

UNIVERZITET U NIŠU

GRAĐEVINSKO - ARHITEKTONSKI FAKULTET



**UTVRĐIVANJE KRITERIJUMA ZA IZBOR REŠENJA
REGULISANJA REČNIH TOKOVA**

Doktorska teza

mr Milica V. Marković, dipl.inž.grad.

Niš, 2013

UTVRĐIVANJE KRITERIJUMA ZA IZBOR REŠENJA REGULISANJA REČNIH TOKOVA

mr Milica V. Marković, dipl.inž.grad.

UNIVERZITET U NIŠU
GRAĐEVINSKO-ARHITEKTONSKI FAKULTET

Mentor

Prof. dr Dragan Arandelović, dipl.inž.grad.
Univerzitet u Nišu, Republika Srbija
Građevinsko-arhitektonski fakultet

Komentor

Akademik prof. dr Stematiu Dan, dipl.inž.grad.
Tehnički univerzitet građevinarstva u Bukureštu, Republika Rumunija
Fakultet za hidrotehniku

SAŽETAK

Prekomerno i nekontrolisano korišćenje, za opstanak ljudi veoma važnih prirodnih resursa, izazvano ogromnim tehnološkim razvojem, značajno ugrožava životnu sredinu. Poslednja decenija prošlog veka obeležena je buđenjem ekološke svesti, implementacijom kompleksnih mera zaštite životne sredine i kreiranjem novog filozofskog pristupa korišćenju prirodnih resursa u daljem civilizacijskom razvoju. Opšteprihvaćeni koncept „održivog razvoja“ podrazumeva razvoj koji zadovoljava potrebe života ljudi danas koji pri tom pruža mogućnost budućim generacijama da zadovolje vlastite potrebe. Osnovni cilj ovog koncepta je kontinualno poboljšanje života ljudi i taj cilj ne može biti postignut ukoliko društvo nije u stanju da racionalno i efikasno koristi prirodne resurse, ekološki i ekonomski potencijal, obezbeđujući neraskidivu vezu između ekonomskog razvoja, zaštite životne sredine i društvenog interesa.

Voda je najvažniji prirodni resurs. Konstruktivna rešenja u vodoprivredi uopšte, a posebno u izuzetno osetljivoj i kompleksnoj problematici uređenja rečnih tokova imaju snažan i dugotrajan uticaj na ekonomiju i društvo uopšte. Klasičan pristup uređenju rečnih tokova usmeren je ka ispunjavanju osnovnih vodoprivrednih zahteva kao što su zaštita od poplava, zaštita priobalnih oblasti, osiguranje rečnog korita, i stvaranje adekvatnog priobalnog prostora za ekonomski razvoj. Ova rešenja mogu dovesti do degradacije životne sredine odnosno do promene prirodnih fizičko-hemijskih i morfoloških komponenti životne sredine, gubitka biodiverziteta i prirodnih i antropogenih produktivnosti ekosistema, uticati na ekološku ravnotežu i kvalitet života ljudi.

Osnovni cilj ove doktorske teze jeste definisanje održivog pristupa selekciji hidrotehničkih konstrukcija za regulisanje rečnog toka primenom metoda višekriterijumske analize (VKA), koji bi osim postizanja osnovnih ciljeva regulisanja rečnih tokova (zaštita od poplava, zaštita priobalnih oblasti, osiguranje rečnog korita, stvaranja prostora za ekonomske aktivnosti) omogućio i ekološki razvoj reka u skladu sa zahtevima koncepta „održivog razvoja“ definisanjem kriterijuma uz pomoć kojih bi se došlo do najprihvatljivijeg konstruktivnog rešenja.

U radu je razrađena primena višekriterijumske analize metodom izbora odgovarajućeg alternativnog rešenja uređenja rečnih tokova predloženog za izabranu deonicu rečnog toka. Ovaj metod predstavlja pomoć pri odlučivanju, na način koji interesnim stranama pomaže u sistematizaciji dostupnih informacija i ispitivanju sopstvenih zahteva i nivoa tolerancije. Predstavljeni pristup, zasniva se na autorovom izboru kriterijuma održivosti i identifikuje, najbolje rešenje za održivi razvoj rečnog sistema, uključujući uticaj na životnu sredinu

izvođenja predloženih regulacionih radova. Kao primer u radu uzeta je deonica reke u Podkaraptju, za koju postoje tri projektom predviđene relevantne varijante i to: jednogubo trapezno rečno korito sa oblogom od betona, jednogubo trapezno rečno korito sa zaštitom kosina gabionima/gabionskim madracima i prirodno (neregulisano) rečno korito. Za ugledno poređenje alternativnih rešenja korišćene su metode ELECTRE i PROMETHEE GAIA, koje omogućavaju poređenje kriterijuma različitih jediničnih mera. Osnovna razlika primene ovih metoda je u definisanju težinskih kriterijuma, koji su u metodi ELECTRE isključivog subjektivnog karaktera dok je metodom PROMETHEE GAIA dato ugledno poređenje tri scenarija primene subjektivnih, objektivnih i integrisanih subjektivnih i objektivnih težinskih vrednosti kriterijuma. Za definisane scenarije analize tri alternativna rešenja kompletno rangiranje metodom PROMETHEE GAIA izvršeno je korišćenjem softverskog paketa Decision Lab 2000. U primeru, konačnim rangiranjem varijanti obe metode ukazuju da je drugo projektantsko rešenje održivo.

VKA nije alat za obezbeđivanje „idealnog“ rešenja u problemu odlučivanja, obzirom da takvog rešenja nema. Obezbeđeno rešenje, može se smatrati najboljim ponuđenim samo za interesne strane, koje su dale procenu rešenja u formi težinskih kriterijuma, dok procene rešenja ostalih interesnih grupa mogu dati prednost nekom drugom alternativnom rešenju.

Rezultati dobijeni u radu i izvedeni zaključci imaju opšti karakter i mogu se primeniti u svim oblastima upravljanja vodama pri izboru optimalnog hidrotehničkog konstruktivnog rešenja.

Ključne reči: hidrotehničke konstrukcije, održivi razvoj, višekriterijumska analiza

SUMMARY

People used moderate natural resources and obeyed the natural laws. Last Century of the II millennium constitutes a turning point in the relations, since it brought into question the harmony between people and the natural environment. The concept of „sustainable development“ is development which meets the needs of the present providing the ability of future generations to meet their own needs. The aim of this concept refers to the continuous improvement of quality of life and cannot be achieved if the community is not able to rationally and effectively use natural resources and ecological potential of the economy, providing an unbreakable link between economic prosperity, environmental protection and public interest.

Water is an important natural resource. Engineering solutions for river training structures have a strong and long-lasting impact on the economy and society in general. Traditional structural solutions in river training works are focused on basic requirements as flood protection, littoral zone protection, river bed protection, providing the space for economic development. These solutions may lead to environmental degradation, i.e. alteration of physical-chemical and morphological characteristics of the natural components of the environment, decrease of diversity and biological productivity of natural and anthropogenic ecosystems, impacts on the ecological balance and quality of life.

The main purpose of this thesis was to define a approach for the selection of hydraulic structures using multi criteria analysis, that would in addition to the basic water management requirements (flood protection, coastal protection, protection of the river bed, securing the space for economic development) provide the ecological development of rivers in accordance with the requirements of the „sustainable development“.

This thesis elaborates on the application of multi criteria analysis method in selecting an appropriate alternative river training proposed solution for the section of the river course. Presented method is an aid to decision-making that helps stakeholders organize available information, think on the consequences, explore their own wishes and tolerances.

Approach presented is based on the author's selection of sustainability criteria and identifies the best solution for the sustainable development of the river system, regarding to the environmental impact of proposed river training structural solution. In the case study section of the river in lower part of Carpathian Mountains is considered, for which three relevant intended alternative solutions are designed: riverbed with concrete lining, riverbed slope protection with

gabions/gabion mattresses and natural (unregulated) riverbed. For alternative solutions respectable comparison the ELECTRE and PROMETHEE GAIA methods were applied, which allow comparison of different criteria unit measures. The main difference in the application of these methods is in defining the criteria weights, which in the method ELECTRE are exclusively subjective, while in a PROMETHEE GAIA method a respectable comparison of three scenarios of application of subjective, objective and integrated subjective and objective weights for criteria are given. For the analysis of the three scenarios defined alternatives, complete ranking of PROMETHEE GAIA method was performed using the software package Decision Lab 2000. In the case study, the final ranking of alternative solutions in both methods indicates that design of second structural solution is sustainable.

MCA is not a tool providing the „right“ solution in a decision problem, since no such solution exists. The solution provided might be considered best only for the stakeholders who provided their values in the form of weighting factors, while other stakeholders' values may indicate another alternative solution.

Results obtained in the work and the conclusions derived have general character and can be applied in all areas of water management in the selection of optimal hydraulic constructive solutions.

Key words: hydraulic structures, sustainable development, multi criteria analysis

ZAHVALNOST

Tokom protekle četiri godine dobila sam podršku i ohrabrenje od mnogih ljudi i profesionalno i lično. Ovim putem želela bih da im se zahvalim.

Htela bih da se zahvalim svom mentoru, prof. dr Draganu Arandeloviću, redovnom profesoru Univerziteta u Nišu, koji mi je od prvog dana pružao veliku pomoć i podršku tokom rada i davao jako korisne sugestije. Vrlo sam mu zahvalna što mi je pomogao da prevaziđem sve teškoće na koje sam nailazila tokom izrade teze. Bez njegove pomoći, to nikako ne bi bilo moguće. Dugujem mu, jedno veliko hvala.

Želim da izrazim svoju duboku zahvalnost komentoru, prof. dr Danu Stematiju, redovnom profesoru Univerziteta u Bukureštu i članu Rumunske akademije nauka, za njegovu kontinuiranu podršku i odlične smernice tokom mog rada na tezi. Zahvalna sam mu i na pomoći pri izboru i koncipiranju teme doktorske disertacije. On mi je pomogao da otkrijem novi pristup projektovanju hidrotehničkih konstrukcija i ulio mnoga nova saznanja. Bila mi je velika čast raditi s tako velikim i priznatim stručnjakom.

Želela bih da se zahvalim prof. dr Cvetanki Popovskoj, redovnom profesoru Univerziteta u Skoplju, koja me je od prvog dana naše saradnje najsrdačnije prihvatila. Njena energičnost, pozitivan duh i kritički stav, pomogli su mi da uspešno privedem svoju tezu kraju. Takođe bi htela da se zahvalim dr Đorđu Nikoliću, docentu Univerziteta u Beogradu, na velikoj pomoći u oblasti višekriterijumske analize. Bila mi je velika čast saradivati sa njima.

Ništa manje htela bih da izrazim svoju zahvalnost prof. dr Slobodanu Milenkoviću, koji mi je pružao snažnu podršku tokom mog postdiplomskog usavršavanja, kao i prof. dr Serafimu Opricoviću na velikoj pomoći u pripremi rada „Multi criteria Analysis of Hydraulic Structures for River Training Works“ za publikaciju.

Postoje ljudi koji su svakodnevno bili uz mene i njih nikako ne bih mogla da izostavim. Puno hvala mojim dragim kolegama iz Javnog vodoprivrednog preduzeća „Srbijavode“ i svim mojim dragim prijateljima koji su me svesrdno hrabрили.

Tokom ovih godina, moja porodica mi je u svakom trenutku pružala ogromnu podršku, koja je uvek od ključnog značaja za svaki napredak u životu.

Mom ocu Veljku, majci Biserki i sestri Jeleni, večno sam zahvalna za njihovu bezuslovnu ljubav, podršku i naklonost i njima posvećujem svoj rad.

SADRŽAJ

SIŽE RADA	iv
ZAHVALNOST	viii
SADRŽAJ.....	ix
LISTA SIMBOLA	xiii
1 UVOD	1
1.1 TEORIJSKI OKVIR I MOTIV ISTRAŽIVANJA	1
1.2 PREDMET I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	3
1.3 ISTORIJSKI KONTEKST METODE VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA	4
1.4 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA.....	7
1.5 SADRŽAJNA STRUKTURA DOKTORSKE TEZE	7
2 VRSTE REGULACIONIH RADOVA NA UREĐENJU REČNIH TOKOVA. 9	
2.1 OSNOVNI PRINCIPI EMPIRIJSKIH KONSTRUKTIVNIH REŠENJA.....	9
2.2 VRSTE REGULACIONIH RADOVA PREMA TIPU RELJEFA	10
2.3 VRSTE REGULACIONIH RADOVA PREMA CILJU UREĐENJA	10
2.3.1 Regulacioni radovi u cilju zaštite od poplava.....	11
2.3.2 Regulacioni radovi u cilju obezbeđenja stabilnosti rečnih obala	11
2.3.3 Regulacioni radovi u cilju osiguranja rečnog korita.....	12
2.3.4 Regulacioni radovi u cilju otvaranja prostora za ekonomske aktivnosti	13
2.3.5 Regulacioni radovi u cilju renaturalizacije rečnih tokova.....	13
2.4 VRSTE I KARAKTERISTIKE REGULACIONIH RADOVA PREMA NJIHOVOM OBIMU.....	13
2.4.1 Klasični regulacioni radovi	13
2.4.2 Kompleksni regulacioni radovi	13
2.5 VRSTE REGULACIONIH RADOVA PREMA TIPU INTERVENCIJE.....	14

2.5.1	Promena trase vodotoka (presecanje krivina)	14
2.5.2	Rektifikacija geometrije prirodne trase vodotoka	14
2.5.3	Stabilizacija rečnog korita i/ili obala u horizontalnom pravcu.....	14
2.5.4	Stabilizacija rečnog korita i/ili obala u vertikalnom pravcu.....	14
2.5.5	Skretanje rečnog toka	15
2.5.6	Proširenje rečnog korita	15
2.5.7	Kanalisanje rečnog korita.....	15
3	OPTEREĆENJA REČNOG KORITA KOJA USLOVLJAVAJU ZAŠTITNE REGULACIONE MERE.....	16
3.1	HIDRODINAMIČKO OPTEREĆENJE STRUJANJA REČNOG TOKA	16
3.1.1	Proračun tangencijalnog napona	16
3.1.2	Relevantne fizičke karakteristike	17
3.1.3	Tangencijalni napon. Otpornost čestica na kretanje.....	17
3.1.4	Proračun kritičnog tangencijalnog napona	18
3.2	HIDRODINAMIČKO OPTEREĆENJE INFILTRACIONIH STRUJANJA	21
3.2.1	Lom obloge usled uticaja pornog pritiska vode	21
3.2.2	Podizanje obloge	23
3.2.3	Erozija tla kroz filter ili zaštitni sloj.....	26
3.3	UTICAJ TALASA IZAZVANIH VETROM ILI KRETANJEM BRODOVA	28
3.3.1	Uticaj talasa izazvanih vetrom	28
3.3.2	Uticaj talasa izazvanih kretanjem brodova.....	31
3.4	UTICAJ LEDA.....	35
3.4.1	Statičko opterećenje leda.....	35
3.4.2	Dinamičko opterećenje leda	36
3.4.3	Opterećenje „zalepljenog ledenog sloja“	37
4	OPŠTI USLOVI UREĐENJA REČNIH TOKOVA	40
4.1	OPŠTI PRINCIPI REČNE GEOMORFOLOGIJE	40
4.2	UTICAJ REGULACIONIH RADOVA NA ŽIVOTNU SREDINU	43
4.3	KLASIFIKACIJA REGULACIONIH RADOVA PREMA INTENZITETU UTICAJA NA ŽIVOTNU SREDINU	44

5	PROCENA UTICAJA KONSTRUKCIJA ZA UREĐENJE REČNIH TOKOVA NA ŽIVOTNU SREDINU	46
5.1	UTICAJ DENATURALIZACIJE REČNIH TOKOVA.....	46
5.2	UTICAJ KONSTRUKTIVNIH REŠENJA NA DENATURALIZACIJU REČNIH KORITA.....	55
5.3	KOMPLEKSNO PLANSKO UPRAVLJANJE REČNIM TOKOVIMA, PREMISE	60
6	IZBOR REŠENJA PRIMENOM METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA.....	63
6.1	OSNOVNI PRINCIPI VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA	63
6.2	PRIMENA ELECTRE METODA.....	65
6.2.1	Izbor i usvajanje kriterijuma.....	65
6.2.2	Rangiranje i utvrđivanje težinskih vrednosti kriterijuma	65
6.2.3	Definisanje alternativnih rešenja-varijanti	67
6.2.4	Ocena varijanti prema usvojenim kriterijumima.....	67
6.2.5	Proračun rezultujućih težinskih ocena.....	69
6.2.6	Proces odlučivanja.....	70
6.2.7	Utvrdivanja relevantnih kriterijuma odlučivanja.....	70
6.3	PRIMENA METODE NA PRAKTIČNOM PROBLEMU ODLUČIVANJA.....	71
6.3.1	Karakteristike uslova područja i rečne deonice.....	71
6.3.2	Selekcija opšteprihvaćenih kriterijuma	72
6.3.3	Rangiranje i utvrđivanje težinskih vrednosti kriterijuma	73
6.3.4	Definisanje alternativnih rešenja - varijanti	76
6.3.5	Ocena varijanti prema usvojenim kriterijumima.....	79
6.3.6	Proračun rezultujućih težinskih ocena.....	86
6.4	PRIMENA PROMETHEE METODA	89
6.4.1	Istorijski kontekst metode	89
6.4.2	Pregled rezultata metode PROMETHEE	94
6.5	TUMAČENJE I UPOREDNA ANALIZA REZULTATA	100
7	PRIMERI DOBRE PRAKSE IZBORA ODRŽIVOG KONSTRUKTIVNOG REŠENJA.....	103

7.1 REGULACIJA LJILJANSKE REKE.....	103
7.2 REGULACIONI RADOVI NA TULOVSKEJ RECI	107
8 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PREPORUKE ZA DALJA ISTRAŽIVANJA	109
8.1 ZNAČAJ I AKTUELNOST ISTRAŽIVANJA.....	109
8.2 NAUČNI DOPRINOS DOKTORSKE TEZE.....	112
8.3 KRITIČKI ASPEKT I PREPRORUKA ZA DALJA ISTRAŽIVANJA.....	112
LITERATURA	114

LISTA SIMBOLA

Latinična slova

A	koeficijent dužine denaturalizovane rečne deonice	[-]
a	rastojanje od nivoa slobodne vodene površine do nožice obloge	[m]
A_i	alternativno rešenje (varijanta)	[-]
B	širina vodnog ogledala	[m]
b_g	širina ledenog sloja	[m]
c	efektivna kohezija	[N/m ²]
$c_{geotextile}$	faktor poroznosti obloge od geotekstila	[m ⁻¹]
C_j	skup atributa (kriterijuma) odlučivanja	[-]
d	prečnik posmatrane čestice	[m]
D	debljina betonskih blokova	[m]
D_{15}	prečnik zrna granulometrijskog materijala na geotekstilu	[m]
d_j	stepen divergencije	[-]
d_k	prečnik kamenog bloka	[m]
d_{lmax}	debljina ledene kore verovatnoće pojave 1%	[m]
D_{n50}	prečnik kamena na 50% granulometrijske krive	[m]
d_{s50}	srednja vrednost prečnika čestica u podzemlju	[m]
E_3	referentna cena sekundarnih efekata varijante 3	[-]
E_j	entropijska vrednost	[-]
F	zaletna dužina vetra	[m]

F_s	koeficijent stabilnosti	[-]
F_{vl}	vertikalna sila od zalepljenog leda	[MN]
g	ubrzanje sile zemljine teže	[m/s ²]
G	koeficijent koji zavisi od tipa betonskih blokova	[-]
G_k	sopstvena težina bloka	[MN]
G_s	specifični pronos nanosa	[kg/s/m]
h	srednja dubina vode	[m]
H	visina talasa uzeta za projektovanje	[m]
h_1	razlika u nivou površinske i podzemne vode	[m]
h_g	debljina leda	[m]
H_i	visina najvišeg očekivanog talasa	[m]
H_{max}	nivo površinske vode pri koje se javlja maksimalni podizni pritisak	[m]
h_o	debljina obloge	[m]
H_s	značajna visina talasa	[m]
i	gradijent u filterskom sloju	[-]
I	ukupni koeficijent intenziteta uticaja alternativnog rešenja	[-]
I_c	indeks intenziteta uticaja konstruktivnih rešenja	[-]
i_{cr}	granična vrednost gradijenta u filterskom sloju	[-]
I_i	parcijalni koeficijenti (ekološka cena) uticaja alternativnog rešenja	[-]
I_r	broj Iribarren-a	[-]
IS_l	referentna cena investicija varijante 1	[-]
J	pad linije energije (pri jednolikom tečenju-pad dna)	[-]

k	broj sati merenja porasta temperature leda	[-]
K_g	koeficijent koji zavisi od granične otpornosti ledenog sloja	[-]
L	dužina posmatrane deonice rečnog toka	[m]
l	dužina između krajeva deonice rečnog toka	[m]
l_g	dužina ledenog sloja	[m]
L_w	dužina dometa vetra	[m]
m	broj usvojenih kriterijuma	[-]
m_f	krak sile F_{vl} u odnosu na tačke oslonca	[m]
$M_{i,j}$	merljiva karakterizacija alternativnog rešenja	[-]
m_j	prag indiferencije	[-]
n	poroznost filterskog sloja	[-]
n_f	krak sile sopstvene težine bloka G_k	[m]
$N_{i,j}$	normalizovana ocena alternativnog rešenja	[-]
$N_{i,j}^*$	primarna ocena alternativnog rešenja	[-]
$(N_{i,j})_p$	težinska ocena alternativnog rešenja po kriterijumima	[-]
N_j	ukupna težinska ocena alternativnih rešenja	[-]
n_j	prag preferencije	[-]
$(N_j)_R$	ukupna relativna ocena alternativnog rešenja	[-]
p	hidrostatički pritisak	[N/m ²]
P	normalizovana matrica odlučivanja	[-]
p'	težinska vrednost podkriterijuma	[-]

$P(a,b)$	funkcija preferencije	[-]
P_g	maksimalna sila pritiska leda	[KN/m]
$P_{g,d}$	sila dinamičkog pritiska ledenog sloja	[KN]
p_i	težinska vrednost kriterijuma	[-]
$p_{i,j}$	normalizovane ocene alternativnih rešenja (PROMETHEE)	[-]
Q_n	faktor, koji zavisi od ugla nagiba kosine α	[-]
R	koeficijent klase vodotoka	[-]
\mathfrak{R}	hidraulički radijus	[m]
R_w	redukциони faktor, koji zavisi od nagiba kosine α	[-]
s	relativna gustina stene	[-]
S	otpornost na smicanje	[N/m ²]
S_n	stepen meandriranja rečne trase	[-]
T	koeficijent vremenskog perioda trajanja uticaja	[-]
t	temperatura leda	[C°]
T_c	ukupna vrednost dodeljenih bodova po kriterijumima	[-]
T_g	vreme u toku koga dolazi do deformacije uklještene ledene sante	[h]
t_i	bodovi dodeljeni kriterijuma	[-]
t_{ig}	početna temperatura ledenog sloja	[C°]
V_c	brzina uniformnih nekohezivnih sedimenata	[m/s]
v_g	brzina kretanja ledenog sloja	[m/s]
W	težinska vrednost kriterijuma	[-]
w	srednja širina minor korita	[m]

w^2	površina linerane jedinice regulisanog rečnog toka	[ha]
$w_{e j}$	entopijska težinska vrednost kriterijuma	[-]
w_{inj}	integrisana težinska vrednost kriterijuma	[-]
w_{oj}	objektivna težinska vrednost kriterijuma	[-]
w_{sj}	subjektivna težinska vrednost kriterijuma	[-]
u	porni pritisak	[N/m ²]
U_{10}	brzina vetra visine 10 m iznad srednjeg nivoa vode	[m/s]
X	nominalna vrednost kriterijuma	[-]
$X_{i, j}$	ocena alternativnog rešenja	[-]
y	nagib kosine (1:y)	[-]
z	granično stanje stabilnosti obloge	[-]

Grčka slova

α	ugao nagiba kosine	[°]
β	ugao talasa u odnosu na liniju obale	[°]
γ	specifična težina vode	[N/m ³]
Δ	kvantitativna mera podataka u definisanom modelu	[-]
ΔD	relativna gustina asfaltnog sloja	[-]
Δt_g	maksimalni porast temperature ledenog sloja, u periodu od k sati	[C°]
Λ	procedna dužina	[m]
μ	bezdimezionalna funkcija	[-]

ν	kinematski viskozitet vode	[m ² /s]
V_n	brzina promene nivoa vode	[m/h]
$\pi(a, b)$	intenzitet preferencije	[-]
ρ_a	gustina obloge	[kg/m ³]
ρ_s	gustina sedimenta	[kg/m ³]
ρ_{st}	gustina stene	[kg/m ³]
ρ_{ws}	gustina vode	[kg/m ³]
σ	ukupni pritisak	[N/m ²]
σ'	efektivni pritisak	[N/m ²]
τ	tangencijalni napon	[N/m ²]
τ_{ci}	bezdimezionalni kritični tangencijalni napon	[-]
τ_{cr}	kritični tangencijalni napon	[N/m ²]
ϕ	ugao polaganja čestica	[°]
φ	ugao unutrašnjeg trenja materijala obloge	[°]
φ'	efektivan ugao unutrašnjeg trenja materijala obloge	[°]
$\Phi(a_i)$	mrežni tok alternativnog rešenja	[-]
$\Phi^+(a_i)$	pozitivan mrežni tok alternativnog rešenja	[-]
$\Phi^-(a_i)$	negativan mrežni tok alternativnog rešenja	[-]
φ_b	potencijalna energija indukovana u filteru ili gabionima	[m]

Lista skraćenica

GIPS	Indeks Globalnog Uticaja Rešenja (<i>Global Impact Parametar of the Solution</i>)
GICS	Indeks Globalnog Uticaja Konstruktivnih Rešenja (<i>Global Impact Parametar of the Constructive Solution</i>)
VAO	Višeatributivno Odlučivanje
VCO	Višeciljno Odlučivanje
VKO	Višekriterijumsko Odlučivanje
Sc.	Scenario težinskih koeficijenata kriterijuma

1 UVOD

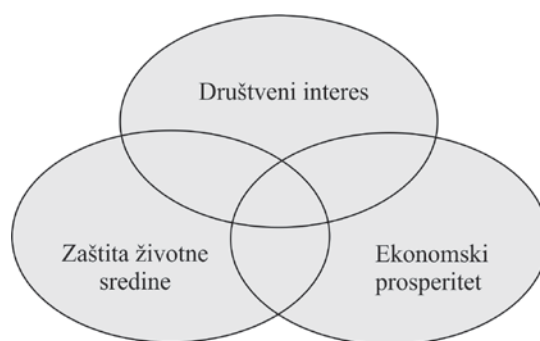
1.1 TEORIJSKI OKVIR I MOTIV ISTRAŽIVANJA

*„Mi ovu planetu nismo nasledili od naših predaka, već smo je pozajmili od naših potomaka“
Antoine de Saint-Exupéry*

U dugoj istoriji ljudske vrste na planeti Zemlji, sve do XX veka, održavana je globalna ravnoteža između prirode i čovekovih aktivnosti. Ljudi su umereno koristili prirodne resurse i pokoravali se zakonima prirode. Poslednji vek II milenijuma predstavljao je prekretnicu u tim odnosima, jer je doveo u pitanje harmoniju između ljudi i prirodnog okruženja. Fantastičan tehnološki progres i demografska eksplozija na većem delu zemljine kugle doveli su do vrlo ozbiljnih posledica. Prekomerno, nekontrolisano korišćenje prirodnih resursa značajno je ugrozilo životnu sredinu. Svi osnovni elementi sredine – zemljište, voda i vazduh, bili su izloženi intenzivnom zagađivanju i u nekim područjima sveta situacija je postala kritična za dalji opstanak ljudi. Ubrzana degradacija prirodne sredine u drugoj polovini XX veka postala je alarmantna, čime je probuđena svest o neophodnosti ponovnog uspostavljanja ravnoteže između čoveka i prirode.

Poslednja decenija prošlog veka obeležena je buđenjem ekološke svesti, implementacijom kompleksnih mera zaštite životne sredine i kreiranjem novog filozofskog pristupa korišćenju prirodnih resursa u daljem civilizacijskom razvoju. Lansirana je teorija „održivog razvoja“, čija je suština izražena čuvenom maksimumom „Mi ovu planetu nismo nasledili od naših predaka, već smo je pozajmili od naših potomaka“ [Petković, 2002].

