrijski pogon)**
- **sa uvažavanjem cirkulacionih struja u elementima zaštite na umanjenje vrijednosti struje.**

Dozvoljeno strujno opterećenje kabla u konkretnim uslovima polaganja i rada kabla, određuje se uvažavajući niza uticajnih faktora:

- **karakteristika opterećenja ($m=?$),**
- **karakteristika zemljišta,**
- **temperature tla,**
- **temperature vazduha,**
- **uticaja jednog kabla na drugi,**
- **njihove međusobne udaljenosti, položaja, opterećenja i dr.**

Tako je **dozvoljeno strujno opterećenje kabla u konkretnim uslovima polaganja i opterećenja kabla:**

$$I_{doz} = K I_n$$

- gdje su:
- K - ukupni koeficijent korekcije opterećenja, koji je proizvod više koeficijenata:
 - K_1 - koeficijent zavisn od **dubine polaganja**,
 - K_2 - koeficijent zavisn od **toplotnog otpora tla**,
 - K_3 - koeficijent zavisn od **temperature tla**,
 - K_4 - koeficijent zavisn od **broja i razmaka kablova u zemlji**,
 - K_m - koeficijent **faktora opterećenja**,
 - I_n [A] - nazivno (naznačeno) opterećenje kabla.

Ukupni koeficijent korekcije je:

$$K = K_1 K_2 K_3 K_4 K_m$$

I temperatura vazduha ima uticaja, pa se uvodi i koeficijent K_5 .

Vrijednosti pojedinih koeficijenata date su u sljedećim tabelama /“ELKA” proizvođač kablova/.

K_1 - korekcionni faktor za različite dubine polaganja

dubina polaganja (m)	faktor K_1
0,50 do 0,70	1,00
0,71 do 0,90	0,99
0,91 do 1,10	0,98
1,11 do 1,30	0,96
1,31 do 1,50	0,95

Toplota sa površine kabla položenog u zemlju prostire se od kabla ka površini zemljišta, a odavde u atmosferu. Pri tome se prostiranje toplote suprostavlja **toplotni otpor zemljišta** (tla) u kojem je položen kabl i prelazni toplotni otpor površine zemljišta. Povećanje toplotnog otpora zemljišta smanjuje dozvoljeno strujno opterećenje, pri čemu je to smanjenje nešto izraženije kod kablova većeg presjeka.

K_2 - korekcionni faktor za različite specifične toplotne otpornosti tla

Presjek provodnika mm ²	faktor K_2 za razne toplinske otpore tla dane u °. Km /W						
	0,70	1	1,20	1,50	2	2,50	3
35 – 95	1,08	1,00	0,95	0,90	0,80	0,74	0,69
120 – 400	1,09	1,00	0,95	0,89	0,79	0,73	0,68

Temperatura zemljišta znatno utiče na dozvoljeno strujno opterećenje kablova. Ako temperatura zemljišta npr. padne sa 20°C na 5°C, što odgovara zimskim uslovima, kabl IPO 13 10kV može se opteretiti sa preko 15% više.

K_3 - korekcionni faktor za različite temperature tla

najveća radna temperatura provodnika°C	faktor za različite temperature tla °C							
	-5	0	5	10	15	20	25	30
90	1,17	1,14	1,10	1,07	1,04	1,0	0,97	0,92
80	1,19	1,16	1,11	1,08	1,04	1,0	0,96	0,91
70	1,22	1,19	1,14	1,09	1,05	1,0	0,94	0,89
65	1,24	1,20	1,16	1,10	1,05	1,0	0,93	0,88

Vrijednost koeficijenta paralelnog polaganja kablova – K_4 zavisi od broja i rastojanja između kablova. Kada se u isti rov polaže veliki broj kablova, na primjer na izlazu iz TS 110/X kV ili X/0,4 kV, ona može da bude veoma mala i da znatno umanjuje prenosnu moć napojnih kablovskih dionica

(problem raspjeta kablova iz napojnih i distributivnih TS). Takvi slučajevi treba da se posebno analiziraju, a problem se rješava:

- Usvajanje većeg presjeka provodnika kabla, odnosno napojne dionice;
- Primjena drugog tipa kabla, npr. kablova sa izolacijom od umreženog polietilena tipa XHE 49-A, XP00-ASJ idr, pod uslovom da to ne dovodi do isušivanja tla;
- Primjena posteljice od specijalnih mješavina.