Koncept „održivog razvoja“ podrazumeva razvoj koji zadovoljava potrebe ljudi sadašnjice, pri čemu ne dovodi u pitanje mogućnost budućih generacija da zadovolje vlastite potrebe [UNEP, 1992]. Ovaj koncept postaje poznat i prepoznat pre samo trideset godina nakon Konferencije Ujedinjenih Nacija o „Razvoju i životnoj sredini“ održanoj u Rio de Žaneiru, 1992. godine. Održivi razvoj je postao deklarisan cilj Evropske Unije 1997. godine. Juna 2006. godine, usvojena je Strategija održivog razvoja Evropske Unije.



Slika 1.1. Konceptualna trijada održivog razvoja:
ekonomski prosperitet – društveni (javni) interes - zaštita životne sredine.

Osnovni cilj ovog koncepta podrazumeva kontinualno poboljšanje života ljudi i taj cilj ne može biti postignut ukoliko društvo nije u stanju da racionalno i efikasno koristi prirodne resurse, ekološki i ekonomski potencijal, obezbeđujući neraskidivu vezu između ekonomskog prosperiteta, zaštite životne sredine i javnog interesa [UNEP, 1992].

Teorija održivog razvoja je univerzalna i odnosi se na sve segmente ljudskih aktivnosti. Međutim, ova teorija ima poseban značaj za delatnosti koje su u vezi sa vodom, kao jednom od fundamentalnih komponenti životne sredine. Voda je veoma važan prirodni resurs te je ovaj pristup od posebnog značaja za oblast vodoprivrede koja je vrlo kompleksna i obuhvata sve tri osnovne vodoprivredne kategorije – korišćenje voda, zaštitu voda i zaštitu od voda.

Konstruktivna rešenja u vodoprivredi uopšte, a posebno u izuzetno kompleksnoj problematici uređenja rečnih tokova imaju snažan i dugotrajan uticaj na ekonomiju i društvo uopšte. Klasični pristup uređenju rečnih tokova usmeren je na ispunjavanje osnovnih vodoprivrednih zahteva kao što su zaštita od poplava, zaštita priobalnih oblasti, osiguranje rečnog korita, uz stvaranje adekvatnog prostora za ekonomski razvoj. Ova rešenja mogu dovesti do degradacije životne sredine odnosno, do promene fizičko-hemijskih i strukturalnih prirodnih komponenti životne sredine, gubitka biološke različitosti i produktivnosti prirodnih i antropogenih ekosistema, uticati na ekološku ravnotežu i kvalitet života. Ovakvi negativni efekti posledica su i neadekvatnog upravljanja i korišćenja voda, kao i neodgovarajućeg urbanističkog planiranja uopšte [Marković, 2012].

S obzirom na ogromnu rasprostranjenost u prirodi, rečni tokovi imaju fundamentalni značaj za životnu sredinu. Hidrološki potencijal rečnih slivova i hidraulički kapacitet rečnih tokova uslovljavaju snabdevanje vodom velikih područja, obuhvaćenih hidrografskom mrežom i time omogućavaju opstanak živog sveta na tim prostorima. U prirodnom stanju slivova i vodotoka, stvoreni su uslovi za razvoj specifičnih akvatičnih i priobalnih ekosistema, koji se odlikuju velikim biodiverzitetom. Otuda je od velike važnosti da se u pristupu vodoprivrednim aktivnostima u rečnim slivovima i na rečnim tokovima vodi računa o tim ekosistemima i o uslovima njihovog opstanka [Petković, 2002].

Veza između vodoprivrede i ekologije je neraskidiva. Vodoprivredno planiranje mora biti zasnovano na „*informisanom odlučivanju*“. Informacije moraju imati tri dimenzije: ekonomsku, ekološku i socijalnu i kao takve treba da definišu indikatore održivosti [Harmancioglu, 2008]. Održivo upravljanje vodama u ruralnim oblastima zemalja u razvoju, kroz društveno-ekonomske aspekte, može biti realizovano poboljšanjem uslova plovidbe na rekama, ublažavanjem poplava korišćenjem tradicionalnih saznanja, a u cilju smanjenja sukoba ekoloških interesnih grupa [Tamuno et al., 2009].

Vodna infrastruktura može strateški biti razvijena i poboljšana u određenim oblastima da bi se postigao dobar kvalitet života, ekonomska konkurentnost i sačuvala životna sredina [Fischer et al., 2011].

Da bi se postigla politika održivog razvoja vodnih resursa, neophodna je primena specifičnih metoda upravljanja vodnim resursima. Ove metode definišu pravila dugoročnog upravljanja rečnim ekosistemima, integrišući sva ograničenja održavanja ekoloških funkcija hidro sistema.

Integrirano upravljanje rekama mora obezbediti socijalnu, ekonomsku ravnotežu i ravnotežu ekosistema [Marković, 2012].

1.2 PREDMET I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Osnovni cilj ove doktorske teze jeste definisanje novog pristupa selekciji hidrotehničkih konstrukcija za regulisanje rečnog toka primenom metoda višekriterijumske analize (VKA), koji bi osim postizanja osnovnih ciljeva regulisanja rečnih tokova (zaštita od poplava, zaštita priobalnih oblasti, osiguranje rečnog korita, stvaranja prostora za ekonomske aktivnosti) omogućio i ekološki razvoj reka u skladu sa zahtevima koncepta „održivog razvoja“.

Predmet i ciljevi istraživanja su sledeći:

1. Analiza dosadašnjih naučnih saznanja i pravaca istraživanja u oblasti uređenja rečnih tokova

- Analiza ponašanja konstrukcija za uređenje rečnih tokova kroz vreme, evidentiranje razlika klasičnih betonskih konstruktivnih rešenja u odnosu na elastična i deformabilna rešenja od geotekstila.

2. Procena ekološkog uticaja različitih konstruktivnih rešenja za uređenje rečnih tokova

- Definisanje ekoloških uticaja konstruktivnih rešenja uređenja rečnih tokova.
- Klasifikacija uticaja.
- Pregled uticaja hidrauličkih i konstruktivnih rešenja na morfologiju rečnog toka.
- Utvrđivanje globalnih indikatora uticaja.
- Praćenje indikatora uticaja u odnosu na reljef, prirodne uslove, biljni i životinjski svet.

3. Analiza rešenja korišćenjem metode višekriterijumskog odlučivanja

- Izbor rešenja primenom metode višekriterijumskog odlučivanja.
- Pregled uslova neophodnih za uređenje rečnog korita.
- Utvrđivanje kriterijuma odlučivanja.
- Valorizacija i klasifikacija težinskih vrednosti kriterijuma.
- Definisanje varijanti prema kriterijumima.
- Postupak izbora varijanti.

4. Pregled zaključaka i preporuka

- Definisanje uslova neophodnih za racionalno rešavanje problema uticaja hidrotehničkih konstrukcija na životnu sredinu.
- Preporuke za projektovanje, dobijanje saglasnosti i izvođenje inženjerskih radova.

1.3 ISTORIJSKI KONTEKST METODE VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA

U poslednjih 25 godina, pomoćni pristup donošenju odluka pod nazivom višekriterijumska analiza, ima sve veću ulogu i značaj. Ovaj pristup inicira razvoj klasične optimizacione paradigme u operacionim istraživanjima. Veliki uspeh VKA danas, ispoljava se velikim brojem teorijskih i praktičnih radova, objavljenih u naučnim časopisima koji se bave operacionim istraživanjima i naukom odlučivanja i u velikom broju predstavljenih na naučnim skupovima.

Kao što joj naziv govori, VKA ima za cilj da obezbedi donosiocima odluka alate kako bi se omogućilo naprednije rešavanje problema odlučivanja, gde nekoliko često sukobljenih tačaka gledišta mora biti uzeto u obzir [Pardalos et al., 1995].

Sve veća kompleksnost ekonomskog, tehnološkog i poslovnog okruženja doprinela je nastanku i razvoju VKA kao važne oblasti operacionih istraživanja i nauke o upravljanju.

Ova oblast ima jako dugu istoriju, koja se može pratiti unazad do radova Jean - Charles de Bord-a i Marquis de Condorcet-a, krajem 18. veka. Samo jedan vek, nakon ovih radova, Vilfredo Pareto uvodi koncept preferencije, fundamentalnu u savremenoj teoriji VKA, koja je kasnije proširena [Koopmans, 1951]. Tokom 40-ih i 50-ih [Neumann et al., 1944; Savage, 1954] uvedena je teorija korisnosti u normativnom donošenju odluka, koja postavlja osnov višeatributivne teorije korisnosti/vrednosti, jedne od glavnih metodoloških pravaca VKA. Ovi pionirski radovi inspirisali su nekolicinu istraživača tokom 60-ih godina prošlog veka. Klasična teorija matematičkog programiranja proširena je uvođenjem tzv. objektno orjentisanog programiranja. Krajem 60-ih godina, VKA, izazvala je interesovanje naučnih evropskih struktura okrenutih ka razvoju oblasti operacionih istraživanja [Charnes et al., 1961]. Roy, jedan od pionira u ovoj oblasti, uvodi novi pristup korelacija „višeg ranga“ i smatra se osnivačem evropske škole VKA [Roy, 1968].

Zadnjih godina, VKA je nastavila svoj razvoj kroz:

- teorijski razvoj novih tehnika i karakterizaciju postojećih modela odlučivanja,
- primenu metoda VKA u integrisanom sistemu podrške donošenju odluka,
- inovativne aplikacije u novim oblastima, uključujući između ostalih menadžment, ekonomiju, finansije, energetska planiranje, planiranje životne okoline, telekomunikaciju, saobraćaj itd.,
- ispitivanje interakcija sa ostalim disciplinama kao što su veštačka inteligencija (*artificial intelligence*), genetički algoritam (*evolutionary computation*), teorija fazi skupova (*fuzzy sets theory*) i „meko“ računarstvo (*soft computing*) [Pardalos et al., 2010].

VKA nije alat za obezbeđivanje „idealnog“ rešenja u problemu odlučivanja, obzirom da takvog rešenja nema. Obezbeđeno rešenje, može se smatrati najboljim ponuđenim samo za interesne strane, koje su dale procenu rešenja u formi težinskih kriterijuma, dok procene rešenja ostalih interesnih grupa mogu dati prednost nekom drugom alternativnom rešenju. Umesto toga, VKA predstavlja pomoć pri odlučivanju, tako što interesnim stranama pomaže u sistematizaciji

dostupnih informacija, odnosno posledica, pri ispitivanju sopstvenih zahteva i nivoa tolerancije i smanjuju rizik razočarenja u donete odluke [Belton et al., 2002].

Jedna karakteristična definicija VKA, predstavljena je: „...*terminom kišobrana, čime se opisuju skupovi formalnih pristupa koji podrazumevaju eksplicitno uključivanje više kriterijuma u pružanju pomoći pojedincima ili grupama pri ispitivanju odluka koje su od važnosti ...*“ [Belton et al., 2002]. Takodje je važno spomenuti jedno napredno tumačenje VKA: „... *u praksi, VKA ima primenu u pružanju pomoći donosiocima odluka prilikom razvijanja koherentnih tokova preferencija. Drugim rečima, koherentne preferencije nisu polazna pretpostavka, ali ovaj i ovakav pristup pomaže pojedincima i grupama u ostvarivanju razumno doslednih postavki u okviru problema koji je pred njima...*“ [Dodgson et al., 2000].

Prethodna konstatacija ukazuje da VKA nije samo okvir uključivanja postojećih preferencija u proces odlučivanja višekriterijumskom analizom, već predstavlja i alat koji pomaže donosiocima odluka prilikom zauzimanja stava o tome šta je zaista važno u specifičnom problemu odlučivanja [Mendoza et al., 2006]. Višestruke VKA metode dostupne su i pogodne za širok spektar situacija odlučivanja. Osim toga, nekoliko tehnika težinskih kriterijuma razvijeno je u cilju podizanja svesti pojedinaca uključenih u proces odlučivanja.

VKA ima široku primenu u izboru najbolje varijante u konačnom skupu varijantnih rešenja u odnosu na veći broj, obično oprečnih kriterijuma (atributa). Svaki od kriterijuma, vezan je za određeni cilj, u definisanom kontekstu odlučivanja. Metode VKA koje kardinalno generišu preferenciju (prednost) varijantnih rešenja zahtevaju od strane donosioca odluka pružanje informacija na određeni način, i to:

- relativni značaj (težine) kriterijuma u odnosu na ciljeve problema odlučivanja i
- ocene efikasnosti varijanti u odnosu na svaki kriterijum pojedinačno [Keeney et al., 1976; Hwang et al., 1979; Zeleny, 1982; Colson et al., 1989; Chen et al., 1992; Vincke, 1992].

Osnovni elementi u problematici VKA su svakako skupovi varijantnih rešenja i skupovi kriterijuma po kojima ove aktivnosti moraju biti ocenjene. Ipak, postoji određeni broj strukturalnih i eksternih karakteristika ovih osnovnih elemenata koje izlaze iz okvira mogućeg aritmetičkog definisanja. Veći broj pristupa dostupan je i može pomoći prilazu ovim karakteristikama na konzistentan i sistematičan način [Belton et al., 2002].

U opštem smislu, primena VKA je imperativno organizovana na sledeći način:

- ciljevi moraju biti izraženi mernim promenljivim – ne smeju biti suvišni, ali mogu biti alternativni,
- kada su „vektorske mete“ jednom formirane, pronalazi se tehnika agregiranja informacija u cilju definisanja izbora; što se ciljeva tiče, moraju biti usvojene težine koje izražavaju relativni značaj – preferenciju,
- definisanje kriterijuma ocenjivanja – kriterijumi moraju biti okrenuti prioritetima praćenim različitim uključenim subjektima ili određenim aspektima procene,

- analiza uticaja – ova aktivnost se razmatra za svaki od izabranih kriterijuma, pa efekti i rezultati koje ima mogu biti kvantitativni ili kvalitativni,
- procena efekata investicija u izabranim kriterijumima,
- identifikacija tipova subjekata uključenih u investicije i prikupljanje preferencija (težina) dodeljenih raznim kriterijumima,
- agregacija ocena kriterijuma na osnovu otkrivenih preferencija - svaka ocena može biti agregirana davanjem svakom numeričke ocene investicija, uporedive sa drugim sličnim investicijama [Aşchilean, 2011].

Upravljanje prirodnim resursima predstavlja veliki izazovni zadatak obzirom da postoji veliki broj različitih faktora koji mogu ometati ovaj proces. Da bi se obezbedilo održivo korišćenje prirodnih resursa, ekološki, ekonomski i društveni aspekti moraju biti uravnoteženi. Problem nije samo pronalaženje pravog balansa, već i činjenica da mnogo različitih pojedinaca i organizacija uključenih u proces imaju sasvim različite prioritete [Hostmann, 2005]. Odluke donete u projektima upravljanja životnom sredinom su često jedinstvene i vezane za ozbiljne nepovratne posledice. Sve ovo, predstavlja osnovni razlog zbog koga proces odlučivanja u projektima upravljanja životnom sredinom ima centralnu ulogu [Marković, 2011].

Veliki broj metoda VKA korišćeno je u različitim studijama iz oblasti upravljanja vodnim resursima [Raju, Pillai, 1999; Mahmoud et al., 2000; Raju, Kumar, 1999]. Metode VKA dobile su značajnu primenu u problemima u ovoj oblasti, obzirom na njihovu sposobnost procene različitih alternativnih scenarija u cilju izbora najboljih rešenja, a koja mogu biti zatim dodatno detaljno analizirana pre finalne implementacije.

Brojne tehnike VKA razvijene su da bi kao alat pomogle donosiocima odluka [Figueira et al., 2005]. Sveobuhvatna analiza primene VKA u specifičnoj oblasti upravljanja vodnim resursima data je u studiji objavljenoj 2007. godine, u kojoj je dat pregled 113 publikovanih studija iz oblasti upravljanja vodama u 34 države sveta. U ovoj studiji, razmatrana je primena 61 jedinstvene tehnike VKA, kao i različiti načini primene tehnike VKA u upravljanju vodnim resursima [Hajwkowicz et al., 2007].

Nekolicina drugih istraživača sprovedo je komparativnu studiju primene VKA u upravljanju vodnim resursima i dobijeni rezultati ukazuju da je u većini studija primenjena više od jedne metode VKA, a u cilju ispitivanja osetljivosti dobijenih rezultata [Flug et al., 2000; Joubert et al., 2003; Hyde et al., 2005].

Ove komparativne studije uključuju primenu brojnih tehnika VKA na jednom problemu, a zatim uporednu analizu rezultata rangiranja odnosno ocenjivanja mogućih odluka. Osim toga, ove studije često ukazuju na to da su različite metode VKA tesno povezane i da ne postoji jasna metodološka prednost bilo koje od tehnika [Hermans et al., 2007; Opricović et al., 2007].

Analitičari koji primenjuju VKA analizu u oblasti upravljanja vodnim resursima, suočeni su sa teškim izazovom odlučivanja izbora metode ili kombinacija metoda koji najbolje odgovaraju problemu sa kojim se suočavaju [Hajwkowicz et al., 2007].

Metode VKA su vrlo često podeljene u četiri grupe: višeciljna optimizacija, tehnike višekriterijumskog vrednovanja, metode višeg ranga, metode disagregacije [Opricović et al., 2007].

1.4 METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

U radu je definisan indikator prognoze ekološkog uticaja opšteg i konstruktivnog rešenja uređenja rečnog toka na životnu sredinu uključujući uticaj dužine deonice na kojoj se izvode radovi, intenzitet i trajanje uticaja, a primenom matematičke jednačine. Indikatori omogućavaju klasifikaciju varijantnih rešenja prema ozbiljnosti predviđenih uticaja. Njihova primena može biti usmerena u pravcu prilagođavanja projektantskog rešenja ka ekološki prihvatljivom rešenju.

Od mnogih poznatih i često primenjivanih metoda VKA, u radu su izabrane i primenjene dve metode i to:

- Metoda ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant Real*), pojednostavljena, koja potiče i razvijena je od strane francuske škole VKA i
- Metoda PROMETHEE-GAIA (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations - Graphical Analysis for Interactive Assistance*).

Ove heurističke metode primenjuju se kao pomoć prilikom donošenja složenih odluka, a u relativno kratkom vremenskom intervalu. Primena ovih metoda omogućava dobijanje odgovarajućeg rešenja sa traženom verovatnoćom pri čemu varijante mogu biti svedene na zajedničku konvencijalnu jedinicu mere pod nazivom „*težinski koeficijenti*“.

Ove metode pružaju mogućnost poređenja usvojenih kriterijuma rangiranja, različitih jedinica mere.

Definisanje metodologije analize nekoliko varijantnih rešenja, koje se međusobno znatno razlikuju sa aspekta zaštite životne sredine pri čemu je samo jedno od rešenja usmereno ka korišćenju prirodnih materijala, za „*naturalna rešenja uređenja vodotoka*“. Komparativna analiza projekta i konstruktivnog rešenja varijantnih rešenja primenom „*indeksa artificialnosti*“, koji se naziva česti i „*indeks globalnog uticaja – GI*“.

1.5 SADRŽAJNA STRUKTURA DOKTORSKE TEZE

Osnovnu sadržajnu strukturu doktorske teze čine osnovne i dopunske tematske celine, koje usmeravaju razradu teme disertacije od analize opšte-teorijskog sadržaja i dosadašnjih naučnih saznanja ka konkretnom i aplikativnom.

Istraživanja koja su izvedena u okviru ovog rada prikazana su u narednim poglavljima:

Poglavlje 2: Opis karakterističnih radova na uređenju rečnog toka, na osnovu topografije terena, ciljeva uređenja rečnih tokova i priobalja i karakteristika regulacionih radova.

Poglavlje 3: Analiza najznačajnijih sila koje imaju snažan uticaj na stabilnost obala reka. To su pre svega: hidrodinamika rečnog toka (uticaj tangencijalnog napona na oblogu kosina), hidrodinamika podzemnih voda (infiltraciona strujanja koja su izuzetno opasna u slučajevima naglog spuštanja nivoa vode u reci), uticaj talasa (izazvanih vetrom ili kretanjem broda) i uticaj leda (statičko opterećenje, dinamičko opterećenje i opterećenje leda zalepljenog za oblogu).

Poglavlje 4: Opis opštih kondicionih uslova pri uređenju rečnog toka, a to su: karakteristike morfologije rečnog korita, uticaj regulacionih radova na životnu sredinu, rangiranje radova i konstruktivnih rešenja prema intenzitetu uticaja na životnu sredinu.

Poglavlje 5: Predstavljanje metodologije procene uticaja konstruktivnih rešenja na životnu sredinu preko „indeksa globalnog uticaja GI“. Ovaj indeks uslovljen je ekološkom cenom rešenja i to: karakteristikama deonice reke na kojoj se izvode regulacioni radovi, klasom reke, intenzitetom agresivnosti radova kojima je izmenjena morfologija rečnog toka i vekom trajanja konstrukcije.

Poglavlje 6: Primena dve metode višekriterijumskog odlučivanja: metoda ELECTRE i metoda PROMETHEE-GAIA, pri čemu su kriterijumi karakterizacije i klasifikacije različitih varijantnih rešenja kompatibilni sa konceptom održivog razvoja, pre svega projektovanja i izvođenja objekata (kriterijumi su kompatibilni u konkretnom slučaju, sa karakteristikama deonice rečnog toka, ekološkim uslovima, tipom projektantskog rešenja i time dominantnim oblicima zagađenja). Metode su primenjene na jednom reprezentativnom primeru deonice rečnog toka.

Poglavlje 7: Primeri dobre prakse projektovanih i izvedenih konstruktivnih rešenja uređenja rečnih tokova u Republici Srbiji.

Poglavlje 8: Zaključna razmatranja, značaj i aktuelnost istraživanja, naučni doprinos doktorske teze, preporuke za dalja istraživanja.

2 VRSTE REGULACIONIH RADOVA NA UREĐENJU REČNIH TOKOVA

2.1 OSNOVNI PRINCIPI EMPIRIJSKIH KONSTRUKTIVNIH REŠENJA

Radovi na uređenju vodotoka, izvode se od davnina. Osnovni principi projektovanja, razvijeni su na osnovu dugogodišnjeg iskustva i tokom vremena zahtevi i kriterijumi ocenjivanja izbora rešenja su se gotovo konstantno menjali.

Prilikom donošenja odluka izbora konstrukcije za regulisanje reka, pored veličine opterećenja kome su konstrukcije izložene treba uzeti u obzir i druge kriterijume:

- period korišćenja konstrukcije (životni vek konstrukcije),
- izabranu tehnologiju izvođenja radova,
- režim proticaja i/ili nivoa vode u rečnom koritu,
- uslove u kojima se izvode radovi (unutar ili van rečnog korita),
- tržišnu cenu ugrađenih materijala,
- kompatibilnost rešenja sa ekološkim uslovima (posebno florom i faunom).

U savremenim uslovima današnjice, niz opštih principa projektovanja, a između ostalih, i niz principa projektovanja konstrukcija u rečnom koritu je opšteprihvaćen.

Prema ovim principima osnovni principi izbora projektantskog i konstruktivnog rešenja uređenja rečnog toka su sledeći. Konstrukcija mora zadovoljiti sledeće uslove, odnosno mora biti:

- plastična (elastična), odnosno prilagodljiva neujednačenim i velikim deformacijama u fundamentu,
- projektovana u skladu sa činjenicom da će tokom eksploatacije (životnog veka) neminovno pretrpeti određena oštećenja,
- projektovana uz uslov da slobodni rečni tok ne sme biti ometen, imperativno poplavni talas, kretanje leda i drugih plivajućih tela,
- uklještena uzvodno i nizvodno da bi se unapred sprečilo oštećenje usled napredovanja erozije ispod tela konstrukcije,
- projektovana u skladu sa uslovima zaštite životne sredine i ekosistema (očuvanje biljnih i životinjskih staništa i određenog kvaliteta vode).

Da bi se obezbedilo očuvanje ekosistema u oblasti gde se izvode konstrukcije, projekat mora obezbediti mogućnost kolonizacije biljaka i životinja. Ako su projektom predviđene forme i elementi koji obezbeđuju unapređenje očuvanja ekosistema, onda je projekat opravdan.

Imajući u vidu topografsku različitost i posebnost ekosistema neophodno je da se sveobuhvatno definišu kategorije (klase) konstrukcija, koje bi obavljale svoju funkciju i pri tome obezbedile neraskidivu vezu sa životnom okolinom.

2.2 VRSTE REGULACIONIH RADOVA PREMA TIPU RELJEFA

U planinskim oblastima rečni tokovi se karakterišu velikim padom, čestom pojavom teških erozija, velikom energijom rečnog toka, velikom količinom krupnog nanosa.

Zbog toga su regulacioni radovi najčešće usmereni ka smanjenju gradijenta tečenja, zaštiti od erozija, formiranju dna korita reke i redukciji transporta nanosa (slika 2.1).



Slika 2.1. Uređenje rečnih tokova u planinskim oblastima

U visoravnima, prisustvo nanosa doprinosi stabilizaciji rečnog korita. Nanosom se može upravljati izgradnjom nasipa, paralelnih građevina i napera (slika 2.2).



Slika 2.2. Uređenje rečnih tokova u visoravnima

U ravničarskim područjima zaštitni regulacioni radovi mogu biti izvedeni izgradnjom nasipa, napera i uređenjem korita reka (slika 2.3).



Slika 2.3. Uređenje rečnih tokova u ravničarskim oblastima

2.3 VRSTE REGULACIONIH RADOVA PREMA CILJU UREĐENJA

Vodoprivredni ciljevi uređenja rečnih tokova su dobro poznati: zaštita od poplava, zaštita obala, zaštita dna korita, stvaranje prostora za ekonomske aktivnosti, rehabilitacija i ekološka rekonstrukcija korita.

2.3.1 Regulacioni radovi u cilju zaštite od poplava

Regulacioni radovi u cilju zaštite od poplava podrazumevaju izgradnju zaštitnih nasipa. Izgradnjom nasipa ne smanjuje se maksimalni očekivani proticaj, ali se utiče na smanjenje biodiverziteta.

Rizik od poplava se bitno razlikuje u pojedinim delovima rečne doline. Nezaštićeni delovi, koje uvek plave velike vode, nazivaju se realne plavne zone. Ovakve su površine prisutne uglavnom u dolinama manjih vodotoka, bez izgrađenih zaštitnih sistema, koje se mogu podeliti na dva bitno različita dela: zonu protočne inundacije i zonu neprotočne (retenzione) inundacije [Marković, Đurđanović, 2012].

Savremeni koncept uređenja rečnih tokova po nazivom „više prostora za reku“ („*room for the rivers*“), podrazumeva usklađivanje socijalnih i ekonomskih ciljeva uređenja (kao što su snabdevanje vodom, odbrana od poplava i dr.) sa strogim zahtevima zaštite životne sredine. U tom smislu neophodno je obezbediti kontinuitet rečnog toka i neraskidivu vezu reke sa inundacijom čime se obezbeđuje očuvanje biljnih i životinjskih staništa („*wetlands*“), ublažavanje poplavnog talasa i zadržavanje hranljivih materija (nutrijenata).

2.3.2 Regulacioni radovi u cilju obezbeđenja stabilnosti rečnih obala

Regulacioni radovi u cilju obezbeđenja stabilnosti rečnih obala podrazumevaju primenu različitih regulacionih mera: ugradnju različitih tipova obloga, gabiona, pletera, kamenog nabačaja, jarmova, napera i td.

Zaštitni radovi podrazumevaju radove za osiguranju obale minor korita ili major korita od destruktivnog dejstva:

- tangencijalnih napona nastalih strujanjem vode u rečnom koritu,
- leda,
- drugih čvrstih plivajućih tela,
- spirajućih atmosferskih voda.

Gornji deo rečne obale nalazi se iznad srednjeg višegodišnjeg nivoa vode u reci. Ova zona, izložena je snažnom dejstvu talasa, spirajućim atmosferskim vodama, promeni atmosferskih uslova, hidrodinamičkim uticajima podzemnih voda nastalih infiltracijom površinskih voda usled naglog pada nivoa vode u rečnom koritu. Zaštitni radovi gornje zone rečnog korita, razlikuju se za nisku i visoku obalu (slika 2.4).

Srednji deo rečne obale nalazi se između minimalnog i srednjeg višegodišnjeg nivoa vode u reci i trpi jaka opterećenja usled dejstva talasa (nastalih dejstvom vetra ili kretanjem plovniha objekata), hidrodinamičkih uticaja podzemnih voda, filtracionih strujanja i leda usled čega se ova zona štiti različitim tipovima obloge.

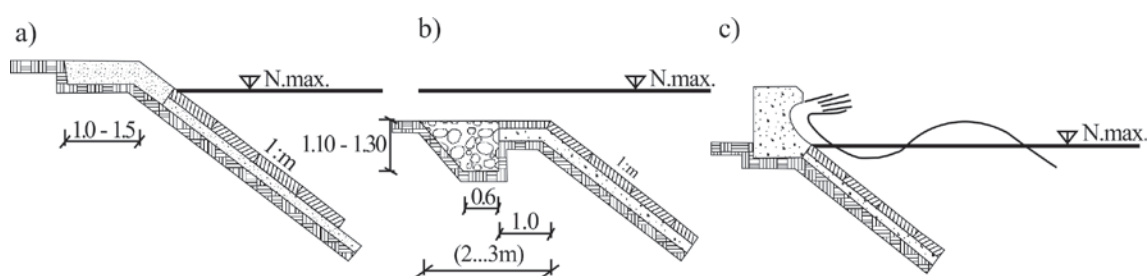
Donji deo rečne obale, nalazi se ispod minimalnog nivoa vode u reci i uglavnom je pod uticajem tangencijalnih napona nastalih strujanjem vode u rečnom koritu.

Zaštitni radovi zavise pre svega od narednih činilaca:

- intenziteta tangencijalnih napona strujanja vode u rečnom koritu,
- veličine mogućih deformacija dna rečnog korita,
- tehnologije izvođenja regulacionih i zaštitnih radova,
- korišćenih materijala (slika 2.5).

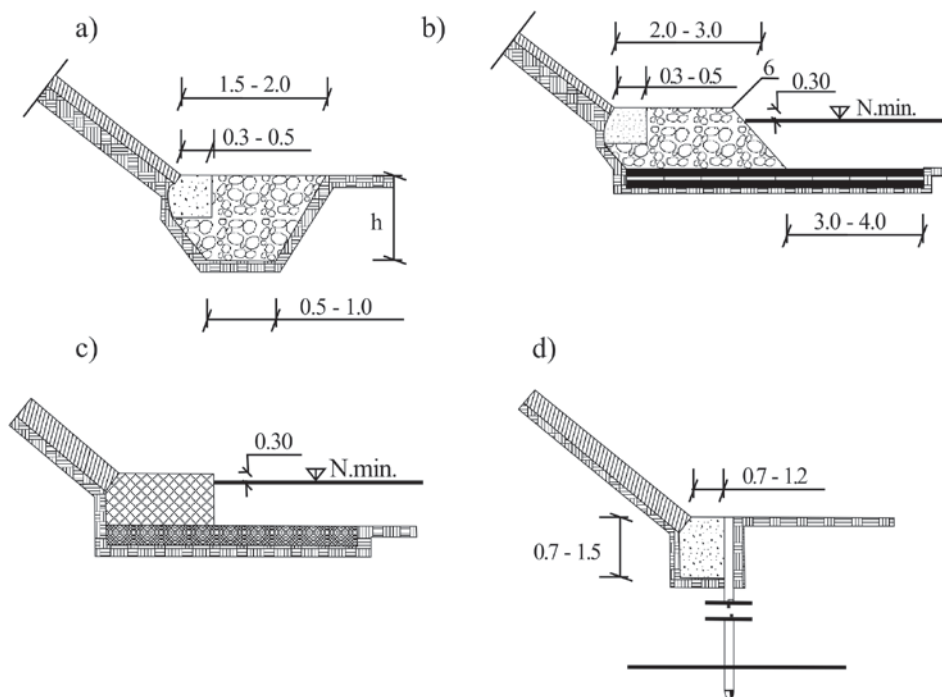
2.3.3 Regulacioni radovi u cilju osiguranja rečnog korita

Regulacioni radovi u cilju osiguranja rečnog korita realizuju se, po pravilu, madracima (od fašina, gabiona itd.), pragovima, kamenim nabačajem, ređe radovima u betonu.



Slika 2.4. Zaštita gornjeg dela rečne obale:

a – visoka obala; b i c – niska obala.



Slika 2.5. Zaštita donjeg dela rečne obale:

a, d - korito reke je stabilno, izvođenje zaštitnih radova se izvodi na suvom;
b, c - korito je izuzetno nestabilno, zaštitni radovi izvode se u rečnom toku bez zagata.

2.3.4 Regulacioni radovi u cilju otvaranja prostora za ekonomske aktivnosti

Regulacioni radovi u cilju otvaranja prostora za ekonomske aktivnosti podrazumevaju pripremu površina ispunom od lokalnog materijala, izgradnju objekata za zaštitu od voda (nasipa, regulacionih građevina).

2.3.5 Regulacioni radovi u cilju renaturalizacije rečnih tokova

Regulacioni radovi u cilju renaturalizacije rečnih tokova imaju za osnovni cilj stvaranje „više prostora za reku“ („room for the rivers“) rušenjem krutih konstrukcija i zamenom postojećih regulacionih konstrukcija izvedenih od veštačkih materijala, konstrukcijama izvedenim od prirodnih materijala, pokrivanje pojedinih delova konstrukcije vegetacijom, smanjenjem meandriranja rečne trase, proširenjem ili suženjem rečnog korita (ukoliko se stvori potreba za takvom vrstom intervencija) itd.

Najvažniji ciljevi radova na renaturalizaciji rečnih tokova su:

- formiranje kontinualnog rečnog toka koji omogućava diversifikaciju biljnih i životinjskih vrsta, ali i otvara prostor za rekreativne i kulturne aktivnosti stanovništva u rečnoj dolini,
- stabilizacija toka u rečnom koritu vegetacijom koja je prilagodljiva čestim promenama proticaja,
- unapređenje morfologije i biološke strukture reke radi obezbeđenja remedijacije životne sredine.

2.4 VRSTE I KARAKTERISTIKE REGULACIONIH RADOVA PREMA NJIHOVOM OBIMU

2.4.1 Klasični regulacioni radovi

Klasični regulacioni radovi (redovno održavanje, sanacija i izgradnja novih konstrukcija) po pravilu podrazumevaju izgradnju propusnih tj. filtracionih konstrukcija projektovanih su u cilju povećanja hrapavosti rečnog korita i promene raspodele brzina i proticaja i imaju za cilj zadržavanje vučenog nanosa u aluvijalnim vodotocima. Ovi regulacioni radovi, izvode se prvenstveno na rekama koje imaju malu brzinu tečenja i na delovima rečnog toka gde u vreme poplava voda nanosi veliku količinu fluvijalnog nanosa.

2.4.2 Kompleksni regulacioni radovi

Kompleksni regulacioni radovi podrazumevaju izgradnju masivnih regulacionih građevina u rečnom toku koje moraju biti otporne na uticaje i opterećenja kojima su izložene i moraju imati dug životni vek. Uobičajena je praksa da se ove i ovakve konstrukcije izvode od kamena, betona, madraca od fašina i zemljanih materijala.

Prilikom izvođenja ovih konstrukcija ugrađuje se jedan, najčešće dva, tri ili više materijala koji su gore navedeni.

Ovakve masivne konstrukcije moraju biti izgrađene na elastičnim fundamentima koji mogu da se prilagode potencijalnom ispiranju materijala u rečnom koritu. Za izgradnju fundamenta ovakvih konstrukcija, koriste se madraci od vrbovog pruća, slojevi pruća koji su kočnicama pričvršćeni za dno, otežane fašine i madraci od gabiona.

U ovu kategoriju radova spadaju: naperi, podužni nasipi (za usmeravanje rečnog toka), traverze (za zatvaranje sekundarnih rukavaca) i pragovi i kaskade. Struktura i dimenzije konstrukcija za uređenje korita reke zavise i od tehnologije izvođenja. Zaštita obala može da ima i različita rešenja u zavisnosti od tehnologije izvođenja.

Za kompletnu ocenu projekta neophodno je razmotriti ekološki pritisak radova na sredinu gde se radovi izvode. Izvođenje konstrukcija izaziva najveće moguće poremećaje na ekosistemima pa čak i uništenje mikro-habitata na dnu reke. Program i tehnologija izvođenja, kao i trajanje određuju uticaj na ekosistem.

Ne može se računati na činjenicu da će priroda popraviti ili vratiti prirodne uslove koji su ranije postojali. Ovaj proces zavisi od stepena promene hidraulike i dinamike tečenja.

2.5 VRSTE REGULACIONIH RADOVA PREMA TIPU INTERVENCIJE

2.5.1 Promena trase vodotoka (presecanje krivina)

Rekonstrukcija trase u osnovi (presecanje krivina), radovi su koji se veoma često izvode i odnose se na presecanje krivina, pre svega iz ekonomskih razloga (korišćenje i promena namene površina koje pripadaju koritu reke), imaju izrazito snažne uticaje na morfologiju i ekološki status voda. Upporedna analiza karakteristika prirodnog rečnog toka i uređenog rečnog toka presecanjem krivina omogućuje prepoznavanje ovakvih uticaja.

2.5.2 Rektifikacija geometrije prirodne trase vodotoka

Rektifikacija geometrije postojeće rečne trase (promena pada, produbljivanje rečnog korita) zahteva pored obimnih zemljanih radova i radove na stabilizaciji novog rečnog korita. Najčešće se kao rešenja koriste poprečni pragovi (čija je visina ispod nivoa malih voda).

2.5.3 Stabilizacija rečnog korita i/ili obala u horizontalnom pravcu

Stabilizacija rečnog korita i/ili obala u horizontalnom pravcu postiže se izgradnjom nasipa (za usmeravanje toka), zaštitom obala, drvenim kasetama (jarmovima) ispunjenim kamenom, a nekada i naperima.

2.5.4 Stabilizacija rečnog korita i/ili obala u vertikalnom pravcu

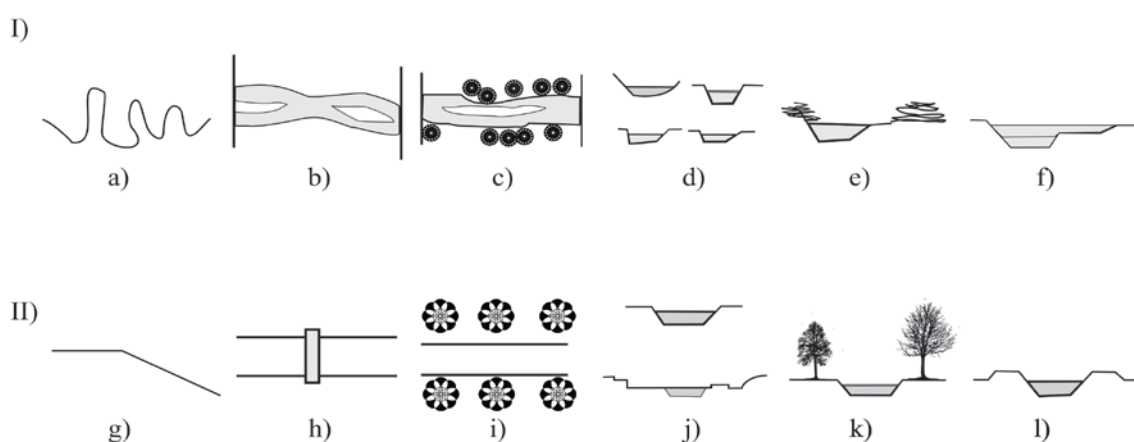
Stabilizacija rečnog korita i/ili obala u vertikalnom pravcu postiže se po pravilu pomoću pragova, potpornih zidova (različitih konstruktivnih rešenja) ili drugim kompleksnijim konstrukcijama trajnog karaktera.

2.5.5 Skretanje rečnog toka

Skretanje rečnog toka novom trasom podrazumeva iskop kanala za novo rečno korito i zatvaranje postojećeg rečnog toka podvodnim pregradama (od kamenog nabačaja, visine do nivoa malih voda) ili traverzama.

2.5.6 Proširenje rečnog korita

Proširenje rečnog korita podrazumeva iskop u postojećim obalama i osiguranje novih obala što po pravilu dovodi do smanjenja dubine vode, sa efektima pregrevanja vode leti u rečnom koritu i zamrzavanja rečnog toka (do samog dna) zimi, čime se ozbiljno ugrožava postojeći ekosistem.



Slika 2.6. I – prirodno rečno korito (a, b, c, d, e, f),

II – regulisano rečno korito (g, h, i, j, k, l):

a - sinusoidni rečni tok; b - morfološka različitost rečnog toka, meandriranja; c - obalni pejzaž, različite forme rečne flore; d - prikaz promena poprečnog preseka; e - biološka različitost; f - inundacija; g - regulisani (ispravljeni) rečni tok; h - jednoličan rečni tok; i - jednoličan obalni pejzaž; j - regulisano korito; k - ekološka uniformnost; l - nestanak vlažnih zona.

2.5.7 Kanalisiranje rečnog korita

Kanalisiranje rečnog korita predstavlja ekstremnu formu denaturalizacije rečnog korita i ne treba je primenjivati sem u posebnim slučajevima i na kratkim deonicama, obzirom da je praćena jakim i nepovratnim promenama ekosistema.

Kanalisiranje se praktikuje pri projektovanju i izvođenju brzotoka hidrocentrala koje se nalaze u rečnom koritu.

3 OPTEREĆENJA REČNOG KORITA KOJA USLOVLJAVAJU ZAŠTITNE REGULACIONE MERE

3.1 HIDRODINAMIČKO OPTEREĆENJE STRUJANJA REČNOG TOKA

Parametar koji se često koristi za merenje potencijala toka u smislu pokretanja materijala sa rečnog dna, je tangencijalni napon koji nastaje delovanjem toka reke na materijal u rečnom toku. Tangencijalni napon deluje u pravcu toka duž rečnog dna i obala.

Za pokretanje nanosa u kanalu potreban je kritični tangencijalni napon. Kada je tangencijalni napon jednak kritičnom naponu, rečno korito će biti u ravnoteži. Kada je tangencijalni napon izuzetno veći od kritičnog tangencijalni napona, dolazi do spiranja rečnog dna. Kada je tangencijalni napon manji od kritičnog, javlja se zasipanje rečnog dna.

Dakle, računanje ili merenje tangencijalnog i kritičnog tangencijalnog napona je krucijalno za razumevanje potencijala prirodnog adaptiranja rečnog korita.

3.1.1 Proračun tangencijalnog napona

Nažalost, računanje ili merenje tangencijalnog napona u planinskim rekama je složeno zbog velike hrapavosti rečnog korita, turbulentnog tečenja i fluktacije brzina [Wohl, 2000]. Turbulentno tečenje može dovesti do promena brzine tečenja i tangencijalnog napona u tački, tokom konstantnog protoka.

Heterogenost rečnog dna izazvana nanosom i različitim formama rečnog dna može stvoriti značajne promene brzine i tangencijalnog napona poprečno ili duž rečnog toka pri konstantnom protoku. Uprkos tome, ukoliko postoji mogućnost, merenje opšteg tangencijalnog napona je vrlo korisno [Wohl, 2000]. Na osnovu relevantnih fizičkih karakteristika, razvijene su sledeće teorijske jednačine za opšti tangencijalni napon:

$$\tau = \gamma \cdot \mathfrak{R} \cdot J \quad (3.1)$$

gde je:

τ - tangencijalni napon [N/m²],

γ - specifična težina vode (gustina vode x ubrzanje sile zemljine teže) [N/m³],

\mathfrak{R} - hidraulički radijus (procenjena srednja dubina) [m],

J - pad linije energije (pri jednolikom tečenju -pad dna) [-].

3.1.2 Relevantne fizičke karakteristike

Inicijalno kretanje podrazumeva postojanje mase, sile, trenja i napona. Sila gravitacije i sila trenja su dve osnovne sile koje karakterišu kretanje vode. Sila gravitacije inicira kretanje vode. Sila trenja koja deluje na rečno dno i obalu usporava kretanje vode. Kada je sila gravitacije jednaka po intenzitetu i po smeru suprotna sili trenja, voda u rečnom koritu kreće se konstantnom brzinom. Kada je intenzitet sile gravitacije izuzetno veći od sile trenja, voda u rečnom koritu ubrzava svoje kretanje [Leopold et al., 1964].

3.1.3 Tangencijalni napon. Otpornost čestica na kretanje

Čestica će se pokrenuti samo ako je tangencijalni napon mnogo veći od otpornosti čestica tla na kretanje. Intenzitet tangencijalnog napona potreban za kretanje čestica poznat je kao kritični tangencijalni napon (τ_{cr}).

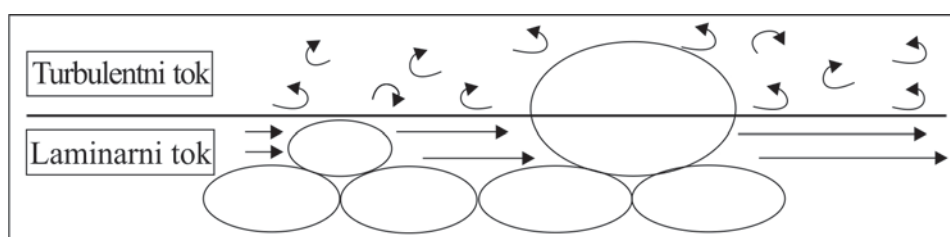
Otpor čestica na kretanje je promenljiv i samim tim pokretanje čestica zavisi od veličine čestice, relativne veličine čestice (u odnosu na druge čestice), orijentacije i položaja. Težina čestice zavisi od njene veličine.

Veličina čestice u odnosu na druge okolne čestice utiče na intenzitet tangencijalnog napona kojem je izložena čestica, a zavisi od toga koliko je izložena uticaju rečnog toka. Orijeatcija čestice utiče na silu potrebnu da bi se čestica zakotrljala rečnim koritom. Ugrađenost čestice u teren, takođe utiče na intenzitet tangencijalnog napona kome je izložena čestica.

Zbog turbulencije, zaklonjenost čestice može biti primarni faktor u određivanju tangencijalnog napona. Turbulencija može stvoriti tangencijalni napon četiri puta veći od prosečnog. Dakle, čestice izložene turbulenciji biće izložene većoj sili fluida od drugih. Granični sloj vode, neposredno iznad rečnog korita nije turbulentan. Debljina ovog sloja dovoljna je da pokrije srednju veličinu čestica.

Veće čestice će međutim zbog svoje veličine biti izložene turbulentnom toku. Čestice okružene manjim česticama biće obuhvaćene turbulencijom dok čestice srednje veličine neće biti obuhvaćene turbulentnim tokom i na taj način će biti pod manjim uticajem tangencijalnog napona tečnosti.

Tačne procene kritičnog tangencijalnog napona trenja zahtevaju preciznu karakterizaciju ovih parametara [Wohl, 2000].



Slika 3.1. Turbulentni i laminarni rečni tok

3.1.4 Proračun kritičnog tangencijalnog napona

Koristeći prethodne principe, Shields je 1936. godine sproveo eksperimente u otvorenom kanalu da bi razvio izraz za određivanje kritičnog tangencijalnog napona za pokretanje čestice određene veličine [Knighton, 1998]:

$$\tau_{cr} = \tau_{ci} \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_{ws}) \cdot d \quad (3.2)$$

gde je:

τ_{cr} - kritični tangencijalni napon [N/m²],

τ_{ci} - bezdimenzionalan kritični tangencijalni napon [-],

g - ubrzanje sile zemljine teže [m/s²],

ρ_s - gustina sedimenta [kg/m³],

ρ_{ws} - gustina vode [kg/m³],

d - prečnik posmatrane čestice [m].

Studije Shield-a pokazale su da rečno korito sastavljeno pretežno od šljunka, homogenog sedimenta i turbulentnog toka ima bezdimenzionalan kritičan tangencijalni napon 0.06. Jednačine Shield-a još uvek služe kao osnova za definisanje kritičnog tangencijalnog napona [Fischenich, 2001].

Međutim, od rada Shielda drugi istraživači izveli su jednačinu u nastojanju da se poboljša predviđanje kritičnog tangencijalnog napona u prirodnim kanalima sa heterogenim substratom [Shields et al., 2006; Fischenich, 2001]. Fischenich navodi sledeće jednačine Julien-a za približno određivanje kritičnog tangencijalnog napona čestica različitih veličina [Fischenich, 2001]:

- glina:

$$\tau_{cr} = 0,5 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_{ws}) \cdot d \cdot \text{tg} \phi, \quad (3.3)$$

- sitan nanos i pesak:

$$\tau_{cr} = 0,25 \cdot d_*^{-0,6} \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_{ws}) \cdot d \cdot \text{tg} \phi, \quad (3.4)$$

- šljunak i krupniji oblutci:

$$\tau_{cr} = 0,06 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_{ws}) \cdot d \cdot \text{tg} \phi, \quad (3.5)$$

gde je:

$$d_* = d \cdot \left[\frac{(G_s - 1) \cdot g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.6)$$

ϕ - ugao polaganja čestica [°],

G_s - specifični pronos nanosa [kg/s/m],

ρ_s - gustina sedimenta [kg/m³],

ρ_{ws} - gustina vode [kg/m³],

ν - kinematski viskozitet vode [m²/s],

d - prečnik posmatrane čestice [m].

Ugao polaganja čestica dat je u tabeli 3.1 [Julien, 1995].

Kritičan tangencijalni napon je takođe dat u tabeli 3.1 [Julien, 1995]. Važno je znati da se mešoviti sedimenti ponašaju drugačije nego uniformni sedimenti. Čestice koje su veće od prosečne vrednosti čestica sedimenta biće pokrenute pod uticajem tangencijalnog napona koji je po intezitetu manji od tangencijalnog napona datog u tabeli 3.1, pa će i naponi neophodni za pokretanje čestica manjih od prosečnih vrednosti biti veći od napona u tabeli 3.1 [Fischenich, 2001].

Nakon istraživanja Shields-a dalja istraživanja su pokazala da τ_{ci} može imati vrednost od 0.25-0.02 zavisno od raspodele veličina čestica u rečnom koritu. Andrews je pokazao da τ_{ci} može biti određen sledećom jednačinom [Andrews, 1984]:

$$\tau_{ci} = 0.0834 \cdot \left(\frac{d}{d_{s50}} \right)^{-0.872} \quad (3.7)$$

gde je:

d - prečnik posmatrane čestice [m],

d_{s50} - srednja vrednost prečnika čestica u podzemlju [m].

Jednačina Andrews-a se može koristiti za određivanje kritičnih tangencijalnih napona τ_{cr} potrebnih za pokretanje čestica određene veličine u šljunčano-kamenitim tokovima, a d i d_{S50} mogu biti određeni uzrokovanjem na terenu [Andrews, 1983].

Naziv frakcije	d_{S50} [cm]	ϕ [°]	τ_{ci} [-]	τ_{cr} [N/m ²]	V_c [m/s]
Gromade					
Vrlo krupne	>203.20	42	0.26	133.78	1.33
Krupne	>101.60	42	0.26	91.30	0.94
Srednje veličine	>50.80	42	0.26	45.41	0.67
Male	>25.40	42	0.26	22.95	0.47
Kamen					
Krupni	>12.70	42	0.26	11.23	0.33
Sitni	>6.35	41	0.25	5.37	0.23
Šljunak					
Vrlo krupan	>3.30	40	0.24	2.64	0.16
Krupan	>1.52	38	0.23	1.22	0.11
Srednje krupan	>0.76	36	0.21	0.59	0.07
Fini	>0.41	35	0.21	0.29	0.05
Vrlo fini	>0.20	33	0.19	0.15	0.04
Pesak					
Vrlo krupan	>0.10	32	0.14	0.05	0.02
Krupan	>0.05	31	0.16	0.03	0.02
Srednje veličine	>0.03	30	0.23	0.02	0.01
Fini	>0.01	30	0.35	0.01	0.01
Vrlo fini	>0.01	30	0.53	0.01	0.01
Glina					
Krupnija	>0.01	30	0.81	0.00	0.01
Srednje veličine	>0.00	30	1.22	0.00	0.01

Tabela 3.1. Granična vrednost tangencijalnog napona i brzina uniformnih nekohezivnih sedimenata [Julien, 1995]

3.2 HIDRODINAMIČKO OPTEREĆENJE INFILTRACIONIH STRUJANJA

Uticao je izražen silama hidrodinamičkog pritiska infiltracionih strujanja i može biti izuzetno opasan u slučaju naglog spuštanja nivoa vode u reci. Tokom naglog podizanja nivoa vode u reci javljaju se infiltraciona strujanja iz reke prema podzemnim vodonosnim slojevima. Snaga infiltracionih strujanja stabilizuje zaštitnu oblogu obale reke. Nakon naglog pada nivoa vode u reci smer strujanja je od vodonosnog sloja ka rečnom koritu. Sila pritiska teži da pomeri zaštitnu oblogu reke. Obloga rečnog korita se sopstvenom težinom suprotstavlja sili pritiska i maksimalna sila pritiska odgovara dijagramu hidrostatičkog pritiska, gde je pritisak u tački:

$$p = \gamma \cdot h \quad (3.8)$$

gde je:

p - hidrostatički pritisak [N/m^2],

γ - specifična težina vode [N/m^3],

h - srednja dubina vode [m].

3.2.1 Lom obloge usled uticaja pornog pritiska vode

U vrlo permeabilnim terenima, pri naglom padu nivoa vode, razlika pornog pritiska u materijalu obale i spoljnog pritiska vode biće približno jednaka nuli. Obzirom da je porni pritisak približno jednak nuli, promene efektivnog pritiska će biti jednake ukupnoj promeni pritiska. U slabo propusnim materijalima, voda se ne može lako drenirati. Za razliku od prethodnog uslova, razlika pornog pritiska vode u materijalu nasipa i spoljnog nivoa vode pri padu nivoa vode neće biti nula.

Jednačina između efektivnog i ukupnog pritiska:

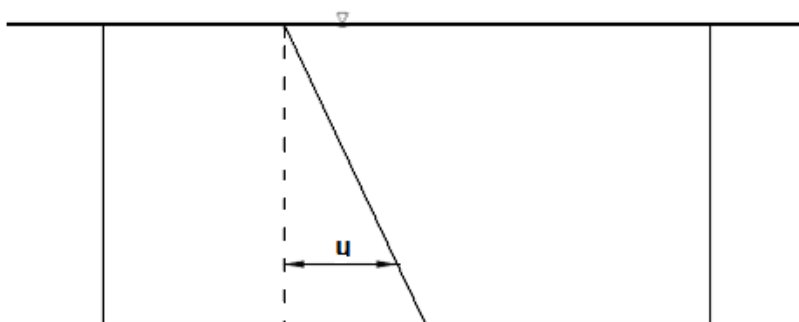
$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.9)$$

gde je:

σ' - efektivni pritisak [N/m^2],

σ - ukupni pritisak [N/m^2],

u - porni pritisak [N/m^2].



Slika 3.2. Raspodela pornih pritisaka

U jako propusnom tlu: $\Delta u = 0; \Delta \sigma' = \Delta \sigma$

U slabo propusnom tlu: $\Delta u \neq 0; \Delta \sigma' \neq \Delta \sigma$.

U vreme poplava, kada je rečno korito puno vode, visoki nivoi vode javljaju se i sa spoljnje i sa unutrašnje strane obloge. Pritisak vode u rečnom koritu stabilizuje oblogu. Ovaj pritisak se smanjuje kada nivo vode u reci opadne. Ako nivo vode naglo opadne, porni pritisak u materijalu obale ima nedovoljno vremena da se izjednači sa nivoom vode u rečnom koritu.

U ovim uslovima, obzirom da je porni pritisak u materijalu obale veći od nivoa vode u rečnom koritu, rizik po stabilnost obloge će biti znatno uvećan. Ovi uslovi opterećenja nazivaju se i „rapid drawdown“. U slabo propusnim materijalima, porni pritisak (u), dovodi do otpornosti na smicanje, i to:

$$S = c' + (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg} \varphi' \quad (3.10)$$

gde je:

S - otpornost na smicanje [N/m^2],

c' - efektivna kohezija [N/m^2],

φ' - efektivan ugao unutrašnjeg trenja materijala obloge [$^\circ$].