K_4 - korekcionni faktor za zličiti broj paralelno položenih kablova

broj kablova (sistema) u istom rovu		faktor K_4						
		2	3	4	5	6	8	10
razmak između kablova (sistema)	dodir	0,79	0,69	0,63	0,58	0,55	0,50	0,46
	7 cm	0,85	0,75	0,68	0,64	0,60	0,56	0,53
	15 cm	0,86	0,77	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58
	25 cm	0,87	0,78	0,74	0,71	0,67	0,64	0,62

Vrijednost koeficijenta K_m zavisi od faktora opterećenja m dnevnog dijagrama opterećenja. Nazivna strujna opterećenja kablova se najčešće daju za dnevne dijagrame opterećenja:

- Za stalno opterećenje $m = 1$;
- $m = 0,7$ za konzum koji se napaja iz NN i SN mreže, kod kojeg se smjenjuje maksimalno opterećenje trajanja 6 sati, sa opterećenjem od 60% masimalnog u preostalim 18 sati;
- $m = 0,8$ za konzum koji se napaja iz 110 mreže, kod kojeg se smjenjuje maksimalno opterećenje trajanja 6 sati, sa opterećenjem od 73 % masimalnog u preostalim 18 sati.

Ako je nazivna struja data za $m = 0,7$ ili $m = 0,8$, onda nazivnu struju za stalno opterećenje treba pomnožiti sa koeficijentom:

$K_m = 0,75$ za SN i NN kablove i

$K_m = 0,91$ za 110 kV kablove.

Strujno opterećenje kabla u pogonu se proračunava na osnovu opterećenja potrošača. U trofaznom sistemu, za konstantnu snagu potrošnje $P[W]$, naponu $U[kV]$ i faktoru snage $\cos\varphi$ ono iznosi:

$$I_{op} = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos\varphi} \cdot$$

Ovo je stvarno opterećenje, odnosno prenosna struja, koja odgovara max. režimu opterećenja.

Maksimalna struja opterećenja ($I_{op}[A]$) ne smiju biti veća od dozvoljene trajne struje opterećenja ($I_{doz}[A]$), odnosno: $I_{op} \leq I_{doz}$

KABL XHP 48-A 3x(1xS mm²), 20 kV

X - oznaka za izolaciju od umreženog polietilena (UPE),

H - oznaka za poluvodljive slojeve preko provodnika i preko izolacije,

P - oznaka za spoljašnji PVC plašt,

48 - oznaka za zaštitu,

-A - oznaka za aluminijski provodnik,

3x(1x150) mm² - broj kablova × (broj žila × nazivni presjek provodnika u mm)

Nazivne (naznačena) struje kabla u zavisnosti od presjeka provodnika, date su u sljedećoj tabeli (ELKA – proizvođač kablova), a za referentne uslove polaganja:

- temperatura vazduha $\theta_v = 30^0 C$

- temperatura tla (zemlje) $\theta_t = 20^0 C$
- temperatura provodnika $\theta_p = 90^0 C$
- specifična toplotna otpornost tla $\rho_t = 1^0 Km / W$