Na kraju, otpornost na smicanje malog intenziteta će smanjiti faktor bezbednosti kosine:

$$F_s = \frac{S}{\tau} \quad (3.11)$$

gde je:

F_s - koeficijent stabilnosti [-],

τ - tangencijalni napon [N/m^2].

U slučaju naglog pada nivoa vode, stvara je najozbiljniji i najteži oblik opterećenja koje deluje na zemljane kosine. Visok vodostaj u sekundarnim kanalima može da podigne nivo vode u primarnom drenažnom kanalu. Pri povlačenju poplava ovaj nivo može naglo da opadne. Iako je duboki lom površina moguć, na zemljanim stranama kosina se najčešće uočava efekat relativno plitkog loma površina. Ako plitki lomovi površina ne budu pod stalnim nadzorom, može nastati postepeno pogoršanje stanja obale i lom konstrukcije [Kerkes et al., 2006].

3.2.2 Podizanje obloge

Podizanje obloge se javlja ako je podizni pritisak („opterećenje“) na oblogu veći od pritisnih sila („otpornosti“) [Fischenich, 2001].

$$z = \Delta D - 0,21 \cdot Q_n = (a + h_1) \cdot R_w \quad (3.12)$$

gde je:

z - granično stanje stabilnosti obloge [-],

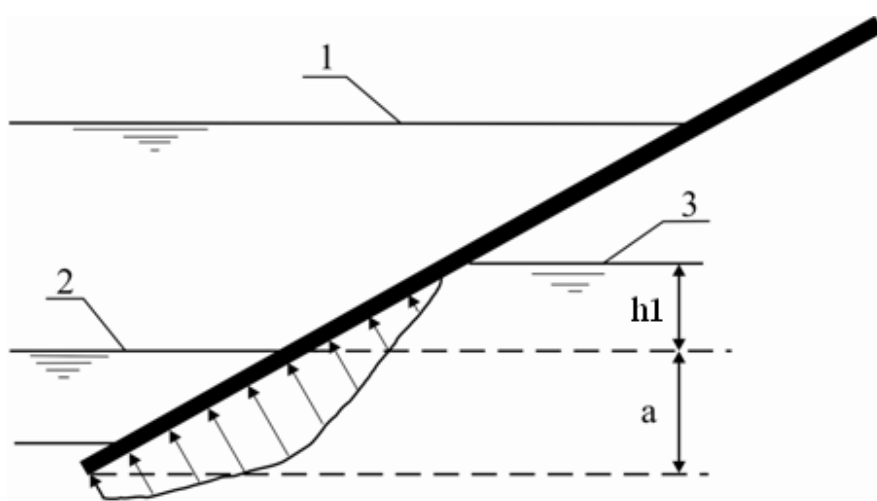
ΔD - relativna gustina asfaltnog sloja [-],

Q_n - faktor, koji zavisi od ugla kosine α [-],

a - rastojanje od nivoa slobodne vodene površine do nožice asfaltne obloge [m],

h_1 - razlika u nivou površinske i podzemne vode [m],

R_w - redukcionni faktor, koji zavisi od ugla kosine α [-].



Slika 3.3. Podizanje obloge:

1 – projektom usvojeni nivo površinske vode;
2 – nivo površinske vode; 3 - nivo podzemne vode.

Jednačine opterećenja

1. Nivo površinske vode pri kome se javlja maksimalni podizni pritisak je niži od srednjeg nivoa površinske vode (a i v su definisani prema prethodnoj slici):

$$H_{\max} = \frac{h_1}{\pi} \cdot \arccos \left[2 \cdot \left(\frac{h_1 + h \cdot \cos \theta}{a + h_1} \right)^{\frac{\pi}{\theta}} - 1 \right] \quad (3.13)$$

$$Q_n = 0.9405 + 0.1275 \cdot \operatorname{tg} \alpha_u + 0.4229 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (3.14)$$

gde je:

$$\theta = \operatorname{arctg}(m) + \frac{\pi}{2} \quad (3.15)$$

H_{\max} - nivo površinske vode pri koje se javlja maksimalni podizni pritisak [m],

h_o - debljina obloge [m],

y - nagib kosine (1:y) [-],

α - ugao nagiba kosine [°].

2. Nivo površinske vode pri kome se javlja maksimalni podizni pritisak je veći od srednjeg nivoa površinske vode:

$$H_{\max} = 0.21 \cdot Q_n \cdot (a + h_1) \cdot R_w \quad (3.16)$$

gde je:

$$Q_n = \frac{0.96}{(\cos \alpha)^{0.25}} \quad (3.17)$$

Kada nivo površinske vode opada, a obloga je slabo propusna, nivo podzemne vode (podizni freatični pritisak) deluje na unutrašnju stranu obloge.

Lom zaštitnog sloja obloge će se javiti ukoliko hidraulički gradijent nije adekvatnoj ravnoteži sa sopstvenom težinom obloge, sopstvenom težinom zemljišta i silama unutrašnjeg trenja zemljišta.

Jednačine pouzdanosti

Jednačine ravnoteže tla male kohezije:

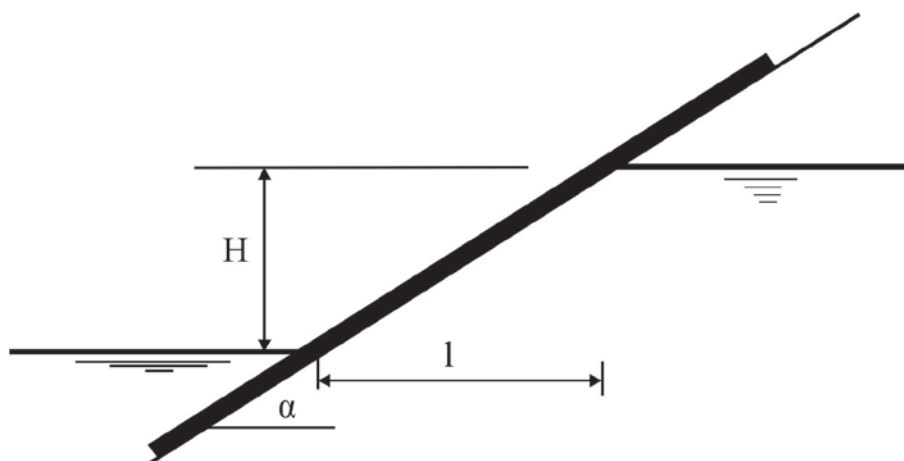
$$z = tg\varphi - tg\alpha \cdot \left[1 + \frac{\rho_{ws}}{\rho_g - \rho_a} \cdot \frac{i}{\sin\alpha} \right] \quad (3.18)$$

Jednačine opterećenja

Gradijent i može biti izveden jednačinom:

$$i = \sin\alpha - \frac{H \cdot \cos\alpha}{l} \quad (3.19)$$

Na sledećoj slici je dato objašnjenje promenljivih H i l .



Slika 3.4. Gradijent i [Van Herpen, 1998]

Definisanje parametara

ρ_g - gustina podsloja [kg/m^3],

φ - ugao unutrašnjeg trenja materijala obloge [$^\circ$],

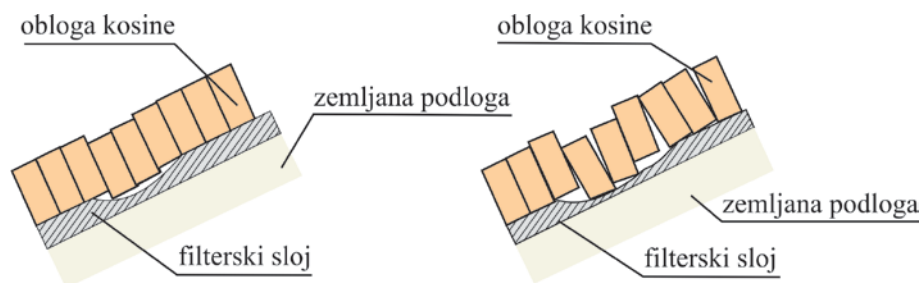
α - ugao nagiba kosine [$^\circ$],

ρ_{ws} - gustina vode [kg/m^3],

ρ_a - gustina obloge [kg/m^3], [TAW, 2004; Van Herpen, 1998].

3.2.3 Erozija tla kroz filter ili zaštitni sloj

Podrazumeva obloge od blokova, betona, gabiona i geosistema.



Slika 3.5. Erozija filterskog sloja ispod obloga kosine

Jednačina graničnog stanja

Kretanje čestica tla kroz filterski sloj ili oblogu dovodi do lokalne erozije tla u zoni vodnog ogleдалa i rezultiraće lokalnim sleganjem filtera i obloge.

Tokom povratnog talasa nastaje velika piježometarska razlika na vrhu obloge, koje se može kvalifikovati preko hidrauličkog gradijenta u filterskom sloju.

Oštećenje nastaje kada maksimalna vrednost gradijenta u filterskom sloju (i) pređe graničnu vrednost (i_{cr}), koja zavisi od karakteristika filterskog sloja.

Prema tome, jednačina graničnog stanja može biti izražena kao:

$$z = i_{cr} - i \quad (3.20)$$

Jednačina opterećenja

Maksimalni gradijent u filterskom sloju može biti sračunat kao:

1. maksimalni silazni gradijent: $i = \sin \alpha$
2. maksimalni uzlazni gradijent:

$$i = \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-\varphi_b}{2 \cdot \Lambda \cdot \cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right] \right) - \frac{\sin \alpha}{2} \cdot \exp \left[\frac{-\varphi_b}{2 \cdot \Lambda \cdot \cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right] \quad (3.21)$$

gde je:

α - ugao nagiba kosine [°],

Λ - procedna dužina [m],

φ_b - potencijalni hidrostatički pritisak [m],

φ - ugao unutrašnjeg trenja materijala obloge [°].

Jednačina otpornosti materijala obloge

$$i_{cr} = \frac{c_{geotextile}}{n^2 \cdot D_{15}} \quad (3.22)$$

$c_{geotextile}$ - faktor poroznosti obloge od geotekstila [m^{-1}],

n - poroznost filterskog sloja [-],

D_{15} - prečnik zrna granulometrijskog materijala na geotekstilu [m].

gde je:

- za dobru glinu

$$c_{geotextile} = 0.1,$$

- za glinu srednjeg ili lošijeg kvaliteta

$$c_{geotextile} = 0.01,$$

- za fini pesak

$$c_{geotextile} = 0.001.$$

3.3 UTICAJ TALASA IZAZVANIH VETROM ILI KRETANJEM BRODOVA

3.3.1 Uticaj talasa izazvanih vetrom

Talasi izazvani vetrom u unutrašnjim plovnim putevima su nasumične pojave, magnituda talasa visine značajne za zaštitu obala i period ponavljanja zavise u osnovi od brzine i smera vetra i veličine vodotoka na kome vetar duva (zaletna dužina vetra F).

Saville je sa svojim saradnicima, predstavio metodu za određivanje efektivne zaletne dužine vetra, neophodne za računanje osnovnih karakteristika talasa [Saville et al., 1962].

Neke karakteristične situacije koje su rezultirale primenom metode Saville-a sumirane su u slici 3.5.

Pojava talasa visine 500 m je vrlo malo verovatna.

Ova činjenica kao i maksimalna očekivana brzina vetra, ograničiće očekivanu amplitudu talasa izazvanog vetrom i generalno ovi talasi će imati manje destruktivno dejstvo u odnosu na talase izazvane kretanjem broda.

Značajna visina talasa H_s i perioda T_z mogu se sračunati korišćenjem pojednostavljene jednačine Svedrup-Munk-Bretschneider (SMB) [Hemphill et al., 1989]:

$$H_s = 0.00345 \cdot \left(\frac{U_{10}^2}{g} \right)^{0.58} \cdot F^{0.42} \quad (3.23)$$

$$T_z = 0.581 \cdot \left(\frac{F \cdot U_{10}^2}{g^2} \right)^{0.25} \quad (3.24)$$

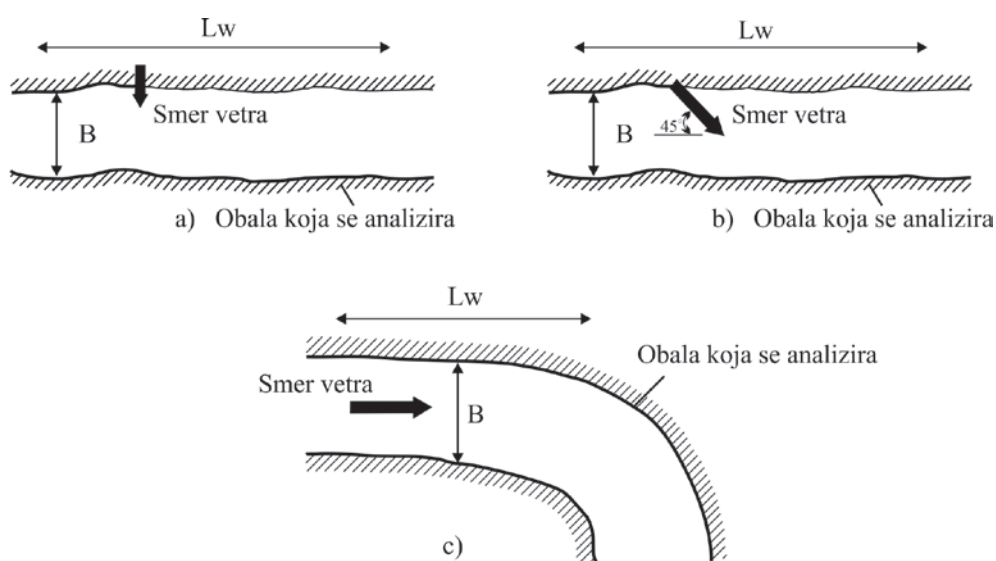
gde je:

U_{10} - brzina vetra visine 10 m iznad srednjeg nivoa vode (dobijena iz lokalnih podataka ili hidrometeorološke stanice) [m/s],

F - zaletna dužina vetra [m] (slika 3.6),

g - ubrzanje sile zemljine teže [m/s²],

L_w - dužina dometa vetra [m].



Slika 3.6. Određivanje zaletene dužine vetra [Saville et al., 1962]:

a) $F=B$; b) $F=2.5B$ (za $L_w > 20B$); c) $F= (3L_w+67B)/40$.

Iako je značajna visina talasa veoma važna za životnu okolinu, stabilnost obloge zavisi od maksimalne visine talasa H_i :

$$H_i = 1.3 \cdot H_s \quad (3.25)$$

Sledeća formula se preporučuje pri projektovanju obloga od kamenog nabačaja i blokova u uslovima gde su talasi srednje visine [Hemphill et al., 1989].

U uslovima gde su talasi veoma visoki (razarajući) preporučuju se reference sveobuhvatnijih publikacija [PIANC, 1987; Van der Meer, 1988].

Podaci o drugim tipovima obloge dati su u publikaciji PIANC -a [PIANC, 1987], ali i neki korisni i specifični priručnici mogu biti dostupni od strane proizvođača [Van der Meer, 1988].

Projektovanje obloga od kamenog nabačaja

$$D_{n50} = 0.34 \cdot \frac{H_i}{s-1} \cdot I_r^{0.5} \quad (3.26)$$

gde je:

D_{n50} - prečnik kamena na 50% granulometrijske krive [m],

H_i - visina najvišeg očekivanog talasa [m],

H_s - značajna visina talasa [m],

s - relativna gustina kamena definisana kao ρ_{st} / ρ_{ws} [-],

ρ_{st} - gustina stene [kg/m³],

ρ_{ws} - gustina vode [kg/m³],

I_r - je broj Iribarren-a, koji se može uzeti prema sledećoj pojednostavljenoj jednačini:

$$I_r = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\left[\frac{(2 \cdot \pi \cdot H_i)}{(1.3 \cdot g \cdot T_z^2)} \right]^{0.5}} \quad (3.27)$$

gde je:

α - ugao nagiba kosine [°],

g - ubrzanje sile zemljine teže [m/s²].

U fizičkom smislu broj Iribarren-a predstavlja odnos nagiba kosine obale i strmosti incidentnog talasa.

Projektovanje obloge od ravnih betonskih blokova

$$D = G \cdot \frac{H_i}{(s-1) \cdot \cos \alpha} \cdot I_r^{0.5} \quad (3.28)$$

gde je:

D - debljina betonskih blokova [m],

G - koeficijent koji zavisi od tipa betonskih blokova [-],

- za slobodne betonske blokove:

$$G = 0.19 - 0.26,$$

- za betonske blokove vezane mrežom kablova:

$$G = 0.15 - 0.19.$$

Prethodna jednačina ne obuhvata sve sisteme blokova koji postoje danas, obzirom da mnogi imaju ćelijsku strukturu i samim tim imaju sasvim različitu otpornost na talase.

Karakteristične podatke za projektovanje bi trebalo uzeti za druge tipove blokova, po mogućstvu iz laboratorija za testiranje ili od proizvođača.

3.3.2 Uticaj talasa izazvanih kretanjem brodova

Kretanje brodova u reci izaziva kompleksnu strukturu talasa i strujanja vode, sa odgovarajućim promenama u nivou vode, kao što je prikazano na slici 3.7 i sumirano u tabeli 3.2.

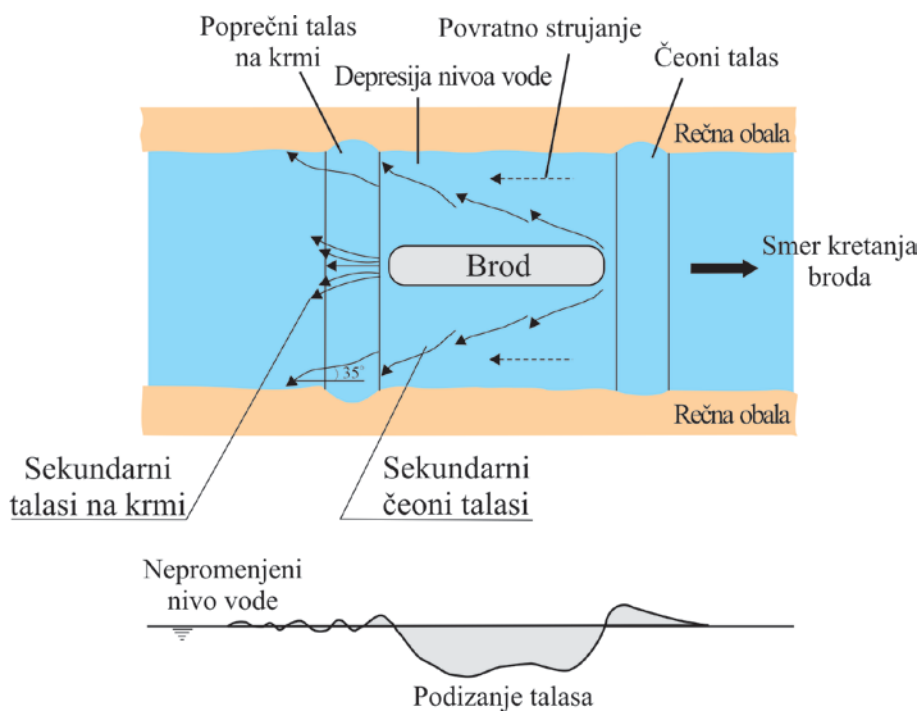
Kako se plovilo pomera duž rečnog toka, potiskuje vodu od pramca.

U vodnim telima koja imaju fiksne granice, zapažena su dva glavna oblika kretanja vode: *primarni*, koji je vezan za opšte kretanje vode oko broda i *sekundarni*, koji se formiraju kosim talasima nastalih u pramcu i krmi vozila.

U određenom vremenskom trenutku primarni oblik se formira podizanjem vode uz brod (*čeonni talas*) koji onda naglo pada u depresiju nivoa vode, ovo je praćeno brzim podizanjem nivoa vode u krmi (*poprečni talas na krmi*).

Povratne struje sa smerom suprotnim od kretanja broda izazivaju depresiju između talasa pramca i krme. Sekundarni oblik formiraju poprečni i divergentni talasi mešanjem vrhova koji imaju prepoznatljiv oblika slova V, koji u principu zavisi od brzine broda i dubina vode kanala.

U većini slučajeva za ugao pojedinačnih talasa u odnosu na obalu reke može se usvojiti 35° .



Slika 3.7. Vodne forme usled kretanja broda

Ispiranje izazvano kretanjem brodova je izraz koji se generalno koristi za opisivanje strujanja vode izazvanog kretanjem broda.

Brzo opadanje nivoa vode praćeno prolaskom talasa mogu izazvati ekscesan porni pritisak, i velika brzina broda može izazvati razarajuće talase krme i dodatnu slabu turbulenciju vode.

Oblici kretanja vode izazvanih kretanjem brodova zavise od više faktora. Oni su generalno vezani za geometriju broda (naročito dužinu broda, oblik i širinu), brzinu broda, oblik i dubinu vode u kanalu.

Važan parametar je odnos poprečnog preseka broda ispod površine vode i celokupnog poprečnog preseka toka u kanalu.

Ovaj odnos, ima relativno blokirajući uticaj, i povezan je amplitudom primarnog talasa izazvanog kretanjem broda i ograničenom brzinom broda koja treba da bude kontrolisana da bi se smanjila erozija.

Praćenje amplitude i perioda talasa izazvanih vozilima koja koriste različite vodne puteve je nesumnjivo najbolji pristup na kome se zasniva projektovanje zaštite obale. Kada to nije moguće, veličina visine talasa može se uzeti iz tabele 3.3 [Hemphill et al., 1989].

Hemphill i Bramley, dali su i opšte jednačine za projektovanje obloge od kamenog nabačaja.

Vrste	Strujanje vode	Opis
Primarno strujanje (uobičajeni tok oko broda)	Prednji talas	Poprečni talasi, ispred broda
	Vodna depresija	Smanjenje nivoa vode izazvano povratnim strujanjem
	Povratno strujanje	Indukovano strujanje u pravcu suprotnom od kretanja broda
	Poprečni talas	Poprečni talasi, iza broda
Sekundarno strujanje	Talasi od pramca	Kosi talasi od pramca
	Talasi od krme	Kosi talasi od krme
Turbulentno strujanje (nastalo radom propelera)	Talasi usled rada propelera	Strujanje vode usled rada propelera

Tabela 3.2. Strujanja vode usled kretanja broda

Tip kanala	Veličina broda [t]	Visina talasa [m]
Manji kanali	< 80	< 0.3
Veći kanali	< 400	< 0.5
Plovne reke	< 40	< 0.4

Tabela 3.3. Visina talasa u funkciji veličine broda (za uslove u Velikoj Britaniji)

Projektovanje obloge od kamenog nabačaja

Primarni talasi (poprečni talasi od krme):

$$D_{n50} = 0.067 \cdot \frac{H_i}{(s-1) \cdot (\operatorname{ctg} \alpha)^{1/3}} \quad (3.29)$$

Sekundarni talasi:

$$D_{n50} = 0.56 \cdot \frac{H_i}{(s-1)} \cdot (\cos \beta)^{0.5} \quad (3.30)$$

gde je:

D_{n50} - prečnik kamena na 50% granulometrijske krive [m],

H_i - visina najvišeg očekivanog talasa (u nedostatku konkretnih podataka, koriste se podaci prema tabeli 3.3) [m],

s - relativna gustina kamena [-],

α - ugao nagiba kosine [°],

β - ugao talasa u odnosu na liniju obale (obično se uzima 35°) [°].

Formula stabilnosti za druge tipove obloga može se dobiti iz naučnih studija opisanih u prospektima proizvođača ili iz laboratorijskih testova.

Ispitivanjem stabilnosti blokova i došlo se do rezultata da ona zavisi od težine blokova, veličine, načina vezivnih metoda, kao i od propusnosti obloge i posteljice.

U publikaciji „Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geo-textiles for inland waterways“ predlaže se metoda za projektovanje koja uzima u obzir svaki od ovih faktora [PIANC, 1987].

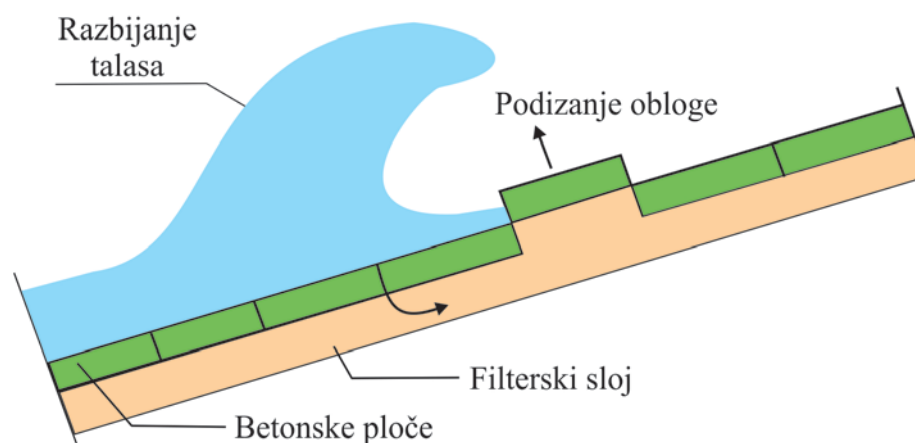
Ipak, sledeća jednačina, koja je dobijena uporednom analizom stabilnosti obloge od kamenog nabačaja i obloge od betonskih blokova može se koristiti za prvu aproksimaciju pri određivanju stabilne veličine ravnih blokova otpornih na uticaj sekundarnih talasa izazvanih kretanjem broda:

$$D = 0.43 \cdot H_i \cdot (\cos \alpha) \cdot (\cos \beta)^{0.5} / (s - 1) \quad (3.31)$$

Uspinjanje talasa

Treba uzeti u obzir da obloga koja je izložena dejstvu talasa mora biti projektovana tako da obezbeđuje zaštitu obale pri maksimalnom nivou vode koji nastaje uspinjanjem talasa.

Ovaj nivo je veći od nivoa vode koja miruje, zavisi od nagiba kosine i hrapavosti obloge.



Slika 3.8. Podizanje blokova obloge usled dejstva talasa izazvanih vetrom ili kretanjem brodova

Generalno, hrapava obloga kao što je obloga od kamenog nabačaja, gabiona i nekih tipovi obloga od betonskih blokova mogu da smanje uspinjanje talasa do 45%, u poređenju sa glatkom oblogom kao što je betonska ili asfaltna obloga.

Berme takođe imaju redukcionu efekat: iznad određene optimalne širine, što je berma šira efekat će biti veći.

Formula za računanje uspinjanja talasa može se naći u publikaciji PIANC -a [PIANC, 1987].

Pravila za prvu procenu daju visinu iznad mirne vode $2H$ za oblogu od kamenog nabačaja i $4H$ za oblogu od betona ili asfalta, gde je H visina talasa uzeta za projektovanje.

3.4 UTICAJ LEDA

Uticao leda može biti vrlo značajan po stabilnost rečnih obala, a javlja se u tri oblika, kao:

- statičko opterećenje ledenog sloja,
- dinamičko opterećenje nastalog ledenog sloja,
- opterećenje ledenog sloja zalepljenog jednim krajem za oblogu (u periodu ledostaja) i ledenog sloja koji se pokreće (u periodu ledohoda) [Arandelović, 2012].

3.4.1 Statičko opterećenje leda

Statičko opterećenje ledenog sloja nastaje kao posledica brzog porasta temperature vazduha, i tada sloj leda dilatira i stvara silu pritiska na oblogu. Maksimalna sila pritiska se određuje izrazom Royen-a (u Evropskim državama):

$$P_g = 9 \cdot h_g \cdot (\Delta t_g + 1) \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta t_g}{k} (\Delta t_g + 1)^2} \quad (3.32)$$

gde je:

P_g – maksimalna sila pritiska leda [KN/m],

h_g – debljina leda [m],

Δt_g – maksimalni porast temperature ledenog sloja, u periodu od k sati [C°].

Vrednosti t i k se prema meteorološkim podacima uzimaju u najnepovoljnijem odnosu. Sledeće jednačine primenjuju se u Rusiji:

$$P_g = 31 \cdot \frac{(t_{ig} + 1)^{1.67}}{(t_{ig})^{0.88}} \cdot \left(\frac{\Delta t_{ig}}{k} \right)^{0.33} \quad (3.33)$$

gde je:

t_{ig} – početna temperatura ledenog sloja [C°].

Obrazac Royen-a ne uzima u obzir početnu temperaturu ledenog sloja dok obrazac koji se koristi u Rusiji u velikoj meri zavisi od inicijalne temperature i vrlo malo od porasta temperature ledenog sloja.

Ukoliko se pri proračunu javi nedostatak važnih meteoroloških podataka preporučuje se proračun sila ledenog sloja prema debljini ledenog sloja i klimi koja se zasniva na podacima

dobijenim osmatranjem. U Rusiji se preporučuje korelacija između debljine leda i sile leda koja je data u tabeli 3.4.

h_g [m]	0.50	0.70	1.0	1.20	1.50
P_g [KN/m]	70	100	150	200	280

Tabela 3.4. Maksimalna sila statičkog pritiska prema debljini ledenog sloja

3.4.2 Dinamičko opterećenja leda

Dinamički pritisak ledenog sloja, izazvan je ledohodom, odnosno kretanjem ledenog sloja dimenzija, $l_g \cdot b_g \cdot h_g$ (m), brzinom v_g (m/s). Aproksimativno određivanje sile dinamičkog pritiska ledenog sloja definisao je P. Kuznetsov [Kuznetsov, 1948].

$$P_{g,d} = K_g \cdot v_g \cdot h_g \cdot \sqrt{b_g \cdot l_g} \quad (3.34)$$

gde je:

$P_{g,d}$ - sila dinamičkog pritiska ledenog sloja [KN],

v_g – brzina kretanja ledenog sloja [m/s],

b_g – širina ledenog sloja [m],

l_g – dužina ledenog sloja [m],

h_g – debljina sloja leda (koja ima vrednost od 0.6 do 0.8 od osmatrane maksimalne debljine ledenog sloja koji se pomera upravno na obalu) [m],

K_g – koeficijent koji zavisi od granične otpornosti ledenog sloja [-].

- u trenutku pokretanja ledenog sloja:

$$K_g = 60,$$

- na kraju kretanja ledenog sloja:

$$K_g = 40.$$

Dinamički uticaj leda je vrlo značajan kod obloga koje imaju malu debljinu.

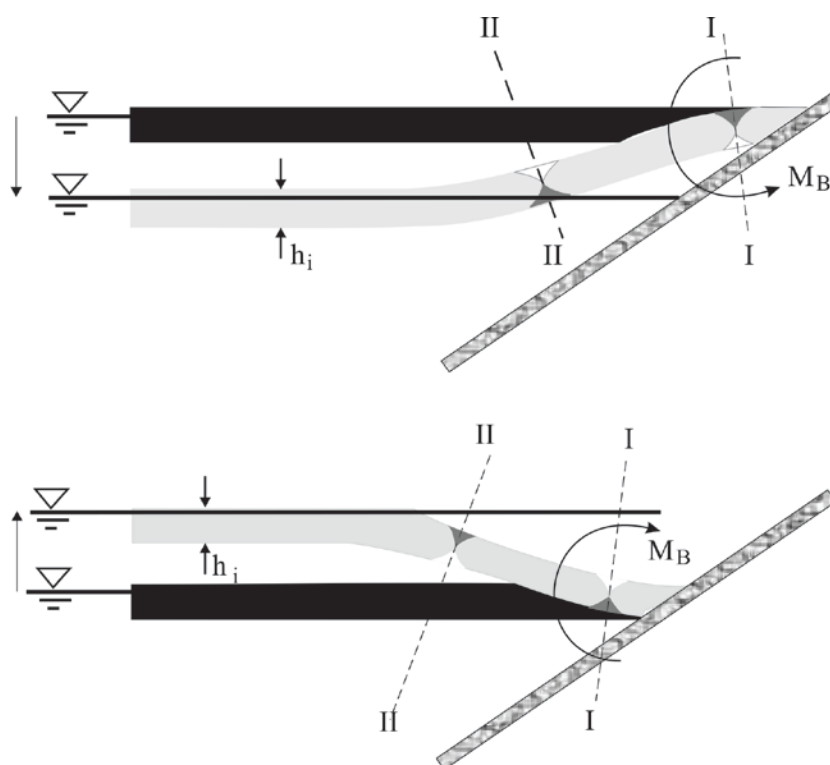
Dinamičko opterećenje ledenog sloja u pokretu može biti destruktivno za ovakve obloge.

Jedino rešenje je u tome da se pri formiranju obloge od kamenog nabačaja površina kosine obloge učini što je moguće ravnijom, tako da se ne stvori mogućnost „lepljenja“ ledenog sloja u pokretu za oblogu.

U protivnom oštećenja su neminovna i moraju se sanirati nakon prolaska ledenog sloja.

3.4.3 Opterećenje „zalepljenog ledenog sloja“

Opterećenje „zalepljenog ledenog sloja“ u trenutku opadanja nivoa vode u rečnom toku stvara dodatno opterećenje na oblogu. Tada se javlja momenat u tački uklještenja ledenog sloja u oblogu, čiji smer zavisi od toga da li je reč o porastu vodostaja (smer momenta u smislu okretanja kazaljke na satu) ili opadanja nivoa (u obratnom smeru), slika 3.9.



Slika 3.9. Momenat u tački uklještenja ledenog sloja o oblogu [Carstensen, 2008]

Tada postoji opasnost čupanja pojedinih blokova čime počinje razaranje obloge.

Vertikalna sila od zalepljenog leda (F_{vl}), težinom pojedinih kamenih blokova formira momenat oko tačke oslonca, čiji položaj varira od bloka do bloka.

Stabilnost bloka zavisi od toga da li je:

$$\vec{F}_{vl} * m < \vec{G}_k * n \quad (3.35)$$

gde je:

m_f - krak sile F_{vl} u odnosu na tačke oslonca [m],

n_f - krak sile sopstvene težine bloka G_k , u odnosu na istu tačku oslonca [m].

Vertikalna sila F_{vl} računa se po obrascu:

$$F_{vl} = 0,2 * d_k * v_n * T_g * 4 \sqrt{\frac{d_{l \max}}{\phi}} \quad (3.36)$$

gde je:

F_{vl} – vertikalno opterećenje [MN],

d_k – prečnik kamenog bloka [m],

v_n – brzina promene nivoa [m/h],

T_g – vreme u toku koga dolazi do deformacije uklještena ledene sante [h],

$d_{l \max}$ – debljina ledene kore verovatnoće pojave 1% [m],

μ – bezdimenzionalna funkcija [-], koja se određuje pomoću sledeće jednačine:

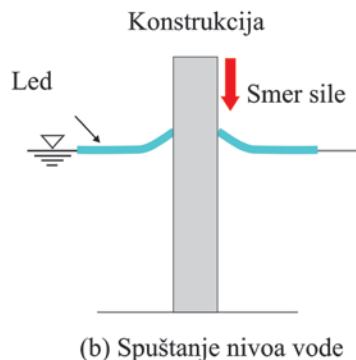
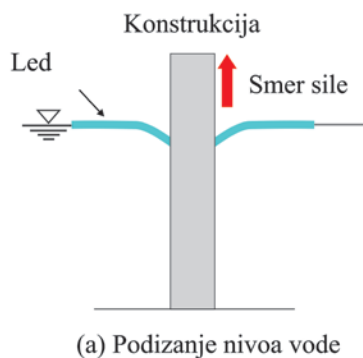
$$\mu = 1 + \frac{3 * 10^2}{\eta} * \left[T + 50 * (1 - e^{-0,4T}) \right] \quad (3.37)$$

gde je:

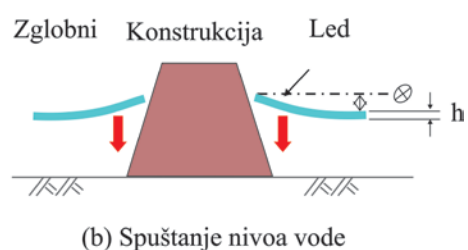
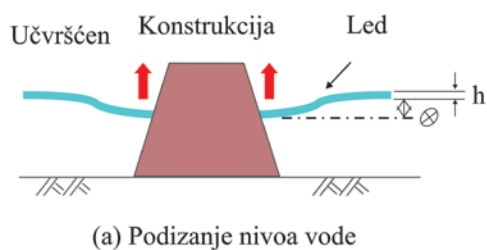
$$\eta = (3,3 - 1,85 * t) * 10^2 \quad (3.38)$$

t - temperatura leda [C°].

Cilindrična konstrukcija



Konusna konstrukcija



Slika 3.10. Uticaj vertikalne sile leda na cilindrične i konusne konstrukcije u rečnom toku [Saeki, 2011]

4 OPŠTI USLOVI UREĐENJA REČNIH TOKOVA

4.1 OPŠTI PRINCIPI REČNE GEOMORFOLOGIJE

Egzistencija i razvoj akvatičnih ekosistema u rečnim tokovima i priobalnih ekosistema u inundacionim pojasevima duž vodotoka u najvećoj meri zavise od hidroloških, hidrauličkih i morfoloških karakteristika vodotoka. Hidrološki režim vodotoka, sa unutar godišnjom varijacijom vodostaja i proticaja i veličinom, frekvencijom i trajanjem poplavnih talasa uslovljava režim vlažnosti u inundacijama. Hidraulički režim vodotoka i propusna moć rečnog korita određuju raspodelu proticaja vode na glavni tok i inundaciju. Pri tome se podrazumeva da je raspodela proticaja i strujna slika u inundacijama uslovljena varijacijama morfoloških karakteristika minor i major korita. Izrazita varijabilnost hidroloških, hidrauličkih i morfoloških parametara, karakteristična za većinu prirodnih vodotoka, igra bitnu ulogu u razvoju akvatičnih i priobalnih ekosistema.

Prirodni rečni tokovi i njihove priobalne površine predstavljaju izvanredno značajne kompleksne, ekološke resurse. U ovim zonama je formiran vrlo kompleksan biotop, sa mozaikom specifičnih staništa. U tom okviru, poseban značaj imaju takozvana „vlažna zemljišta” („*wet lands*”), koja se javljaju u različitim oblicima (potopljeni vetlandi, travni i šumski vetlandi i dr.). Ekološka funkcija vetlanda i ostalih inundacionih površina direktno je uslovljena hidrološko – hidrauličkom vezom između glavnog toka i inundacije. Ukoliko bi se ova veza prekinula, došlo bi do totalne degradacije priobalnog ekosistema.

Prema savremenim shvatanjima, rečni tok ima ulogu „transportnog vektora” u procesu transfera energije i materije duž vodotoka [Friedman et al., 2000]. Pri malim i srednjim vodama, transportni procesi su pretežno longitudinalni, dok su pri velikim vodama i lateralni. Upravo ta lateralna komponenta ima ogroman ekološki značaj.

Uticao rečnog toka na priobalnu floru i faunu je veoma složen i obuhvata fizičke, hemijske i biološke efekte. Fizički efekti strujnog toka kroz inundacione zone sastoje se u delimičnoj ili potpunoj destrukciji pojedinih biljnih vrsta, povijanjem, potkopavanjem, čupanjem ili lomljenjem šiblja, granja i drveća. Prema tome, jedna od posledica prolaska poplavnih talasa kroz inundacione zone sastoji se u pokretanju i odnošenju dela priobalne vegetacije. Transport materija rečnim tokom obuhvata tri osnovne kategorije – rečni nanos (sedimente), hranjive materije (nutrijente) i materije – zagađivače (polutante). Razmena materija između glavnog toka i inundacije ima veliki značaj i za priobalne i za akvatične ekosisteme. U periodima velikih voda i tečenja kroz inundacione zone, vrši se razmena organskih i neorganskih materija između minor i major korita. Ulaz nutrijenata iz glavnog toka omogućuje veliku biološku produktivnost inundacionog prostora. S druge strane, transfer nutrijenata iz inundacija u glavni tok od velikog je značaja za akvatični ekosistem, naročito u slučaju velike koncentracije suspendovanog nanosa u rečnom toku, koja sprečava razvoj algi i zooplanktona.

Izlivanje velikih voda u inundacione pojaseve uslovljava određeni vodni režim u ovim zonama i korespondentnu vlažnost zemljišta. U slučaju ekscesivnih velikih voda i dugog trajanja poplavnog talasa, vodni režim inundacije postaje ekološki nepovoljan. U takvim uslovima,

opstanak biljnog sveta u inundaciji zavisi od vrsta (neke mogu opstati samo nekoliko dana, dok druge mogu izdržati dugi vremenski period).

Hidrauličko – ekološka interakcija između glavnog toka i inundacije je dvosmerna, jer u talasima velikih voda iz major korita u glavno korito dospevaju različite forme biomase – oborena stabla, granje, grmlje i dr. Ove formacije se u rečnom toku mestimično zadržavaju, obrazujući staništa za akvatičnu faunu. Pored toga, organski materijal iz inundacije povećava biološku produktivnost u rečnom toku.

U transportnim procesima duž rečnog toka, poseban značaj ima jedan biološki fenomen – transport biljnog semena iz inundacionog prostora. Neke biljne vrste u ovim zonama oslobađaju seme u vreme prolaska poplavnih talasa, pri čemu seme dospeva u rečni tok i prenosi se u nizvodnom smeru, do nekog sledećeg staništa. Istraživanjima je dokazano da pojedine vrste usklađuju vreme rasejavanja semena sa hidrološkim režimom vodotoka i periodima pojave velikih voda [Hupp, 1992; Johnson, 1994]. Ovaj primer korespondencije hidroloških i bioloških ciklusa predstavlja paradigmu prirodne harmonije.

Akvatični ekosistem se najvećim delom prostire duž glavnog toka, ali uz značajnu ulogu interakcije sa inundacionim staništima. Kao što je istaknuto, transfer nutrijenata duž vodotoka uslovljava veliku biološku produktivnost inundacionih zona. Hidraulički režim u ovim zonama igra veoma važnu ulogu u biološkim procesima. Sporo tečenje, sa malim dubinama toka, izvanredno pogoduje razvoju fitoplanktona i zooplanktona. Na taj način se obezbeđuje ishrana akvatične faune u minor i major koritu vodotoka.

U razvoju akvatičnog ekosistema u rečnom toku, veoma važnu ulogu imaju morfološke karakteristike vodotoka. Varijabilnost morfometrijskih parametara rečnog toka i raznovrsnost formi minor korita su bitni faktori biodiverziteta ihtiofaune. Varijacije širine i dubine korita i promene uzdužnog pada vodotoka vrlo povoljno utiču na razvoj pojedinih vrsta. Smenjivanje brzaka i tišaka duž rečnog toka ima veliki značaj za reprodukciju riba. U različitim fazama razvoja, ribama pogoduju staništa različitih karakteristika. Rečni tišaci, sa relativno malim brzinama tečenja i velikim dubinama, pogodni su za odmor i sakrivanje riba, a takođe i kao zimski staništa. S druge strane, rečni brzaci su optimalne lokacije za riblju ishranu, zbog povećanog prisustva nekih vrsta akvatične faune. Priobalne zone vodotoka, na potezima proširenja korita, koje se karakterišu specifičnom strujnom slikom, predstavljaju idealne lokacije za razvoj ribljih larvi i mlada.

U okviru razmatranja relacije između karakteristika rečnog toka i akvatičnog ekosistema, treba istaći još jednu važnu činjenicu. Istraživanjima je dokazano da pojedine riblje vrste svoje fiziološke cikluse usklađuju sa hidrološkim režimom vodotoka, a naročito sa periodima pojave velikih voda [Wydovski et al., 2000]. To je još jedan primer spontanog usklađivanja različitih, međusobno nezavisnih prirodnih procesa [Petković, 2002].

Najznačajnije prirodne uloge rečenih tokova i njihovih veltlenda su [Diaconu, 1999]:

- riblja staništa i stvaranje optimalnih uslova za njihovu reprodukciju,
- staništa ptica, sisara, vodozemca, gmizavca i vrlo različitih invertebrata,

- retenzija vode i rečnog nanosa,
- samoprečišćavanje vode retenzijom i recikliranjem nutrijenata i transformacijom organskih i neorganskih zagađivača,
- očuvanje biodiverziteta (drveće u plavnim područjima je vrlo rodno),
- ekonomsko-socijalna: izvorišta vode, plovni put, eksploatacija građevinskih materijala (šljunak i pesak), turizam, rekreacija i edukacija.

Razvoj geofizike i ekologije (posebno akvatičnih staništa) reka zavisi gotovo isključivo od dinamike (hidraulike i hidrologije) i morfologije tečnog toka. U prirodnim uslovima, rečni tok formira relativno stabilnu vezu između promenljivih koje karakterišu rečni tok:

1. Nezavisne ili kontrolne promenljive:

- proticaj,
- pronos nanosa,
- hidraulički pad,
- karakteristike rečnog nanosa (dna i rečne obale),
- oblici priobalne flore.

2. Zavisne promenljive (stepeni slobode):

- širina rečnog korita,
- srednja dubina vode,
- maksimalna dubina vode,
- nagib dna,
- brzina tečenja,
- prostorna disipacija energije rečnog toka,
- meandriranja rečne trase,
- srednji prečnik rečnog nanosa,
- procentualni sadržaj finih čestica u granulometrijskom sastavu nanosa,
- dužina sinusoidne talasa.

U rečnom toku koji se nalazi u dinamičkoj ravnoteži, zavisne promenljive stalno menjaju i prilagođavaju svoje vrednosti.

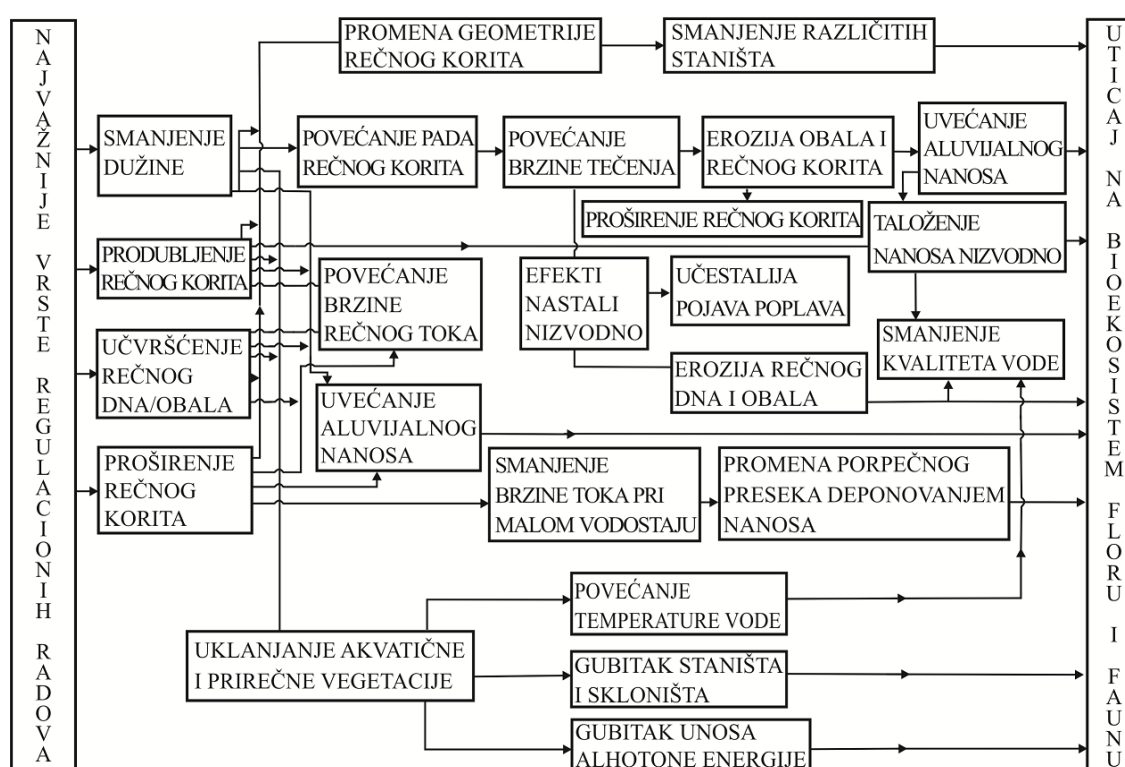
Nakon jakih promena (pritisaka usled ljudskih aktivnosti), reka teži da se vrati svojim inicijalnim parametrima, konzistentnim prirodnim uslovima, ali samo ako su interventni radovi pravilno osmišljeni i izvedeni.

Konstrukcije koje se ne mogu prilagoditi tokom procesa dinamičkog rebalansa (zbog njihove krutosti i neprirodnosti) nažalost, promeniće dugotrajno morfologiju reke, izvršiti denaturalizaciju i ugroziti ekološku ravnotežu rečnog toka na mnogo većoj deonici od one na kojoj se izvode radovi [Wasson et al.,1998].

4.2 UTICAJ REGULACIONIH RADOVA NA ŽIVOTNU SREDINU

Sistem života ljudi na planeti predstavlja interaktivnu silu, sklopljenu od aktivnosti ljudi i njihovih institucija, ekološki zavisnih koji nepovratno utiču na životnu okolinu [Marković, 2004]. U prirodnim uslovima, proces koji se sastoji od toka „*uticaj – reakcija – rehabilitacija*” životne sredine je proces koji zahteva vreme i biće skoro zagarantovano uspešan. Obnova rečnog korita nakon morfološke modifikacije je moguća, ali ako su priroda konstrukcije, ugrađeni materijali i lokacija konstrukcije neadekvatni, obnova ekosistema je malo verovatna.

Utjecaji regulacionih konstrukcija su brojni i složeni i sažeto su prikazani na sledećoj šemi (slika 4.1) [Wasson et al., 1998].



Slika 4.1. Uticaj regulacionih radova na životnu sredinu

Smanjenjem broja morfoloških oblika korita reka velike dubine (u konkavama) i smanjenjem nestalnosti oblika rečnog korita prouzrokuje se smanjenje raspoloživih habitata endemskih vrsta i riblje populacije.

Reke i njihovi koridori čine kompleksni ekosistem koji uključuje njihovu inundaciju, floru, faunu i rečne tokove.

Ovi ekosistemi zavise od režima rečnih tokova u kojima proticaj, transport sedimenata, temperatura vode i druge promenljive imaju jasno definisanu ulogu. U slučaju promene ovih promenljivih u odnosu na postojeće stanje u prirodi, prirodna ravnoteža je poremećena. To je razlog zbog čega uređenje reka građevinskih konstrukcijama treba da bude usmereno ka

održavanju globalne dinamičke ravnoteže rečnog toka u vremenu i prostoru. Izrada nasipa na dugim sektorima rečnog toka ne dovodi samo do smanjenja biodiverziteta akvatične sredine već i do povećanja maksimalnih proticaja.

Novi koncept uređenja reka, „više prostora za reku”, podrazumeva usaglašavanje socijalnih i ekonomskih zahteva, snabdevanje vodom, zaštitu od poplava kao i druge, sa ekološkim zahtevima. Zbog toga treba obezbediti kontinuitet reke i njenu vezu sa terenima koji se plave, pa će se tako što će se formirati staništa (vlažne zona) neophodna za očuvanje akvatične flore i faune, ublažavanje poplava i zadržavanje nutrijenata. Povezivanjem sa plavnim poljima, stvaraju se novi prostori za ublažavanje poplava i novi prostori za prirodu, gde će se razviti novi ekosistemi koji omogućuju optimalne uslove za akvatičnu floru i faunu kao i za rekreaciju i turizam [Wasson et al., 1998].

Treba napomenuti da postoji i poseban uticaj na životnu sredinu koji stvaraju gradilišta. Ova vrsta uticaja je, obično, vrlo uporna i prostire se na mnogo većoj oblasti od one u kojoj se odvijaju radovi.

Uticaj gradilišta se može osetiti na vrlo velikim distancama. U nekim slučajevima, uticaj nastao tokom izvođenja radova je veoma veliki i obično dodatno zagađuje okolinu (zamućenja, ulje i goriva mašina, ostaci građevinskog materijala itd.).

Zato kod radova na uređenju koji se prostiru na većoj površini ili kod kojih se izvode i radovi na iskopu i nasipanju korita neophodno je da postoji i tehnološki projekat (organizacija izvođenja radova), u kome bi se precizirale sve važne mere koje obezbeđuju minimalni i prihvatljiv uticaj na životnu sredinu (pronalaženje i uređenje deponija, prilaza, odlaganje otpada, uslovi za kontrolu i održavanje mašina itd.). Tehnološki projekat dobija iste uslove kao i projekat uređenja i mora biti odobren zajedno sa njim.

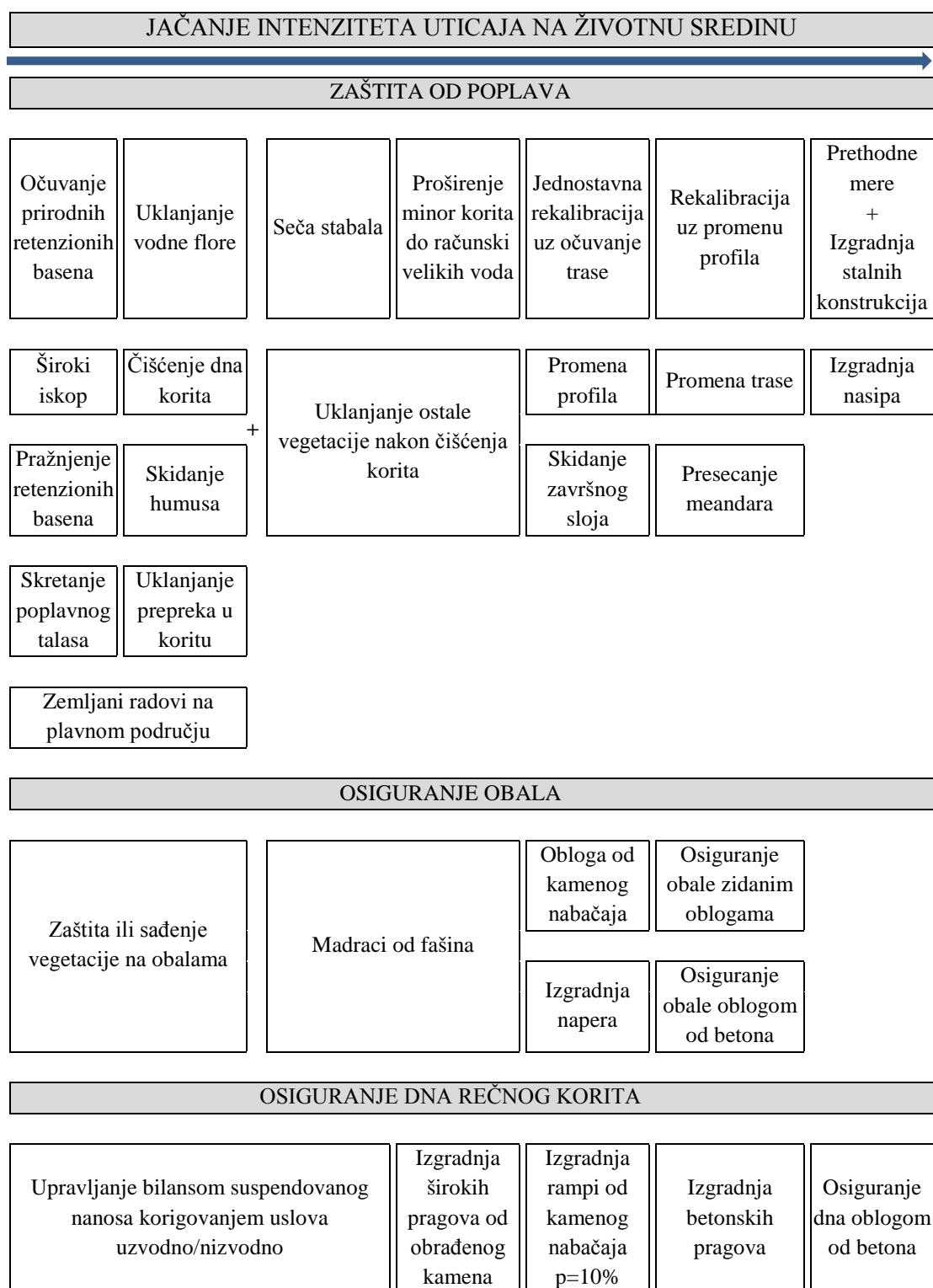
4.3 KLASIFIKACIJA REGULACIONIH RADOVA PREMA INTENZITETU UTICAJA NA ŽIVOTNU SREDINU

Intenzitet uticaja hidrotehničkih konstruktivnih rešenja na životnu sredinu zavisi u određenoj meri od tipa i prirode konstrukcija i pratećih regulacionih radova. Na sledećoj šemi (slika 4.2.), označene su glavne vrste regulacionih radova, grupisane prema cilju uređenja (zaštita od poplava, osiguranje obala i dna rečnog korita) [Wasson et al., 1998].