Karakteristike ovog tipa kabla i nazivna struja za konstantno opterećenje dati su u sljedećoj tabeli:

presjek vodiča (mm ²)	izmjenični otpor vodiča (Ω/km)	pogonski induktivitet vodiča (mH/km)	strujno opterećenje I _N (A)	promjer preko plašta d _v (mm)
25	1,540	0,54	126	28,0
35	1,100	0,46	160	28,0
50	0,804	0,42	185	30,0
70	0,557	0,40	230	32,0
95	0,401	0,38	270	33,0
120	0,318	0,37	310	35,0
150	0,259	0,36	345	37,0
185	0,206	0,35	390	39,0
240	0,156	0,33	455	42,0
300	0,125	0,32	510	44,0
400	0,0977	0,31	600	48,0
500	0,0776	0,37	616	52,5
630	0,0601	0,36	712	56,0

2. Kontrola presjeka kabla na struj kratkog spoja

Struja kratog spoja koja protiče provodnikom kabla u većini slučajeva značajno je veća od dozvoljenog strujnog opterećenja. Velika struja prouzrokuje naglo povećanje temperature provodnika, što može izazvati hemisko razlaganje izolacije, te pogoršati električne i mehaničke osobine izolacije. Sve to može dovesti do kvara, odnosno proboja izolacije kabla. Dozvoljene temperature zagrijavanja kablova pri kratom spoju daju se u odgovarajućim priručnicima i katolozima proizvođača kablova.

Struju kratkog spoja ($I_{KS}[A]$) koju kabal može podnijeti bez trajnih oštećenja, računamo iz podataka o:

- trajanju kratkog spoja ($t_{KS}[s]$),
- dozvoljenoj (nazivnoj) struji kratkog spoja ($I_{KSn}[A]$) i temperaturi provodnika na početku kratkog spoja ($T_k[°C]$),

$$I_{KS} = \frac{1}{\sqrt{t_{KS}}} I_{KSn}$$

Podaci o dozvoljenoj (nazivnoj) struji KS, određuju se iz tabele, zavisno od presjeka i temperature kabla prije KS. Podaci u sljedećoj tabeli se odnosi na razmatrani tip kabla, XHP 48-A 3x(1xS mm²), 20 kV.

presjek provodnika (mm ²)	STRUJA KS (kA), temperatura na početku kratkog spoja °C		
	20	30	90
25	3,00	2,90	2,30
35	4,10	3,90	3,20
50	5,50	5,30	4,40
70	8,00	7,80	6,30
95	11,10	10,80	8,80
120	14,00	13,60	11,10
150	17,40	16,90	13,80
185	21,60	21,00	17,10
240	28,70	27,80	22,60
300	35,70	34,60	28,20
400	45,60	44,30	36,00
500	60,00	58,00	47,00
630	75,60	73,10	59,20

3. Kontrola presjeka kabla na pad napona

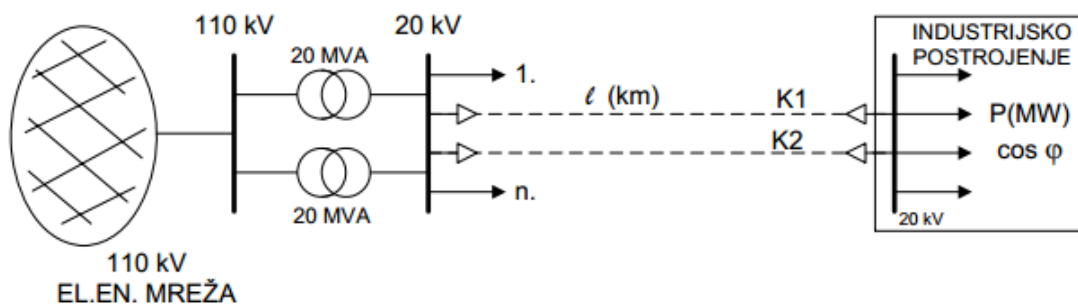
Pad napona na kablovskoj dionici sa koncentrisanim opterećenjem na kraju, računa se preko izraza:

$$\Delta u_{\%} = \frac{Pl}{U^2} (R_1 + X_1 \operatorname{tg} \varphi) 100[\%]$$

gdje su: $R_1[\Omega/km]$ - jedinična aktivna otpornost kabla
 $X_1[\Omega/km]$ - jedinična induktivna otpornost kabla
 $\cos \varphi$ - faktor snage
 $P[kW]$ - aktivno opterećenje na kraju kabla
 $l[km]$ - dužina kablovskog voda

Izračunata vrijednost pada napona mora biti manja od dozvoljenog pada napona. Ako taj uslov nije zadovoljen, odabiramo veći presjek kabla.