Tipovi konstrukcija čiji su intenziteti poređani počevši od najvećeg su: sva rešenja koja uključuju neprilagodljive konstrukcije (stalne konstrukcije) nasipi, rekalibrisanje sa rektifikacijom i reprofiliisanjem, presecanje meandra, betoniranje dna korita, betonski pragovi, zidane obloge, betoniranje obala. Sumiranjem tipova morfoloških uticaja, zapaža se da postoje tri značajna tipa neophodnih podataka: trenutni ili dugoročni uticaj, intenzitet uticaja i dugoročna stabilnost.

Intenzitet uticaja se deli u četiri klase: vrlo jak, jak, srednje jak i slab. U klasi vrlo jakih uticaja nalaze se sledeći tipovi radova: rektifikacija korita, reprofiliacija, presecanje krivina, izrada nasipa, derivacije i skretanja toka minor korita; u klasi jakih uticaja se nalaze smanjenje

vetlenda, izvođenje pragova ili pregrada i zaštita obala. Izgradnja nasipa i rektifikacija trase (sečenje krivina) imaju praktično nepovratne uticaje.



Slike 4.2. Osnovni tipovi regulacionih radova i njihov uticaj na životnu sredinu

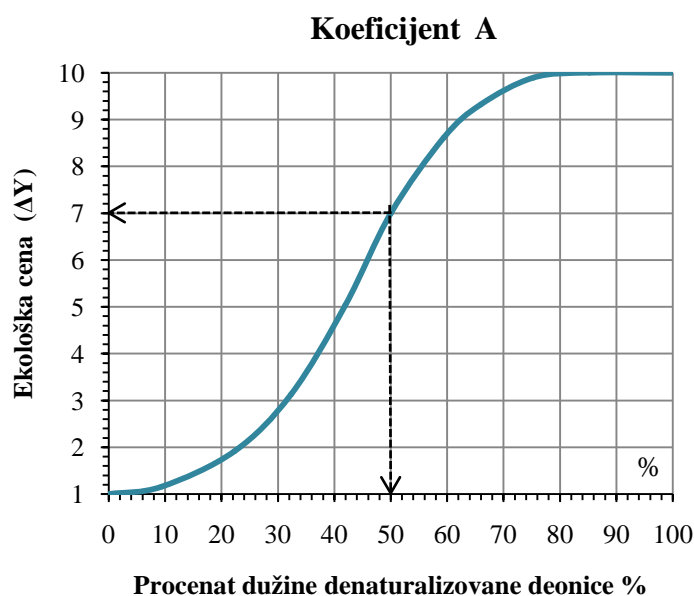
5 PROCENA UTICAJA KONSTRUKCIJA ZA UREĐENJE REČNIH TOKOVA NA ŽIVOTNU SREDINU

5.1 UTICAJ DENATURALIZACIJE REČNIH TOKOVA

U ovom poglavlju prikazan je metod za prethodnu procenu uticaja konstrukcija za uređenje rečnih tokova na životnu sredinu. Ovaj metod ima osnovnu primenu u uporednoj analizi različitih projektantskih rešenja računskim parametrom pod nazivom „globalni uticaj denaturalizacije vodotoka“, često kraće definisanim i kao „globalni uticaj – GI“. Ovaj metod je interesantan, jer omogućava procenu relativnih uticaja različitih parametara denaturalizacije i time usmerava izbor i tehničko unapređenje predloženih rešenja. Ukratko, ova metoda kvantifikuje vrednost „troškova zaštite životne sredine“ predloženih rešenja, odnosno njihovu „ekološku cenu“ („*environmental cost*“), a putem konceptualnih indikatora uticaja [Wasson et al., 1998]:

- Dužine denaturalizovane rečne deonice,
- Kategorije odnosno „*klasa vodotoka*“,
- Intenziteta agresivnosti regulacionih mera na promenu rečne morfologije,
- Vremenskog perioda trajanja uticaja.

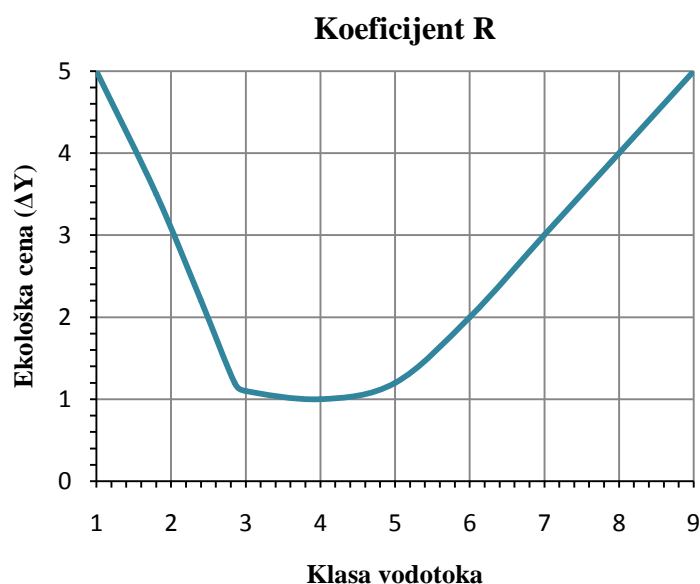
a. Dužina denaturalizovane rečne deonice predstavlja indikator uticaja predloženog rešenja kvantifikovanog koeficijentom *A*. Vrednost koeficijenta predstavlja ekološku cenu predloženog rešenja (slika 5.1) i zavisi od procenta dužine denaturalizovane deonice (odnosa dužine regulisane deonice, prema celokupnoj dužini deonice).



Slika 5.1. Ekološka cena regulisanja rečnog toka po jedinici dužine

Izbor predmetne deonice ima za cilj analizu deonice rečnog toka, ekološki i morfološki relativno homogene, prepoznatljivog naziva i izuzetnog državnog značaja. Na prethodnom dijagramu (slika 5.1), može se uočiti da regulisanje i implicitna denaturalizacija male deonice rečnog toka ima relativno mali ekološki uticaj, odnosno denaturalizacija do 25% dužine deonice ima relativno malu ekološku cenu, obzirom da preostali deo deonice u prirodnim uslovima, može da bude održivi nosilac postojećeg ekosistema. Denaturalizacijom 40% do 50% deonice rečnog toka, ekološki troškovi spektakularno rastu i ukazuju na ogroman rizik od ekološkog i morfološkog kolapsa. Konačno, denaturalizacija poslednjih 30% deonice, inicira ogromnu (maksimalno poznatu) ekološku cenu i praktično, samim tim, nestajanje prirodnog ekosistema [Wasson et al., 1998].

b. Klasa vodotoka kvantifikovana je koeficijentom R , a ekološka cena prikazana je na narednom dijagramu (slika 5.2).



Slika 5.2. Ekološka cena regulisanja rečnog toka prema klasi vodotoka

Najveću cenu ekoloških uticaja imaju rečni tokovi najmanje i najveće klase. Na rečnim tokovima velikog značaja i velike „vrednosti“ regulacioni radovi imaju značajan direktan i indirektan uticaj, koji podrazumeva i veliku ekološku cenu. Rečni tokovi niže klase, sa manjim hidrografskim basenima i sa neadekvatnim ekološkim uslovima su praktično ekološki uništeni kanalisanjem prirodnog rečnog korita.

Samim tim je ekološka cena relativno visoka [Wasson et al., 1998].

c. Intenzitet uticaja regulacionih radova kvantifikuje razliku morfologije rečnog toka nakon izvedenih regulacionih radova i prirodne morfologije rečnog toka, koja odgovara dinamičkoj ravnoteži rečnog toka. Kvantifikovanje intenziteta uticaja, vrši se pomoću osam veoma značajnih „faktora uticaja I^* “ koji dokazano imaju snažan uticaj na životnu sredinu. Svaki od

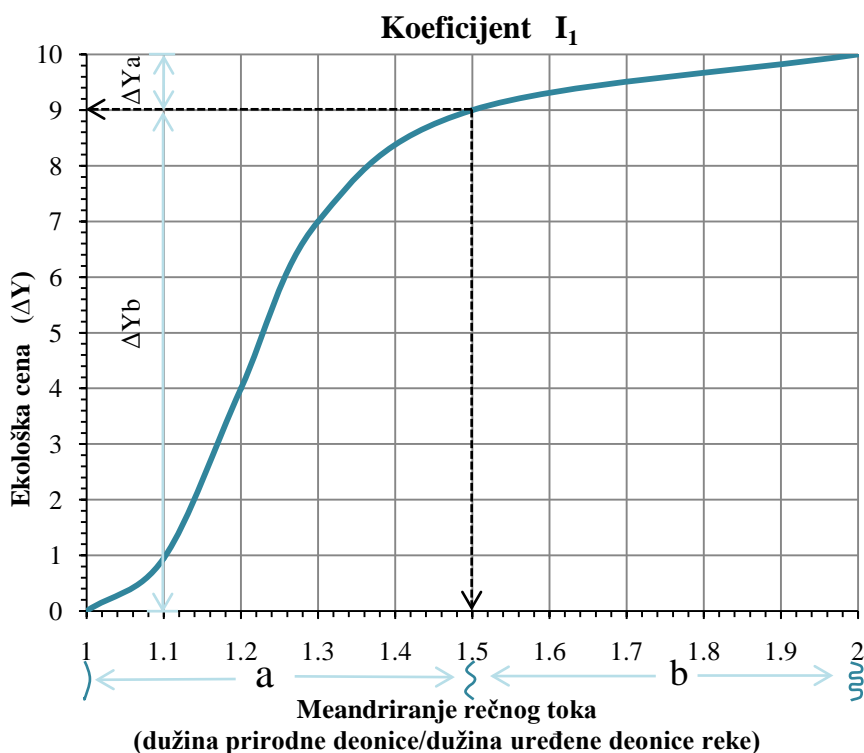
faktora, kvantifikovan je egzaktnim parametrima (koeficijentima) vrednovanja promene ekosistema.

Ovo podrazumeva da se za svaki od ovih uticaja, na osnovu dijagrama, očitava ekološka cena, a čija je vrednost izražena koeficijentima I_i ($i=1, \dots, 8$) [Wasson et al., 1998].

Faktor uticaja 1 – izmena prirodne rečne trase, odnosno presecanje rečnih krivina, smanjenje prirodnih rečnih meandara i rečnih rukavaca.

Ova promena se može jedino kvantifikovati uporednom analizom starih originalnih mapa i ortofoto snimaka.

Ekološka cena ovih regulacionih mera izražena je koeficijentom I_i , a određuje se pomoću dijagrama na slici 5.3.



Slika 5.3. Ekološka cena izmene rečne trase

Meandriranje rečne trase (odnosno sinusoidnost rečne trase) S definisano je kao odnos razvijene dužine prirodnog rečne trase (mereno po matici, što predstavlja realnu dužinu toka) i ispravljene dužine regulisane odnosno projektovane rečne trase.

Na dijagramu (slika 5.3), očitana ekološka cena ΔY , predstavlja razliku odgovarajućih vrednosti meandriranja reke pre i nakon izvedenih regulacionih radova.

Primer: Razlika u sinusoidnosti $b=0.5$, između $S=1.5$ (prirodne rečne trase) i $S=1$ (izmenjene rečne trase), implicira ekološku cenu $\Delta Y_b=9-0=9$ (što znači 90% ukupne maksimalne ekološke

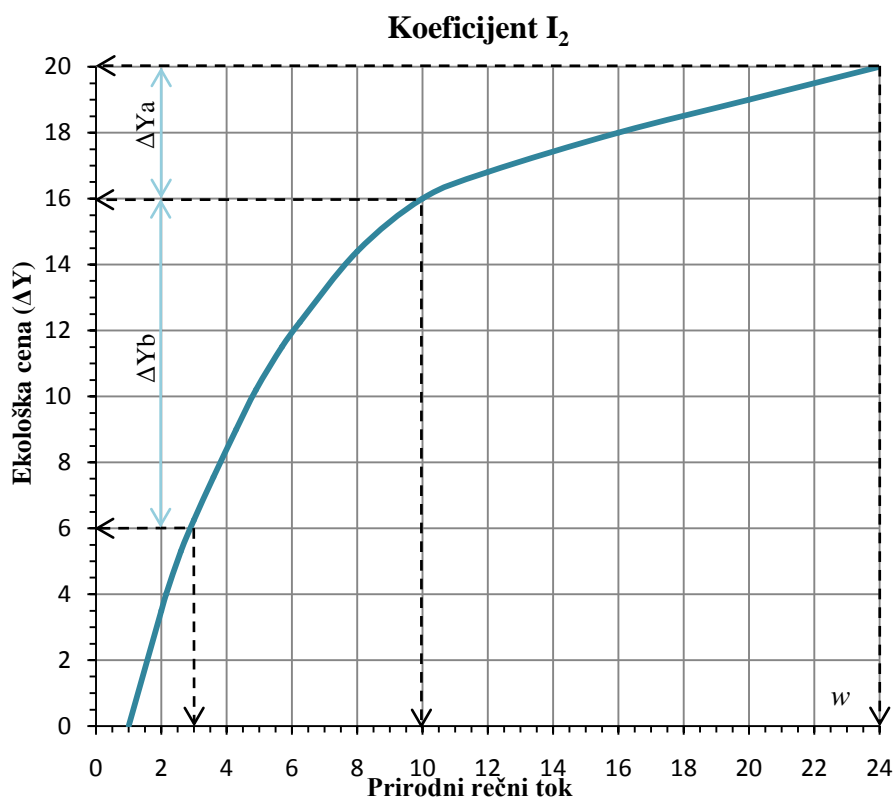
cene), dok razlika sinusoidnosti $a=0.5$, nastala korekcijom trase rečnog toka od $S=2$ do $S=1.5$, implicira malu ekološku cenu $\Delta Y_a=10-9=1$ (što znači samo 10% ukupne maksimalne ekološke cene).

Ovo zapažanje je veoma značajno, obzirom da kod donosioca odluka, često nedovoljno stručnih (kao što su investitori radova, često i projektanti, a nekada i nadležni organi), postoji opšteprihvaćeno mišljenje, da izmena rečne trase manjeg meandriranja nema ekološki značajan uticaj, što može prouzrokovati ozbiljne negativne dugotrajne posledice na rečni ekosistem.

Faktor uticaja 2 – suženje rečnog toka, meri se stepenom suženja prirodnog rečnog koridora, nastalog izgradnjom odbrambenih nasipa pored vodotoka.

Širina slobodnog rečnog toka, procenjuje se na osnovu stvarne širine korita malih voda (minor korita) w , uzete za prirodnu mernu jedinicu. Aluvijalne reke, prirodne rečne ravnoteže, imaju srednju vrednost slobodnog rečnog toka od $12w$.

Ekološka cena se izražena je koeficijentom I_2 i očitava se sa dijagrama na slici 5.4.



Slika 5.4. Ekološka cena suženja rečnog toka

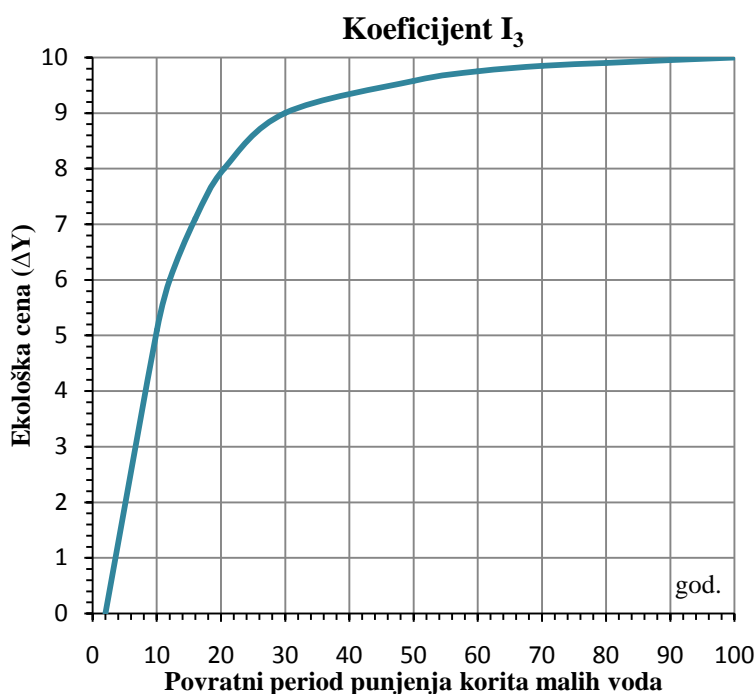
Očigledno je da je ekološka cena raste ukoliko je veći prostor (širina) slobodnog rečnog toka. Suženje prirodnog rečnog toka, već relativno male širine, ($S_L=b=10 \cdot w-3 \cdot w=7 \cdot w$), ima veću ekološku cenu ($\Delta Y_b=16-6=10$) u odnosu na rečne tokove veće širine ($S_L=a=24 \cdot w-10 \cdot w=14 \cdot w$),

pa se može uočiti da ekološka cena ima recipročnu vrednost u odnosu na širinu postojećeg prirodnog rečnog toka ($\Delta Y_a = 20 \cdot w - 16 \cdot w = 4 \cdot w$).

Konsekventno, prirodni rečni tokovi, relativno male širine, mnogo su ozbiljnije ugroženi izgradnjom odbrambenih nasipa u odnosu na rečne tokove veće širine [Wasson et al., 1998].

Faktor uticaja 3 – promena povratnog perioda punjenja korita malih voda. Uobičajeno je, da je povratni period punjenja korita malih voda, jednom u dve godine. Vrednost ovog koeficijenta određuje se hidrološkom studijom promene maksimalnih godišnjih proticaja.

Ekološka cena izražena je koeficijentom I_3 i određuje se korišćenjem dijagrama na slici 5.5. Za reke, relativno malog povratnog perioda punjenja korita malih voda (manje od deset godina), ekološka cena je veća nego u slučaju većeg povratnog perioda [Wasson et al., 1998].



Slika 5.5. Ekološka cena promene povratnog perioda punjenja korita malih voda

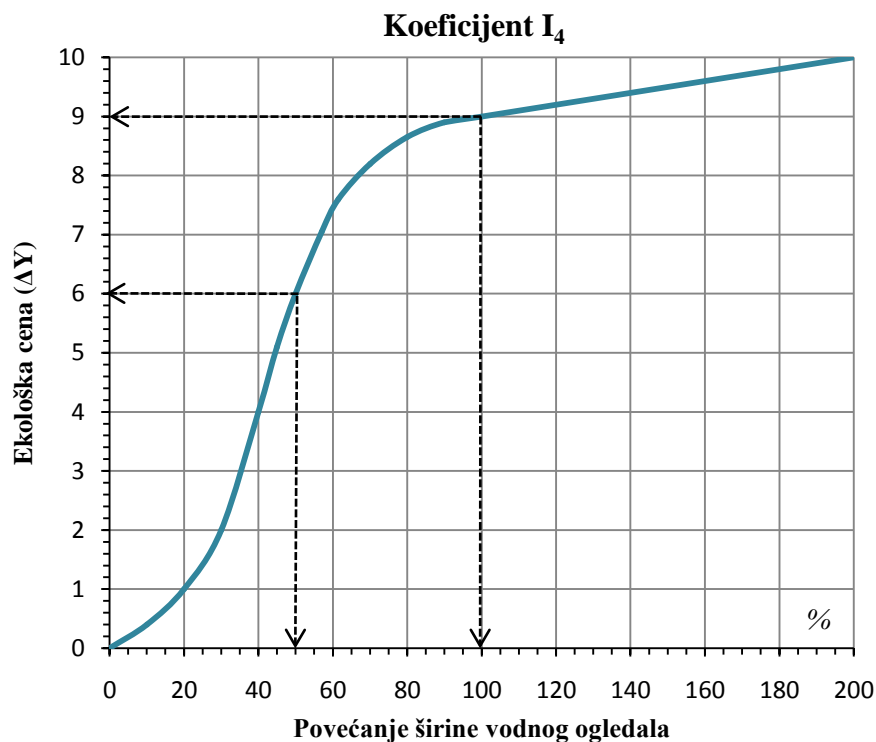
Faktor uticaja 4 – povećanje širine vodnog ogledala pri malim vodama (minimalni srednji mesečni proticaj) može izazvati smanjenje srednje dubine rečnog toka, ekstremno letnje zagrevanje vode u rečnom koritu, zamrzavanje vode u zimskom periodu i zasipanje rečnog dna. Ovaj uticaj se kvantifikuje u procentima u odnosu na prirodnu širinu rečnog korita. Vrednost ekološke cene se izražava preko koeficijenta I_4 i određuje se dijagramom sa slike 5.6.

Faktor uticaja 5 – promena fizičkih svojstava staništa i njihove konektivnosti ima više parametarskih indikatora:

- nestanak naglih dubina u rečnom toku, što čini glavnu promenu fizičkih svojstava staništa,

- promenu strukture skloništa, koja su po prirodi ili mineralna ili vegetaciona.

Vrednost ekološke cene izražava se preko koeficijenta I_5 i određuje se uz pomoć tabele 5.1.



Slika 5.6. Ekološka cena povećanja širine vodnog ogledala pri malim vodama

Promena fizičke strukture staništa	Ekološka cena	
	Energija toka	
	Velika	Mala
1 = Uklanjanje drvenastih biljaka sa obala rečnog korita	3	7
2 = 1+ Nivelisanje obale reke (nasipanje, uklanjanje zaostalih kamenih blokova, postojećih obloga)	7	10
3 = 2+ Uklanjanje prepreka iz rečnog toka (kamenih i drvenih konstrukcija)	12	12
4 = 3+ Promena profila, blaga ili gruba nivelacija površina	20	20

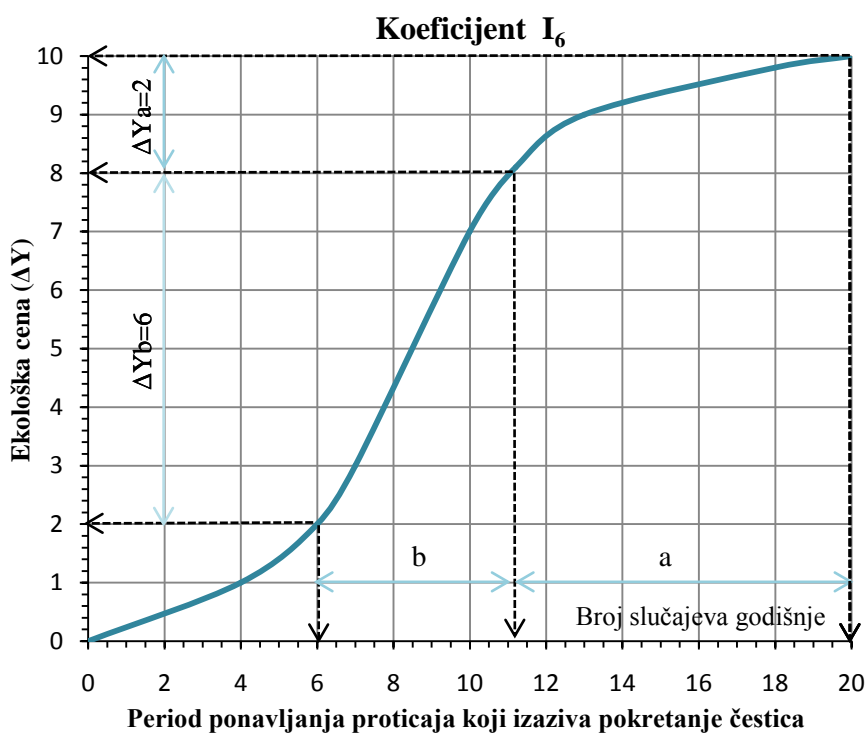
Tabela 5.1. Ekološka cena promene fizičke strukture staništa I_5

Faktor uticaja 6 – promena strukture materijala u rečnom koritu, obično je izazvana zemljanim regulacionim radovima koji utiču na granulometrijski sastav rečnog korita. Proticaj koji izaziva pokretanje čestica sa rečnog dna, dobija se hidrauličkim proračunima. Period ponavljanja ovog proticaja omogućava procenu rizika nestabilnosti rečnog korita. Poređenje

razlike učestalosti pokretanja čestica pre i nakon regulacionih radova, omogućava određivanje nestabilnosti rečnog dna sa većom tačnošću.

Ekološka cena promene strukture rečnog korita izražava se preko koeficijenta I_6 i određuje se korišćenjem dijagrama na slici 5.7. Sa dijagrama se može videti da je za razliku male učestalosti proticaja koji izazivaju pokretanje čestica sa rečnog dna, recimo $b=11.2-8=3.2$ slučaja godišnje, ekološka cena $\Delta Y_b=8-2=6$, dok je istovremeno za razliku većih učestalosti proticaja koji izazivaju pokretanje čestica ekološka cena mnogo manja, $a=20-11.2=8.8$ slučaja godišnje, odnosno $\Delta Y_a=10-8=2$.

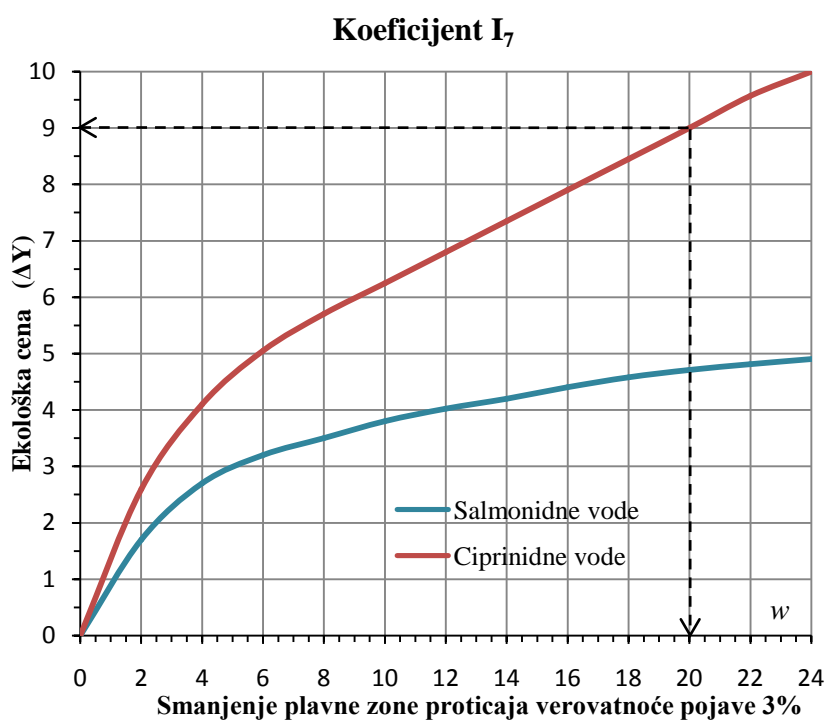
Prognoza zasipanja odnosno izdizanja rečnog dna je izuzetno složena i u ovom radu nije bila predmet analize. Takođe, treba napomenuti, da prekomerna stabilizacija odnosno fiksiranje dna rečnog korita stvara ozbiljnu promenu funkcija ekosistema [Wasson et al., 1998].



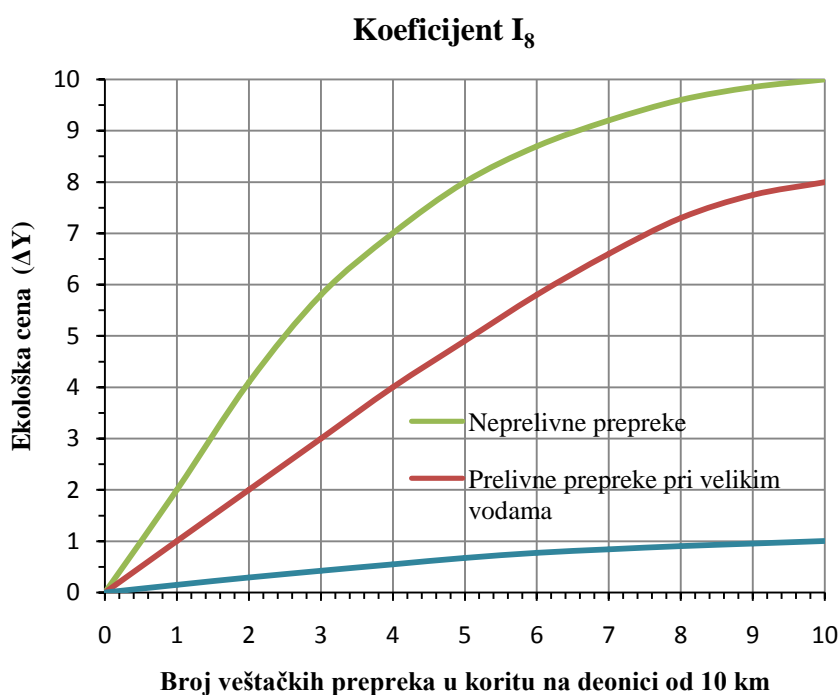
Slika 5.7. Ekološka cena promene strukture materijala u rečnom koritu

Faktor uticaja 7 – gubitak lateralnih veza, kvantifikuje se smanjenjem širine plavne zone povratnog perioda jednom u 30 godina, u odnosu na realnu širinu minor korita w . Vrednost ekološke cene izražava se koeficijentom I_7 i određuje se na osnovu dijagrama na slici 5.8.

Faktor uticaja 8 – izgradnja veštačkih prepreka na ribljem putu, ima važan uticaj koji mora biti kvantifikovan na celoj razmatranoj deonici. Ovaj uticaj se kvantifikuje ocenom mogućnosti prelaska ribe preko poprečnih konstrukcija u rečnom toku, u uslovima različitih proticaja i broja prepreka na ribljem putu po km deonice. Vrednost ekološke cene prepreka se izražava preko koeficijenta I_8 i određuje se na osnovu dijagrama na slici 5.9.



Slika 5.8. Ekološka cena smanjenja lateralnih veza



Slika 5.9. Ekološka cena veštačkih prepreka na ribljem putu

Ukupan uticaj denaturalizacije rečnog korita po jedinici dužine predstavlja sumu prethodno navedenih koeficijenata $I_1...I_8$.

d. Vremenski period trajanja uticaja predstavlja veoma važan činilac čija procena uključuje definisanje tri faktora:

- postojanosti uticaja konstrukcija na morfologiju rečnog toka (zavisi od reverzibilnog uticaja regulacionih radova),
- reverzibilnog procesa akumuliranja uticaja regulacionih radova,
- mogućnost intenziviranja nekih oblika uticaja u dužem vremenskom periodu, naročito ukoliko je morfološka dinamika rečnog toka van ravnoteže.

Reverzibilnost uticaja konstrukcija na životnu sredinu može se proceniti primarnom analizom prirode konstrukcija i prirode potencijalne energije (snage) rečnog toka.

Na osnovu rezultata, rešenju se dodeljuje multiplikacioni koeficijent T , koji u stvari predstavlja procenjeno vreme trajanja uticaja konstrukcije (životni vek konstrukcije) odnosno ukupno trajanje uticaja redovnih regulacionih radova (obe mere se definišu brojem godina).

Indeks globalnog uticaja rešenja, uslovljen je opštim rešenjem $GIPS$ i određuje se narednom formulom:

$$GIPS = L \cdot I \cdot T \cdot \frac{w^2}{10^4} \quad (5.1)$$

$$L = \frac{l}{w} \cdot A \cdot R \quad (5.2)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_8 \quad (5.3)$$

gde je:

L – dužina posmatrane deonice rečnog toka, izražene u širinama minor korita w [m],

I – ukupni koeficijent intenziteta uticaja [-],

$I_1 \dots I_8$ – parcijalni koeficijenti intenziteta uticaja [-],

w^2 – površina linearne jedinice regulisanog rečnog toka [ha],

A – koeficijent dužine denaturalizovane rečne deonice [-],

R – koeficijent klase vodotoka [-],

T – koeficijent vremenskog perioda trajanja uticaja [-].

Određivanje globalnog indeksa uticaja koristi se za poređenje rešenja uređenja rečnog toka u fazi projektovanja, da bi se prema morfološkim i ekološkim kriterijuma pronašlo najpovoljnije rešenje, i da bi se donela odluka o merama rehabilitacije pojedinih deonica rečnog toka.

Vrednost indeksa GIPS može biti jedan od kriterijuma odlučivanja u višekriterijumskoj analizi.

5.2 UTICAJ KONSTRUKTIVNIH REŠENJA NA DENATURALIZACIJU REČNIH KORITA

Obzirom da analiza u poglavlju 5.1. uzima u obzir samo opšta rešenja uređenja, neophodno je uzeti u obzir i intenzitet uticaja konkretnih konstruktivnih rešenja uređenja rečnih korita.

Karakterizacija i klasifikacija svih konstruktivnih rešenja je detaljno prikazana u poglavlju 2.3.

Sa ovog stanovišta, a prateći model definisanja ekološke cene opisane u poglavlju 5.1, procena ekološke cene konstruktivnih rešenja određena je prema tabeli 5.2.

Dobijeni rezultat predstavlja „indeks intenziteta uticaja“ i označen je sa I_c .

Indeks globalnog uticaja konstruktivnih rešenja određuje se, preuzimanjem vrednosti indeksa A (dužine denaturalizovane rečne deonice), R (kategorije odnosno „klasa vodotoka“, tabela 5.3) i T (vremenskog perioda trajanja uticaja, tabela 5.4) iz poglavlja 5.1, označava se sa $GICS$ i definisan je izrazom:

$$GICS = A \cdot R \cdot I_c \cdot T \cdot \left(\frac{l}{w} \right) \cdot \frac{w^2}{10^4} \quad (5.4)$$

Prilagodljivost konstrukcije	Priroda materijala	Rast vegetacije		
		Povoljan	Nepovoljan	Specijalan
Plastične konstrukcije	Prirodan	0	2	-
	Mešovit	2	4	1
	Veštački	4	7	4
Krute konstrukcije	Prirodan	4	8	-
	Mešovit	6	9	5
	Veštački	8	10	6
Konstrukcije ograničenih pomeranja	Prirodan	2	5	-
	Mešovit	4	7	3
	Veštački	6	8	5

Tabela 5.2. Ekološki troškovi konstruktivnih rešenja I_c

Srednji proticaj na deonici (m^3/s)	Ekološki interes	Klasifikacija prema kvalitetu vode			
		Kategorija			
		I	II	III	IV
$Q_m < 1.0$	Da	7	5	3	-
	Ne	5	3	2	1
$1.0 \leq Q_m < 5.0$	Da	8	6	4	-
	Ne	7	5	3	2
$5.0 \leq Q_m < 20.0$	Da	9	7	5	-
	Ne	8	6	4	2
$20.0 \leq Q_m < 50.0$	Da	9	8	6	-
	Ne	8	7	5	3
$Q_m > 50.0$	Da	9	9	7	-
	Ne	9	8	6	4

Tabela 5.3. Definisiranje klase vodotoka *R*

Osnovni princip održivog upravljanja rečnim tokovima je dostupnost dobrih kvalitetnih podataka i stručna procena zasnovana na egzaktnim naučnim saznanjima.

Metode kojima se karakteriše morfologija rečnih tokova i određuje kvalitet akvatičnih staništa postaju sve važnije u procesu donošenja odluke u procesu planiranja zaštite životne sredine, a posebno kao komponente procene uticaja na životnu sredinu [Raven et al, 2002].

Određivanje ekološkog statusa zasniva se na kalibraciji, a prema „referentnim“ uslovima za datu klasu rečnog toka. Osnovne fizičke karakteristike referentnih uslova (prirodne rečne morfologije), koje oslikavaju „odličan“ ekološki status rečnih tokova, mogu biti direktno dobijene formiranjem mreže rečnih deonica, koje se usvojene kao „sasvim ili skoro sasvim netaknute“.

Ako ovakve mreže ne postoje za određenu klasu rečnog toka, fizička svojstva se mogu dobiti posredno - modeliranjem ili ekspertskom analizom.

Po definiciji, rečni tokovi neizmenjene fizičke strukture, odnosno odličnog hidromorfološkog statusa, ukoliko imaju dobar kvalitet vode, podržavaju akvatična staništa odličnim ekološkim statusom [Raven et al, 2002].

Ovakve referentne rečne deonice, sa najboljim karakteristikama rečnih staništa i kvaliteta vode, kod nas se nalaze u nerazvijenim područjima, obzirom da su vodni tokovi u nerazvijenim područjima izloženi pritiscima veoma malo, što podrazumeva da su skoro netaknuti.

Takođe je važno istaći da, rečni tokovi u ovim krajevima imaju i najbolji kvalitet rečne vode, pa uglavnom pripadaju I klasi vodotoka [Urošev et al., 2009].

Odličan ekološki status voda
<p><i>Biološki elementi kvaliteta:</i></p> <p>Vrednosti bioloških parametara površinskih voda odražavaju tipične vrednosti za taj tip voda u neporemećenim uslovima, odnosno pokazuju veoma mala, ili nikakva odstupanja.</p> <p>Taksonomski sastav fitoplanktona potpuno, ili gotovo potpuno, odgovara neporemećenim uslovima. Struktura zajednice fitoplanktona potpuno, ili gotovo potpuno, odgovara neporemećenim uslovima.</p> <p>Zajednica fitoplanktona ne utiče značajno na uslove prozirnosti za dati tip voda.</p> <p>Taksonomski sastav potpuno, ili gotovo potpuno, odgovara neporemećenim uslovima.</p> <p>Nema primetnih promena prosečne zastupljenosti makrofita i fitobentosa u odnosu na zajednicu tipičnu za dati tip voda u neporemećenim uslovima.</p> <p>Taksonomski sastav i struktura zajednica potpuno, ili gotovo potpuno, odgovaraju onim u neporemećenim uslovima.</p> <p>Raznovrsnost ne odstupa, ili minimalno odstupa, od one koja je karakteristična za neporemećene uslove. Broj taksona osetljivih na pritiske ne odstupa, ili minimalno odstupa, u odnosu na onaj koji je tipičan za neporemećene uslove. Taksonomski sastav i struktura zajednica potpuno, ili gotovo potpuno, odgovaraju onim u neporemećenim uslovima.</p> <p>Raznovrsnost ne odstupa, ili minimalno odstupa, od one koja je karakteristična za neporemećene uslove. Prisutne su sve vrste osetljive na poremećaje, a koje su tipične za dati tip voda. Starosna struktura ribljih zajednica pokazuje malo znakova antropogenih poremećaja i ne ukazuje na prekid u reprodukcijom ili razvojnom lancu bilo koje riblje vrste.</p>
<p><i>Hemijski i fizičko-hemijski elementi kvaliteta:</i></p> <p>Vrednosti hemijskih i fizičko-hemijskih parametara potpuno ili gotovo potpuno odgovaraju neporemećenim uslovima. Koncentracija nutrijenata ostaju u granicama uobičajenim za neporemećene uslove.</p>
<p><i>Hidromorfološki elementi kvaliteta:</i></p> <p>Količina vode i dinamika toka, kao i povezanost s podzemnim vodama, potpuno ili gotovo potpuno odražavaju neporemećeno stanje.</p> <p>Kontinuiranost rečnog toka nije narušena antropogenim aktivnostima i dozvoljava neporemećenu migraciju akvatičnih organizama i pronos nanosa.</p> <p>Oblik korita, varijacije širine i dubine, brzina toka, stanje rečnog dna, kao i struktura i stanje priobalja, potpuno ili gotovo potpuno odgovaraju neporemećenim uslovima.</p> <p>Varijacije dubine jezera, količina i struktura nanosa kao i struktura i stanje priobalne zone jezera potpuno ili gotovo potpuno odgovaraju neporemećenim uslovima.</p>

Dobar ekološki status voda
<p><i>Biološki elementi kvaliteta:</i></p> <p>Vrednosti bioloških parametara ukazuju na nizak nivo promena izazvanih ljudskom aktivnošću, i neznatno odstupaju od vrednosti uobičajenih za dati tip površinskih voda u neporemećenim uslovima.</p> <p>Beleže se male promene u sastavu i strukturi zajednice fitoplanktona u odnosu na zajednice tipične za neporemećene uslove.</p> <p>Te promene ne utiču povećanje produkcije algi, koje bi dovelo do poremećaja ravnoteže u zajednicama, ili do promena fizičko-hemijskog kvaliteta vode ili nanosa. Moguće je povremeno, kratkotrajno cvetanje planktona.</p> <p>Beleže se male promene u sastavu i strukturi zajednica makrofita i fitobentosa, u odnosu na zajednice koje su tipične za dati tip voda u neporemećenim uslovima.</p> <p>Te promene ne ukazuju na povećan intenzitet obraštaja fitobentosa, ili povećanu produkciju makrofita, koji mogu dovesti do promena u strukturi i funkcionalnosti vodenog ekosistema, ili do promena fizičko-hemijskog kvaliteta vode, ili nanosa.</p> <p>Zajednica fitobentosa nije izložena negativnom uticaju obraštaja bakterija, nastalog kao posledica antropogene aktivnosti. Beleže se male promene u odnosu na taksonomski sastav i strukturu zajednica u odnosu na one koji odgovaraju potpuno, ili gotovo potpuno, neporemećenim uslovima.</p> <p>Raznovrsnost malo odstupa od one koja je karakteristična za neporemećene uslove.</p> <p>Broj taksona osetljivih na pritiske malo odstupa u odnosu na onaj koji je tipičan za neporemećene uslove. Postoje male promene sastava i zastupljenosti vrsta u odnosu na tipične zajednice, koje se mogu pripisati antropogenom uticaju.</p> <p>Starosna struktura ribljih zajednica pokazuje znakove poremećaja, koji se mogu pripisati antropogenom uticaju i koji, u pojedinim slučajevima, ukazuju na prekid u reprodukcijom ili razvojnom ciklusu određene vrste, do te mere da pojedine starosne kategorije mogu nedostajati.</p>
<p><i>Hemijski i fizičko-hemijski elementi kvaliteta:</i></p> <p>Vrednosti hemijskih i fizičko-hemijskih parametara ne prevazilaze vrednosti koje utiču na funkcionalnost ekosistema i razvoj zajednice koja odgovara datom statusu.</p> <p>Koncentracije nutrijenata ne prelaze nivoe uspostavljene da obezbede funkcionisanje ekosistema i postizanje gore navedenih vrednosti bioloških elemenata kvaliteta.</p>
<p><i>Hidromorfološki elementi kvaliteta:</i></p> <p>Uslovi odgovaraju vrednostima bioloških parametara koji su tipični za dati status.</p> <p>Uslovi odgovaraju vrednostima bioloških parametara koji su tipični za dati status.</p> <p>Uslovi odgovaraju vrednostima bioloških elemenata kvaliteta koji su tipični za dati status.</p>

Umeren ekološki status voda
<p><i>Biološki elementi kvaliteta:</i></p> <p>Vrednosti bioloških parametara kvaliteta umereno odstupaju od vrednosti uobičajenih za dati tip površinskih voda u neporemećenim uslovima.</p> <p>Vrednosti pokazuju umerena odstupanja, koja su posledica ljudskih aktivnosti, a poremećaji su znatno veći nego u uslovima dobrog statusa.</p> <p>Sastav planktona umereno se razlikuje od tipičnih zajednica.</p> <p>Abundanca umereno odstupa od one koja je tipična za neporemećene uslove i može izazvati poremećaje vrednosti drugih bioloških i fizičko-hemijskih elemenata kvaliteta.</p> <p>Moguće je umereno povećanje učestalosti i intenziteta cvetanja planktona.</p> <p>Moguća je pojava dugotrajnog cvetanja u letnjim mesecima.</p> <p>Sastav zajednica makrofita i fitobentosa umereno se razlikuje od zajednica tipičnih za neporemećene uslove, a znatno je jače narušen nego u dobrom statusu.</p> <p>Očite su umerene promene prosečne zastupljenosti makrofita i fitobentosa.</p> <p>Fitobentosna zajednica može biti pod uticajem bakterijskog obraštaja, koje nastaju kao posledica antropogenih aktivnosti, ali u ograničenim područjima.</p> <p>Sastav i struktura zajednice umereno se razlikuju od onih koje su tipične za neporemećene uslove.</p> <p>Taksonomske grupe koje su tipične za zajednice neporemećenih uslova mogu odsustvovati.</p> <p>Odnos osetljivih i neosetljivih taksonomskih elemenata i stepen raznovrsnosti znatno su niži od tipičnih za neporemećene uslove.</p> <p>Sastav i zastupljenost ribljih vrsta umereno se razlikuju od tipičnih zajednica, što se može pripisati antropogenom uticaju.</p> <p>Starosna struktura ribljih zajednica pokazuje veće znake poremećaja, do te mere da je deo tipičnih vrsta odsutan, ili veoma zastupljen sa niskom abundancom.</p>
<p><i>Hemijski i fizičko-hemijski elementi kvaliteta:</i></p> <p>Uslovi odgovaraju vrednostima bioloških parametara koji su tipični za dati status.</p>
<p><i>Hidromorfološki elementi kvaliteta:</i></p> <p>Uslovi odgovaraju vrednostima bioloških parametara koji su tipični za dati status.</p>

Tabela 5.4. Parametri ekološkog i hemijskog statusa površinskih voda

Specifična energija poplavnog talasa	Priroda regulacionih mera		
	Redovno održavanje	Primena teške građevinske mehanizacije	Sanacija konstrukcija
Velika specifična energija > 35 W/m ²	2 godine	5-20 godina	50-100 godina
Mala specifična energija < 35 W/m ²	5 godina	30-50 godina	100 godina

Tabela 5.5. Vremenski period trajanja uticaja *T*

5.3 KOMPLEKSNO PLANSKO UPRAVLJANJE REČNIM TOKOVIMA, PREMISE

Da bi se postigla politika održivog razvoja nameće se primena specifičnih metoda upravljanja u različitim domenima ljudske ekonomske i socijalne aktivnosti. Ove metode koje definišu dugoročna pravila upravljanja ekosistemima rečnih tokova, integrišu sva postojeća ograničenja vezana za održavanje ekoloških funkcija hidrosistema. Drugim rečima, integralno upravljanje rečnim tokovima treba da obezbedi socijalno-ekonomsko-ekološku ravnotežu bez isključenja niti jednog od faktora.

Ukratko, proces integralnog upravljanja ekosistemima (*quasi* - sinonim ekološkog inženjerstva ili bioinženjerstva), kao i neke karakteristične formulacije preuzete iz literature [Diaconu, 1999], su od naročito velike važnosti.

Motivi koji daju prednost integralnom upravljanju rečnim ekosistemima mogli bi biti sledeći:

- odgovornost prema budućim generacijama,
- održanje postojećih prirodnih resursa i životne sredine,
- opšti društveni interes (kvalitet vode, odbrana od poplava, odbrana od erozije i bujica, očuvanje vrednih endemskih vrsta),
- ekonomski interes (turizam, ribolov, rekreativne aktivnosti),
- očuvanje estetike pejzaža, kulturnog nasleđa, prostora za rekreativne aktivnosti,
- obrazovanje i naučna istraživanja u ovoj oblasti.

Ovi motivi mogu činiti deo „*kriterijuma*“ u komparativnoj analizi različitih alternativnih rešenja uređenja rečnog toka, a u cilju izbora konačnog rešenja i uslova izvođenja radova.

Ciljevi integralnog upravljanja rečnim ekosistemima, moraju se ogledati pre svega u zakonskim regulativama i normama u svim fazama delatnosti (i tokom izvođenje radova):

- tranzicija upravljanja usmerenog ka prema potrebama korisnika ka integralnom upravljanju, koje razmatra i uticaj ljudski aktivnosti,

- upravljanje rečnim ekosistemima, podrazumeva ne samo korišćenje prirodnih resursa u cilju ostvarivanja ekonomske dobiti, već i odgovorno upravljanje hidrosistemom koje garantuje obnovu ekosistema i održavanje njegovog prirodnog potencijala,
- pre lokalnog izvođenja radova, neophodno je uraditi sveobuhvatnu analizu, obzirom da se uticaj regulacionih radova širi na prostoru većem od onog na kom se izvode radovi, a i nakon finalno izvedenih radova.

Planska analiza ostvarivanja razvojnih ciljeva, u skladu sa zahtevima koji se nameću:

- kontinualnost (vremensku i prostornu),
- dugoročno planiranje,
- samostalno funkcionisanje,
- brza prilagodljivost.

Faze integralnog upravljanja ekosistemom trebaju biti sledeće:

- I Analiza postojećeg stanja i budućeg razvoja ekosistema – definisanje socijalno ekonomskih okvira razvoja. Klasifikacija i procena ekosistema.
- II Definisane socijalnih, ekonomskih i ekoloških ograničenja. Primer ograničenja i njihovo rangiranje dati su u tabeli 5.5:

Ekonomska ograničenja	Ekološka ograničenja
Nulti nivo (apsolutni prioritet)	
Rizik ugrožavanja ljudskih života.	Rizik ugrožavanja životinja ili akvatične vegetacije; nepovratne promene rečnog ekosistema.
Nivo 1	
Potrebe za vodom domaćinstva. Sigurnost naseljenih mesta (osim onih koja su skoro izgrađena sa određenim stepenom rizika)	Rizik nepovratnih promena prirodnih uslova šireg ekosistema. Zaštita oblasti velike ekološke vrednosti i staništa ugroženih vrsta.
Nivo 2	
Potrebe industrije za vodom. Zaštita od poplava u cilju smanjenja šteta (štete na poljoprivrednom, industrijskom, zemljištu, naseljima).	Održavanje ekološke funkcije područja srednje veličine, koja ima određenu ekološku vrednost ili postoji mogućnost poboljšanja (obnove) ekoloških karakteristika.

Tabela 5.6. Rangiranje ekonomskih i ekoloških ograničenja

- III Definisane ciljeva i mogućih scenarija, u skladu sa različitim ekonomskim, ekološkim i socijalnim namenama rečne deonice, a uz striktno poštovanje ograničenja. Namene

moгу predstavljati ciljeve upravljanja ekosistemom. Neophodno je izvršiti analizu svih postojećih racionalnih rešenja (tehničkih, ekonomskih, zakonskih, ekoloških).

IV Izbor pravca istraživanja i metodologije delovanja.

Glavni nivoi delovanja, koji se nameću zavisno od stanja rečne deonice koja se uređuje (a koji ne zavise od donosioca odluka) mogu biti:

- zaštita staništa prirodne deonice reke, ekosistema velike ekološke vrednosti, pejzaža ili kulturnog nasleđa,
- očuvanje (konzervacija) prirodne deonice reke zakonskim putem,
- sanacija blago oštećenih deonica reke,
- restauracija oštećenih deonica rečnog toka, koje omogućuju rehabilitaciju vrednog akvatičnog prostora,
- nadzor nad oštećenim deonicama ili kontrola ekonomskih aktivnosti, a u cilju smanjenja štete i promene šireg okolnog ekosistema.

6 IZBOR REŠENJA PRIMENOM METODA VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA

6.1 OSNOVNI PRINCIPI VIŠEKRITERIJUMSKOG ODLUČIVANJA

Donošenje odluka primenom metoda višekriterijumske analize (VKO), kao alata odlučivanja, podrazumeva tehniku procene više alternativnih rešenja. Tehnika višekriterijumskog odlučivanja predstavlja alat izbora ili formulacije atributa, različitih ciljeva i namena u kojima su ovi atributi i ciljevi razmatrani kao kriterijumi. Višekriterijumsko odlučivanje (VKO) se odnosi na situacije odlučivanja kada postoji veći broj, najčešće, konfliktnih kriterijuma. Upravo ova činjenica predstavlja značajan korak ka realnosti problema koji se mogu rešavati metodama višekriterijumskog odlučivanja. Naime, sve klasične optimizacione metode koriste samo jedan kriterijum pri odlučivanju, čime se ujedno i umanjuje realnost problema koji se mogu rešavati.

Kriterijumi predstavljaju mere, pravila ili standard smernica procesa odlučivanja. Kriterijumi su zasnovani na osnovnim ljudskim potrebama i interesnim vrednostima. Postoje dve kategorije višekriterijumskog odlučivanja (VKO), i to:

1. Višeciljno odlučivanje (VCO),
2. Višeatributivno odlučivanje (VAO).

Višeciljno odlučivanje (VCO) ocenjuje i rangira alternativna rešenja primenom tehnike matematičke optimizacije. Ove metode višekriterijumskog odlučivanja su veoma korisne pri oceni velikog (i do beskonačnog) broja alternativnih rešenja.

Naime, višeciljno odlučivanje se koristi i za rešavanje problema kontinualnog prostora, kao što je problem matematičkog programiranja. Ova vrsta odlučivanja podrazumeva projektovanje korišćenjem najbolje alternative [Ermatita et al., 2011].

Višeatributivno odlučivanje (VAO) ne podrazumeva eksplicitnu primenu matematičke analize. Ova vrsta višekriterijumskog odlučivanja karakteriše se potrebom izbora najprihvatljivijeg alternativnog rešenja iz malog skupa alternativnih pravaca.

Višeatributivno odlučivanje se koristi za rešavanje problema u diskretnim prostorima i uglavnom se koristi za rešavanje problema procene i izbora ograničenog broja alternativnih rešenja.

Proces višeatributivnog odlučivanja vrši se kroz dve faze, i to:

1. Agregacija odluka koje odgovaraju svakom cilju svih alternativnih rešenja,
2. Rangiranje alternativnih rešenja na osnovu agregacija donosioca odluka [Ermatita et al., 2011].

Višeatributivno odlučivanje vrši procenu alternativnih rešenja A_i ($i=1,2,\dots,m$) na osnovu definisanog skupa atributa ili kriterijuma C_j ($j=1,2,\dots,n$), pri čemu atributi ne zavise međusobno jedan od drugih [Kusumadewi et al., 2006].

Model ocene realnih alternativnih rešenja u odnosu na svaki od atributa, prikazan je matricom odlučivanja X :

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Pri čemu je X_{ij} ocena alternativnog rešenja u odnosu na j -ti atribut. Težinska vrednost alternativnog rešenja ukazuje na relativnu važnost svakog atributa, prikazanog u matematičkom modelu kao vektor W :

$$W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$$

Nominalna (X) i težinska vrednost (W) predstavljaju osnovne ocene koje odgovaraju apsolutnim preferencijama donosioca odluka. Problemi višeatributivnog odlučivanja finalizovani su alternativnim procesom dobijanja najbolje rangiranog rešenja na osnovu ukupne vrednosti dodeljenih preferencija [Ermatita et al., 2011].

Metode višekriterijumskog odlučivanja su vrlo korisne i neophodne naročito u slučaju izbora rešenja koja su klasifikovana prema različitim kriterijumima, a pri tom se konačna ocena alternativnog rešenja ne može dovesti na prirodnu zajedničku jedinicu mere.

Postoje brojne istraživačke metode koje omogućuju višekriterijumsko odlučivanje, a široko su primenjivane svetskoj literaturi, od kojih su neke klasične. U ovom radu, primenjena je „*pojednostavljena metoda višeatributivnog odlučivanja ELECTRE*“ [Boldur-Lătescu, 1982], koja dovodi ocenu alternativnih rešenja na konvencionalnu zajedničku jedinicu mere „*težinu*“. Naime, ova metoda sumira dodeljene vrednosti ocena alternativnih rešenjima po svim kriterijumima, a prema značaju kriterijuma. Rešenje sa najvećom težinskom ocenom je optimalno po svim kriterijumima [Ionescu, 1986].

U cilju potvrde autentičnosti rezultata dobijenih primenom prethodne metode, primenjen je kompletan višeatributivni metod rangiranja PROMETHEE II. Cilj dobijanja rešenja „*višeg reda*“ („*outranking*“) primenom metode PROMETHEE je utvrđivanje stepena dominacije jednog alternativnog rešenja na drugim u definisanom skupu opcija. Metoda PROMETHEE je jedna od najnovijih u oblasti višekriterijumske analize, a razvili su je profesori J. P. Brans, B. Marescha i P. Vincke [Brans et al., 1984].