4. PRIMJER

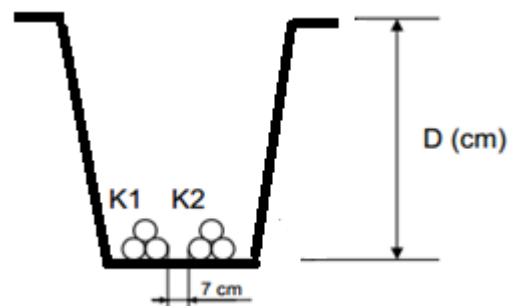


Kablovskim elektroenergetskim vodom XHP 48-A $3 \times (1 \times S) \text{ mm}^2$, 20 kV, napaja se električnom energijom industrijsko postrojenje (KONSTANTNO OPTEREĆENJE).

Potrebno je odrediti presjek kabla K1 i kabela K2 koji predstavlja toplu rezervu kabela K1 i koji mora biti dimenzioniran za iste uslove kao i kabel K1.

Zadati su sljedeći podaci:

- nazivni napon $U_n = 20 \text{ kV}$
- dužina kabla $l = 9,5 \text{ km}$
- potrebna prenosna snaga kabla $P = 10,5 \text{ MW}$
- faktor snage $\cos \varphi = 0,8$
- najveća temperatura provodnika $T_{\max} = 90^\circ \text{C}$
- temperatura okoline kod polaganja u zemlju $T_t = 15^\circ \text{C}$
- temperatura vazduha $T_v = 25^\circ \text{C}$
- dubina polaganja u zemlju $D = 90 \text{ cm}$
- razmak između kablova $d = 7 \text{ cm}$
- termički otpor zemlje $\rho_t = 1^\circ \text{K m/W}$
- raspored polaganja - trougao
- kabovi položeni u zemlju
- broj kablova u istom rovu $n = 2$
- struja kratkog spoja $I_{KS} = 12 \text{ kA}$
- trajanje kratkog spoja $t_{KS} = 0,3 \text{ s}$
- dozvoljeni pad napona $u_{\text{doz}} = 5\%$



Strujno opterećenje kabla

Struja prenosa kabla određena je opterećenjem potrošača (konstantno maksimalno opterećenje):

$$I_{op} = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{10,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 360,84 A$$

Ovu struju zadovoljava presjek $S = 185 mm^2$, sa nazivnim strujnim opterećenjem $I_n = 390 A$. Nazivne struje iz posmatrane tabele date su za konstantno opterećenje.

Dozvoljena struja opterećenja za posmatrane uslove polaganja kabla je:

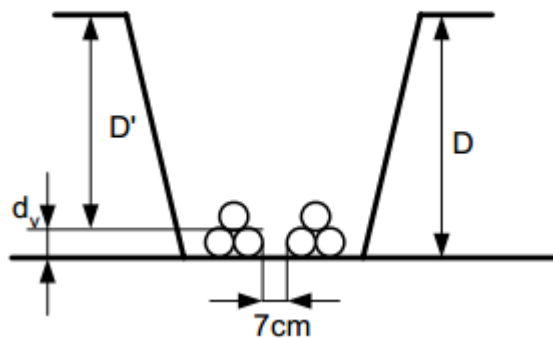
$$I_{doz} = K I_n$$

Ukupni oeficijent korekcije je:

$$K = K_1 K_2 K_3 K_4$$

Koeficijeni K_1 uzima obzir dubinu polaganja kabla. Obzirom da su kablovi položeni u trolistu (slika), stvarnu dubinu polaganja dobijamo ako od dubine polaganja $D = 90$ cm oduzmemo spoljašnji prečnik jedne žile kablovskog voda, odnosno:

$$D' = D - d_v = 90 - 3,9 = 86,1 \text{ cm}$$



Za ovu dubinu polaganja, iz tabele $\Rightarrow K_1 = 0,99$

Koeficijent K_2 uzima u obzir toplotni otpor okolnog tla. Za zadani otpor tla od $1 \text{ }^\circ\text{Km/W}$, iz tabele $\Rightarrow K_2 = 1$

Faktor K_3 zavisi od temperaturi okolnog zemljišta i maksimalne radne temperature provodnika. Za zadatu temperaturu okolnog tla od $15 \text{ }^\circ\text{C}$ i maksimalnu radnu temperaturu od $90 \text{ }^\circ\text{C}$, iz table $\Rightarrow K_3 = 1,04$.

Faktor K_4 zavisi od broja sistema (kabela) u istom rovu i njihove međusobne udaljenosti. Obzirom da je zadatkom zadato da su 2 kablovska sistema na međusobnoj udaljenosti od 7 cm u istom rovu, iz table $\Rightarrow K_4 = 0,85$

Dobijamo: $K = K_1 K_2 K_3 K_4 = 0,875$

⇒

$$I_{doz} = I_{op} = KI_n = 0,875I_n$$

$$I_n = \frac{I_{op}}{0,875} = \frac{360,84}{0,875} = 411,42 \text{ A}$$

Prva veća nazivna vrijednost struje je $I_n = 455 \text{ A}$, a presjek kabla $S = 240 \text{ mm}^2$

Sada se mijenja samo koeficijent K_1 , jer se mijenja dubina polaganja

$$D' = D - d_v = 90 - 4,2 = 85,8 \text{ cm}$$

Za ovu dubinu dobija se ista vrijednost za K_1 , pa je odabrani presjek $S = 240 \text{ mm}^2$.

Provjera na struju KS

Za presjek $S = 240 \text{ mm}^2$, dozvoljena struja KS, uz pretpostavku da je temperatura prije KS jednaka maksimalno dozvoljenoj, prema tabeli je

$$I_{KS_n} = 22,6 \text{ kA}$$

Struja kratkog spoja koju kabl može da izdrži:

$$I_{KS} = \frac{1}{\sqrt{t_{KS}}} I_{KS_n} = \frac{1}{\sqrt{0,3}} 22,6 = 41,26 \text{ kA}$$

Struja od 41,26 kA veća je od 12,0 kA koliko je zadatkom data struja kratkog spoja. U slučaju da se pokazalo kako je struja kratkog spoja koju kabl može izdržati u definisanom vremenu trajanja kratkog spoja manja od struje kratkog spoja, morali odabrati prvi veći presjek kabla i ponoviti proračun sa novim vrijednostima od točke 1. Bilo bi potrebno provjeriti i korekcione faktore odnosno struju opterećenja, međutim sigurno je da, ako je struja opterećenja bila manja od struje prenosa za manji presjek, da će biti i za veći presjek.

Provjera na dozvoljeni pad napona

Dozvoljeni pad napona definisan zadatkom iznosi 5%, a računa se prema sljedećem izrazu:

$$\begin{aligned} \Delta u_{\%} [\%] &= \frac{PI}{U^2} (R_1 + X_1 \tan \varphi_1) 100 = \\ &= \frac{10,5 \cdot 10^6 \cdot 9,5}{20 \cdot 10^6} (0,156 + 0,33 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cdot \tan(\arccos 0,8)) 100 = 5,55\% \end{aligned}$$

Dobijena vrijednost od 5,55% veća je od, tekstom zadatka, dozvoljenih 5%. Odabiremo prvi veći presjek i ponavljamo proračun.

Dakle, u trećem pokušaju računamo s presjekom kablenskog voda od 300 mm². Dozvoljena struja odabranog presjeka iznosi 510 A.

Nove vrijednosti struje opterećenja, kratkog spoja i pada napona su:

468,33 A ZADOVOLJAVA !

51,586 kA ZADOVOLJAVA !

4,76% ZADOVOLJAVA !

Obzirom da su sva tri kriterija zadovoljena, možemo utvrditi kako odabrani presjek od 300 mm², u potpunosti zadovoljava sve postavljene uslove te definišemo 20 kV kabl: **XHP 48-A 3×(1×300) mm², 20 kV.**

V. POLAGANJE KABLOVA

1. Osnovno

Prema mjestu polaganja kablovi se dijele na:

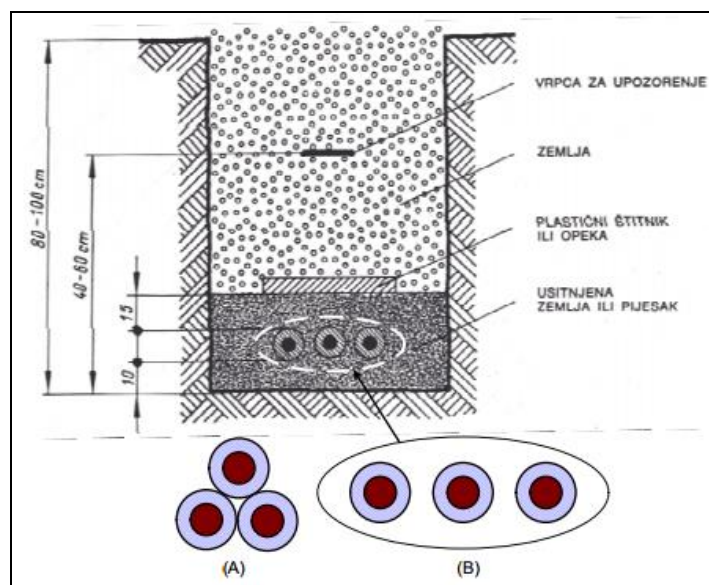
- Podzemne kablove,
- Podmorske kablove i
- Vazdušne kablove (samnoseći kablovski snop).

Podzemni kablovi

Podzemni kablovi se u principu polažu u kablovske rovove. Polaganje kabla i njegovo zatrpavanje mora biti pažljivo provedeno. Oblikuje se tzv. **kablovska posteljica** od sitno zrnastog materijala (nula). Bitan je materijal koji dobro odvodi toplotu (važno je zbog odvođenja toplote iz kabla, što se mora kontrolisati termičkim proračunom zagrijavanja kabla).

Jednožilni kablovi se polažu u rovove na jedan od sljedećih načina:

- Polaganje u trougaoni spoj (*slika xx, A*) znači da se tri jednožilna kabla međusobno dodiruju (vezuju se trakom), zbog čega se povećava toplotno opterećenje odnosno djelomično se smanjuje prenosna moć kabla.
- Polaganje u ravnini (*slika xx, B*) znači da je svaki jednožilni kabl udaljen od drugog npr. 20-tak cm, pa su zbog većih udaljenosti kablovi manje toplotno opterećeni, a prenosna moć kabla je nešto veća, ali se zauzima veći prostor, tj. potrebna je veća širina kablovskog rova.



Slika xx: polaganje kabla u rov

Podmorski kablovi

Podmorski kablovi se polažu na dnu mora (pomoću posebnih brodova), redovno kao tri jednožilna kabla s većim razmakom između pojedinih kablova da se eventualno mehaničko oštećenje (npr. brodska sidra) ograniči samo na jedan kabl (popravak podmorskog kabla je vrlo skup...). Dijelovi podmorskog kabla na mjestima ulaza i izlaza iz mora su najviše izloženi djelovanju morske