Metoda ELECTRE izbora najboljeg rešenja iz datog skupa rešenja osmišljena 1965. godine, a kasnije prepoznata kao metoda ELECTRE I. Metoda ELECTRE („*ELimination Et Choix Traduisant la REalite*“) je zasnovana na konceptu rangiranja poređenjem parova alternativnih rešenja, a na osnovu odgovarajućih kriterijuma. Smatra se da je alternativno rešenje, dominantno u odnosu na ostala, ukoliko su jedan ili više kriterijuma saglasni (u odnosu na kriterijume drugih alternativnih rešenja) i jednaki ostalim kriterijumima. Rangiranje odnosa je prema dva alternativna rešenja A_{kn} iz A_1 [Roy, 1973].

Metodu ELECTRE čine dva glavna proceduralna pravca: izgradnja jedne ili više veza višeg reda praćenih eksploatacionim postupkom. Izgradnja jednog ili više odnosa višeg reda je u cilju sveobuhvatnog poređenja akcija u parovima. Postupak eksploatacije koristi se za elaboriranje preporuka rezultata dobijenih u prvoj fazi. Priroda preporuke zavisi od problematike (izbor, rangiranje ili sortiranje). Dakle, svaki metod se karakteriše „*izgradnjom*“ i „*eksploatacijom*“ primenjenih procedura.

Relativna uloga kriterijuma u metodi ELECTRE definisana je pomoću dva različita skupa parametara: koeficijenta značaja i definisanih ograničenja. Koeficijenti značaja u metodi ELECTRE odnose se na suštinske „*težine*“. Težine ne zavise ni od ranga niti od kvantifikacione skale [Figueira et al., 2005].

6.2 PRIMENA ELECTRE METODA

6.2.1 Izbor i usvajanje kriterijuma

Kriterijumi se zavisno od lokacije, odnosno od vrste životne sredine i njenih dominantnih karakteristika (prirodna, antropogena, zagađena ili nezagađena, u ruralnim ili urbanim područjima) i karakteristika projektnog rešenja, odnosno mogućih dominantnih oblika pritisaka na životnu sredinu (zagađenja, stepena iskorišćenosti zemljišta, seče šuma i sl.) mogu razlikovati.

Tipično je da kriterijumi odgovaraju elementarnim karakteristikama životne sredine, u svojoj prirodnoj ravnoteži i u odnosu na problem, studiozno obrađenih. Neki od primera kriterijuma mogu biti: opšta ekonomija, lokalna ekonomija, stepen zaštite životne sredine, geofizičke karakteristike područja, socijalna situacija. Mogu se posebno uvesti i vrlo značajni kriterijumi kao što je: stepen zauzeća zemljišta, raseljavanje stanovnika, smanjenje geoloških rezervi, promena pejzaža, bunt (čak i pojedinačan) stanovnika itd.

Po pravilu, da bi donosilac odluka kontrolisano upravljao procesom analize, bira od pet do osam kriterijuma, kojima dodaje i kriterijum „*nula*“, koji ima manju važnost od ostalih (i koji se automatski eliminiše i time se izbegava rana eliminacija veoma važnih kriterijuma).

6.2.2 Rangiranje i utvrđivanje težinskih vrednosti kriterijuma

Donosilac odluka poredi usvojene kriterijume C_i ($i=1,2,3,\dots,m$) u parovima (zanemarivanjem ostalih kriterijuma) i upisuje 2 boda onom kriterijumu koji smatra, isključivo subjektivno,

značajnijim u razmatranom slučaju, dok će u simetričnom polju u odnosu na glavnu dijagonalu, drugom uporednom kriterijumu, biti upisana cifra 0.

U slučaju da je analitičar neodlučan, on dodeljuje po 1 bod svakom od kriterijuma, i to u polju preseka dve kolone kriterijuma, simetrično u odnosu na glavnu dijagonalu. Svaka kolona se pojedinačno sabira.

Nezavisno poređenje svakog od parova kriterijuma je vrlo važno, jer ono može analizu usmeriti ka zatvorenom logičkom krugu ($C_1 > C_2, C_2 > C_3, C_3 > C_1$).

Ipak, kao mnogo važnija i opasnija posledica, može se javiti prerana eliminacija veoma, za proces odlučivanja, važnih kriterijuma, čime se može proces odlučivanja usmeriti ka „uređivanju“ kriterijuma prema prethodno formiranim stavovima.

Da bi se smanjila subjektivnost donosioca odluka, a posebno da bi se u analitički proces i proces odlučivanja uključilo mišljenje većeg broja ljudi, nezavisno može biti napravljena slična matrica. Konačne težinske vrednosti predstavljaju srednju vrednost težinskih vrednosti dodeljenih od strane svih donosioca odluka.

Srednja vrednost može biti srednja vrednost težinskih vrednosti prema kompetentnosti ili/ i odgovornosti donosioca odluka, apriori utvrđenih.

Dobijeni rezultati analize jednog od donosioca odluka upisuju se u „početnu matricu odlučivanja“ u formi datoj u nastavku.

		<i>Kriterijum</i>					
		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
<i>Kriterijum</i>	C_1	0	1	0	2	0	
	C_2	2	0	0	1	0	
	C_3	1	2	1	2	0	
	C_4	2	2	1	2	0	
	C_5	0	1	0	0	0	
	C_6	2	2	2	2	2	0
		7	7	4	3	9	0
		<i>Suma bodova</i>					

Svakom od kriterijuma C_i dodeljeno je ukupno t_i bodova, dok nulti kriterijum, u prethodnom primeru C_6 , ima ukupno $t_6 = 0$.

Ukupna suma bodova dodeljenih kriterijumima je $T_c = \sum t_i = m^2 - m$.

Težinska vrednost svakog kriterijuma određuje se kao $p_i = t_i/T_c$, odnosno $\sum p_i = 1$.

U prethodnom primeru, težinske vrednosti kriterijuma su: $p_1 = p_2 = 7/30 = 0.233$; $p_3 = 0.133$; $p_4 = 0.1$; $p_5 = 0.4$.

6.2.3 Definisanije alternativnih rešenja-varijanti

Na osnovu istih kriterijuma i pod istim uslovima, prikazanim u komparativnoj analizi metodom matrice, utvrđuje se n alternativnih rešenja (varijanti) A_j ($j=1,2,\dots,n$), definisanih projektom (ili uslovima eksploatacije), značajno različitih sa stanovišta uticaja konstruktivnih rešenja na životnu sredinu.

U procesu odlučivanja, sa stanovišta povoljnosti projekata, jedno od rešenja projekta će biti „nulta varijanta“, odnosno alternativno rešenje projekta koje se neće realizovati.

Iz razloga prethodno prikazanih, preporučuje se da broj alternativnih rešenja bude $n \leq 6$, jer analiza više alternativnih rešenja zahteva rad u više sukcesivnih etapa.

6.2.4 Ocena varijanti prema usvojenim kriterijumima

Ocene se dodeljuju varijantama ukupnog broja n na osnovu $m-1$ kriterijuma (ostalih nakon eliminacije nultog kriterijuma) sukcesivno, u dve etape i to formiranjem „primarne i normalizovane matrice odlučivanja“.

6.2.4.1 Primarna matrica odlučivanja. U odnosu na kriterijum C_i , svakom alternativnom rešenju A_j dodeljuju se primarne ocene $N_{i,j}^*$ na osnovu jednog od sledećih postupaka:

1. Ukoliko alternativna rešenja okarakterišemo merljivom veličinom $M_{i,j}$, direktno proporcionalnoj prednostima uticaja alternativnih rešenja na životnu sredinu (na primer: proizvodnja energije, dodatni proticaj u odnosu na minimalni proticaj u prirodnom režimu, intenzivni uzgoj riba, obezbeđenje radnih mesta itd.), primarne ocene bi bile:

$$N_{i,j}^* = \frac{M_{i,j}}{\sum_{j=1}^n M_{i,j}} \quad (6.1)$$

2. Ukoliko alternativna rešenja okarakterišemo merljivom veličinom $M_{i,j}$, obrnuto proporcionalnoj prednostima uticaja alternativnih rešenja na životnu sredinu (na primer: maksimalni proticaj određene obezbeđenosti nastao nakon ublažavanja poplavnog talasa u jezeru, procenat iskorišćenja zemljišta, dužina trase rečnog korita od kaptaze do mesta ispusta koja je prošla kroz turbine hidroelektrana itd.), primarna ocena bi bila:

$$N_{i,j}^* = \frac{1}{\sum_{j=1}^n M_{i,j}} \quad (6.2)$$

3. Ukoliko alternativna rešenja ne mogu da se okarakterišu merljivom veličinom, primarne ocene se procenjuju, na osnovu jednog od mogućih načina:
- 3.1 Dodeljivanjem ocena alternativnih rešenjima od 1 do 10, na sledeći način:
- ukoliko su uticaji svih alternativnih rešenja pozitivni (imaju pozitivan uticaj na životnu sredinu), ili ako su efekti svih alternativnih rešenja negativni (imaju negativan uticaj na životnu sredinu), alternativnih rešenja koje su pozitivna dobiće najveću ocenu,
 - ukoliko su uticaji alternativnih rešenja pozitivni ili negativni, alternativna rešenja čiji su uticaji pozitivni, odnosno unapređuju životnu sredinu, dobiće ocenu od 6 do 10, a ona koje su negativna, imaju destruktivan uticaj na životnu sredinu dobiće ocenu od 0 do 4, dok bi neutralna alternativna rešenja dobila ocenu 5.
- 3.2 Ukoliko se kriterijum C_i poklapa sa jednim elementom ili grupom elemenata životne sredine iz matrice za vrednovanje uticaja, primarna ocena može biti suma odgovarajućih vrednosti uticaja iz kolone ili odgovarajuće pod-matrice.
- 3.3 Ukoliko se smatra pogodnim, primarne ocene se mogu odrediti postupkom definisanja težinskih kriterijuma (saglasno poglavlju 6.1.2), gde se umesto kriterijuma C_i usvaja alternativno rešenje A_j vrednosti i primarnih ocena $N_{i,j}^*$ biće jednake odgovarajućim težinskim vrednostima kriterijuma p_i .

6.2.4.2 Normalizovana matrica odlučivanja. Kako je važnost kriterijuma izražena preko njegovih težinskih vrednosti kriterijuma p_i , suma ocena dodeljenih alternativnim rešenjima po svim kriterijumima C_i treba da bude ista.

U suprotnom, visina ocene može da promeni važnost kriterijuma i umanju vrednost alternativnog rešenja, ne toliko značajnim kriterijumima, što je opozitno klasifikaciji kriterijuma po važnosti.

Na primer, ako se jednom kriterijumu u svim alternativnim rešenjima dodeli ocena 10 i ako se drugom kriterijumu u svim alternativnim rešenjima dodeli ocena 5, bodovi prvog kriterijuma biće duplo veći, iako on može biti manje važan od onog drugog. Zbog toga je neophodno

normalizovati ocene svakog kriterijuma, tako da njihova suma po n alternativnih rešenja bude ista, na primer da bude jednaka 1.

Ovo može biti postignuto računanjem normalizovanih ocena $N_{i,j}$ prema sledećoj formuli:

$$N_{i,j} = \frac{N_{i,j}^*}{\sum_{j=1}^n N_{i,j}^*} \quad (6.3)$$

koje su, prirodno, u skladu sa uslovom da je:

$$\sum_{j=1}^n N_{i,j} = 1 \quad (6.4)$$

U mogućim načinima dodele primarnih ocena navedenih u tačkama 3.1, 3.2 i 3.3 prethodno prikazanih, uslov se implicitno ostvaruje, jer su primarne ocene jednake normalizovanim ocenama.

6.2.5 Proračun rezultujućih težinskih ocena

Nakon računanja ocena svih alternativnih rešenja po svim kriterijumima, postupak je sledeći:

- računaju se rezultujuće težinske ocene:

$$(N_{i,j})_p = N_{i,j} \cdot p_i \quad (6.5)$$

- sabiraju se težinske ocene svakog alternativnog rešenja A_j , na osnovu C_i kriterijuma i sledi ukupna težinska ocena alternativnih rešenja:

$$N_j = \sum_{i=1}^{m-1} N_{i,j} \cdot p_i \quad (6.6)$$

Ovaj broj karakteriše razmatrana alternativna rešenja, na osnovu usvojenih kriterijuma. Da bi se naznačile i istakle najočiglednije razlike između rešenja, uputno je sračunati ukupnu relativnu ocenu svakog alternativnog rešenja, a po sledećoj formuli:

$$(N_j)_R = \frac{N_j}{\sum_{j=i}^n N_j} \quad (6.7)$$

Proračun se sprovodi tabelarno, po sledećem modelu:

		A1			A2			A3	
C_i	P_i	$N_{i,1}$	$N_{i,1}P_i$	...	$N_{i,j}$	$N_{i,j}P_i$	...	$N_{i,n}$	$N_{i,n}P_i$
C_1	P_1			...			...
C_2	P_2			...			...
C_{m-1}	P_{m-1}			...			...
UKUPNO	-	-	N_1	...	-	N_j	...	-	N_n

6.2.6 Proces odlučivanja

Uobičajeno je da je rešenje sa najvećim brojem ukupnih bodova prihvatljivo. Imajući u vidu brojne subjektivne procene koje utiču na postupak izbora, objektivne poteškoće prognoze uticaja konstrukcija za uređenje rečnih tokova na životnu sredinu i relativnost primarnih informacija (osnovnih podataka), razlike u težinskim ocenama alternativnih rešenja ispod 10% (posebno razlike manje od 0.1 između ukupnih relativnih pondera) ne treba smatrati odlučujućim.

U ovakvim situacijama, bilo da je u pitanju detaljnija analiza ili dodatne studije, bilo da se uvode dodatni kriterijumi, bilo da se bira jedno od 10 odbačenih alternativnih rešenja na osnovu razlike u bodovima, po kriterijumima koji su od interesa za glavnog donosioca odluka, zakonski je odgovorno ono lice koje odobrava investicije.

Da bi se smanjio stepen subjektivnosti u proračunu pondera, preporučljiva je primena metode višekriterijumskog odlučivanja od strane većeg broja donosioca odluka, koji nezavisno ocenjuju uticaj alternativnih rešenja. Ova procedura je nekada primenljiva, ali se u praksi, zbog relativno velikog obima posla, uglavnom odlučuje samo jedan donosilac odluka.

6.2.7 Utvrđivanja relevantnih kriterijuma odlučivanja

Obično se za uređenje rečnog korita, uzimaju u obzir sledeći kriterijumi i podkriterijumi:

Ekonomski kriterijumi

- vrednost investicija i troškova održavanja za vremenski period od 5 do 20 godina,
- vrednost pratećih troškova: smanjenje prihoda od turizma, ribarstva, sporta i rekreacije,
- cena sekundarnih uticaja: erozije, rušenje obala (ugrožavanje domaćinstva, useva itd.).

Socijalni kriterijumi

- estetika, pejzaž,
- rekreacija, turizam, sport,
- kvalitet vode koja se koristi u priobalju,
- zaštita priobalja od velikih voda,

- uticaj na stanovništvo u priobalju (ograničenja, saobraćaj, stres, posebno kod izvođenja radova).

Ekološki kriterijumi

- *GIPS* - indeks globalnog uticaja alternativnog rešenja, koji zavisi od: dužine denaturalizovane rečne deonice, kategorije odnosno „klase vodotoka”, intenziteta uticaja agresivnosti regulacionih mera na modifikaciju rečne morfologije, vremenskog perioda trajanja uticaja,
- *GICS* - indeks globalnog uticaja konstruktivnog rešenja,
- stepen denaturalizacije postojećeg ekosistema (očuvan, konzerviran, promenjen, uništen).

Zakonska ograničenja

- ograničenja navedena u planovima integralnog uređenja vodnog područja (HBSP) i planovima integralnog upravljanja vodnog područja (HBMP),
- saglasnost nadležnih u plavnim zonama,
- zabrana kršenja propisa o zaštićenom području,
- zabrana uništenja javnih dobara (vodovod, kanalizacija, lokane deponije domaćinstva),
- zabrana ugrožavanja (ili strogo ograničenje intenziteta i trajanja) ekonomskih aktivnosti od strateškog nacionalnog značaja koje se obavljaju u oblasti.

6.3 PRIMENA METODE NA PRAKTIČNOM PROBLEMU ODLUČIVANJA

6.3.1 Karakteristike uslova područja i rečne deonice

Predmet interesovanja uređenja je deonica reke u visoravni Podkarpatja, koja je duga 10 km, ima konstantan srednji višegodišnji proticaj od 1.2 m³/s. Sa gledišta kvaliteta vode, reka pripada I klasi. Kompletna deonica ima srednje do visok ekološki značaj, dok je njen akvatični ekosistem stabilan i obuhvata vredne vrste riba iz porodice Salmonidae (pastrmke).

Reka ima medandrijajuću deonicu i do pre dve decenije trasa reke je stabilna, kada su se pojavili znaci morfološke nestabilnosti, koja je verovatno posledica učestalih poplava i pojava velikih proticaja (sa srednjim periodom ponavljanja do 50 godina). Kao posledica, na celoj deonici se postoji tendencija degradacije rečnog korita i erozije obala u konkavnim krivinama i kao uvećanja meandara. Na jednom sektoru od oko 500 m dužine, erozija ugrožava glavni regionalni put, kao i niz domaćinstava, uključujući opasnost ugrožavanja stanovništva i njihovih domaćinstava, čija je sanacija i adaptacija izuzetno skupa, dok su troškovi erozije zemljišta nepovratni.

Opšti izgled obala ugroženih erozijom, kao i pojava klizišta i delimičnog rušenja obala je jako loš. Treba naglasiti da je ranijih godina zbog sličnih pojava, na pomenutoj deonici izvedeni

regulacioni radovi na uređenju korita reke kao i na još četiri deonice, približne dužine do 3.2 km.

Glavne karakteristike deonice rečnog toka koja je uzeta u praktičnom primeru su sledeće: minor korito je razdvojeno od major korita; minor korito se puni proticajem pojave (određene aproksimativnim proračunom) jednom u 30 godina i ima srednju širinu w od oko 36 m. Pojavom srednjih voda, širina minor korita je aproksimativno 15 do 20 m, a kod malih voda, do 5 m.

Pojavom velikih voda, proticajem učestalošću jednom u 30 godina, priobalje se poplavi. Na desnoj obali, inundacija je zatvorena javnim putem, koji ima i ulogu zaštitnog i usmeravajućeg nasipa, dok se na levoj obali plavna zona ima srednju širinu od 300 m i na njoj se nalazi i nekoliko domaćinstava. Podizanjem dna rečnog korita zasipanjem i bujne vegetacije u samom rečnom koritu, propusna moć korita je značajno smanjena. Ovo područje je poznato i vrlo posećeno posebno za odmor i rekreaciju, nekolicina motela izgrađeno je na gore pomenutoj deonici reke.

6.3.2 Selekcija opšteprihvaćenih kriterijuma

Saglasno poglavlju 6.1.7., za deonicu prikazanu u prethodnom poglavlju, biće primenjen samo jedan deo opšteprihvaćenih kriterijuma i podkriterijuma, odnosno samo onih koji su za datu deonicu značajni i za koje se unapred predviđaju značajne razlike između alternativnih rešenja uređenja, a u skladu sa opšteprihvaćenom i usvojenom politikom održivog razvoja:

C_1 – ekonomski kriterijum

$C_{1,1}$ – vrednost investicija i troškova održavanja za vremenski period od 5 do 20 godina,

$C_{1,2}$ – cena sekundarnih uticaja: erozija, rušenje obala (ugrožavanje domaćinstva, useva),

$C_{1,3}$ – „nulti“ kriterijum.

C_2 – socijalni kriterijum

$C_{2,1}$ – estetika, pejzaž,

$C_{2,2}$ – uticaj izvođenja regulacionih radova na stanovništvo u priobalju (ograničeno kretanje, saobraćaj, buka, posebno kod izvođenja radova),

$C_{2,3}$ – „nulti“ kriterijum.

Podkriterijumi koji se odnose na rekreaciju, turizam, sport, kvalitet vode i zaštitu od poplava ne uvode se, ukoliko sva alternativna rešenja imaju slične uticaje pa analiza ne može u tom smislu, da napravi razliku između njih.

C_3 – ekološki kriterijum

$C_{3,1}$ – GIPS - indeks globalnog uticaja alternativnog rešenja,

$C_{3,2}$ – GICS - indeks globalnog uticaja konstruktivnog rešenja,

$C_{3,3}$ – stepen denaturalizacije postojećeg ekosistema,

$C_{3,4}$ – „nulti“ kriterijum.

C_4 – „nulti“ kriterijum.

Uvođenje poštovanja zakonskih ograničenja kao relevantnog kriterijuma, se ne uvodi ukoliko ovaj uslov važi za sva alternativna rešenjima.

6.3.3 Rangiranje i utvrđivanje težinskih vrednosti kriterijuma

Utvrđivanje težinskih vrednosti kriterijuma je uglavnom adekvatno konkretnoj i specifičnoj situaciji oblasti u kojoj se izvode radovi. Na primer, u oblasti sa siromašnim ljudskim aktivnostima, ali zato velikim ekološkim potencijalom, najvažniji kriterijum bio bi ekološki, dok istovremeno u oblastima bogatim ljudskim aktivnostima, odnosno jako naseljenim oblastima, najvažniji kriterijum bi mogao biti socijalni.

Važnost kriterijuma tj. njihovih težinskih vrednosti procenjuju donosioci odluka. Kako su donosioci odluka neizbežno subjektivni, procenu radi veći broj kompetentnih donosioca odluka ili zainteresovanih strana i uglavnom se pronalazi sredina u njihovim stavovima. U primeru autora, biće uključen samo jedan donosilac odluka.

6.3.3.1 Težinske vrednosti glavnih kriterijuma

Kriterijumi	C_1	C_2	C_3	C_4
<i>Ekonomski - C_1</i>		0	1	0
<i>Socijalni - C_2</i>	2		2	0
<i>Ekološki - C_3</i>	1	0		0
<i>„Nulti“ - C_4</i>	2	2	2	
Ukupno bodova	5	2	5	
Težinske vrednosti	0.415	0.17	0.415	

Table 6.1. Težinske vrednosti glavnih kriterijuma

$$p_1 = 0.415, p_2 = 0.17, p_3 = 0.415,$$

$$\Sigma p_i = p_1 + p_2 + p_3 = 1$$

6.3.3.2 Težinske vrednosti podkriterijuma C_1

Kriterijumi	$C_{1,1}$	$C_{1,2}$	$C_{1,3}$
Vrednost investicija - $C_{1,1}$		1	0
Cena sekundarnih troškova - $C_{1,2}$	1		0
„Nulti” - $C_{1,3}$	2	2	
Ukupno bodova	3	3	0
Težinske vrednosti	0.5	0.5	

Table 6.2. Težinske vrednosti podkriterijuma C_1

$$p'_{1,1} = 0.5, p'_{1,2} = 0.5, p'_{1,1} + p'_{1,2} = 1$$

Kombinacijom ovih dveju matrica, dobija se:

$$p_{1,1} = 0.5 \cdot 0.415 = 0.2075$$

$$p_{1,2} = 0.5 \cdot 0.415 = 0.2075$$

$$p_{1,1} + p_{1,2} = 0.415$$

6.3.3.3 Težinske vrednosti podkriterijuma C_2

Kriterijumi	$C_{2,1}$	$C_{2,2}$	$C_{2,3}$
Estetika pejzaža - $C_{2,1}$		2	0
Uslovi stanovništva - $C_{2,2}$	0		0
„Nulti” - $C_{2,3}$	2	2	
Ukupno bodova	2	4	0
Težinske vrednosti	0.33	0.67	

Table 6.3. Težinske vrednosti podkriterijuma C_2

$$p'_{2.1} = 0.33, p'_{2.2} = 0.67$$

$$p'_{1.1} + p'_{1.2} = 1$$

$$p_{2.1} = 0.33 \cdot 0.17 = 0.057$$

$$p_{2.2} = 0.66 \cdot 0.17 = 0.113$$

$$p_{2.1} + p_{2.2} = 0.17$$

6.3.3.4 Težinske vrednosti podkriterijuma C_3

Kriterijumi	$C_{3.1}$	$C_{3.2}$	$C_{3.3}$	$C_{3.4}$
<i>GIPS</i> – $C_{3.1}$		2	0	0
<i>GICS</i> – $C_{3.2}$	0		0	0
Stepen denaturalizacije – $C_{3.3}$	2	2		0
„Nulti” – $C_{3.4}$	2	2	2	
Ukupno bodova	4	6	2	0
Težinske vrednosti	0.33	0.5	0.17	

Table 6.4. Težinske vrednosti podkriterijuma C_3

$$p'_{3.1} = 0.33$$

$$p'_{3.2} = 0.5$$

$$p'_{3.3} = 0.17$$

$$p'_{3.1} + p'_{3.2} + p'_{3.3} = 1$$

$$p_{3.1} = 0.33 \cdot 0.415 = 0.13695$$

$$p_{3.2} = 0.5 \cdot 0.415 = 0.2075$$

$$p_{3.3} = 0.17 \cdot 0.415 = 0.07055$$

$$p_{3.1} + p_{3.2} + p_{3.3} = 0.415$$

6.3.3.5 Ukupna težinska vrednost kriterijuma i podkriterijuma

Kriterijum	Težinska vrednost	Podkriterijum	Težinska vrednost podkriterijuma - p'	Ukupna težinska vrednosti - p
C_1	0.415	$C_{1.1}$	0.50	0.20750
		$C_{1.2}$	0.50	0.20750
C_2	0.170	$C_{2.1}$	0.33	0.05700
		$C_{2.2}$	0.67	0.11300
C_3	0.415	$C_{3.1}$	0.33	0.13695
		$C_{3.2}$	0.50	0.20750
		$C_{3.3}$	0.17	0.07055
Ukupno	1.000			1.00000

Table 6.5. Ukupna težinska vrednost kriterijuma i podkriterijuma

6.3.4 Definisanije alternativnih rešenja - varijanti

Za alternativna rešenja, usvojena su tri projektom predviđena rešenja uređenja, predmetne deonice rečnog toka:

Varijanta 1 (A1) . Nova trasa rečnog korita, preseca postojeće (meandre) krivine, ima trapezni poprečni presek. Kosine obale rečnog korita, obložene su betonskom oblogom, dok se dno rečnog korita (matica) konsoliduje betonskom pločom debljine 30 cm.

Ovo alternativno rešenje je u praksi izvedeno regulacionim merama rečnom toku, a u cilju zaštite od poplava, pritoke reke Mandra – okrug Brašov. Karakterističan poprečni presek regulisanog rečnog korita predstavljen je na slici 6.1, i predstavljen je u svom originalu.

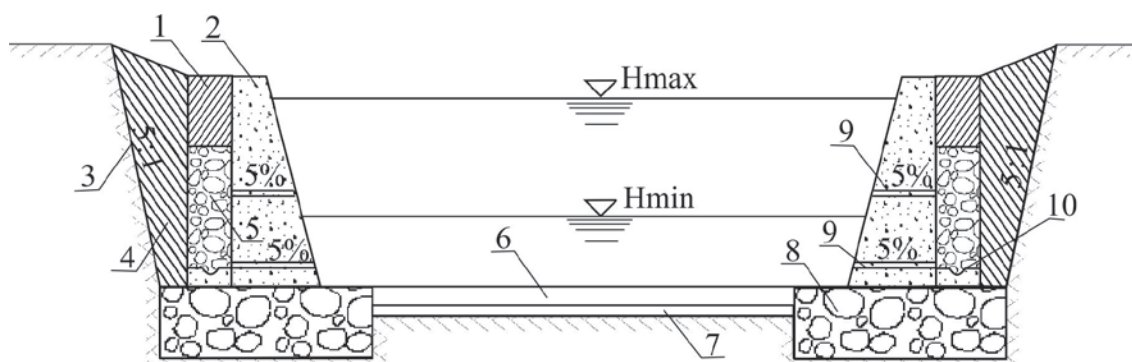
Trasa u osnovi prikazana je na slici 6.3. Karakteristične vrednosti parametara deonice reke su: dužina deonice je 433 m, širina rečnog korita je 14 m.

Ukupna cena investicija na uređenju vodotoka (uključujući i redovno održavanje konstrukcije za period od 5 godina) predstavljena je vrednošću IS_I .

Rešenje evidentno ima neke određene nedostatke:

- usled neravnomernog sleganja tla ili erozije nastale ispiranjem materijala u fundamentu, može doći do rušenja konstrukcije, pojave pukotina ili klizanja konstrukcije,

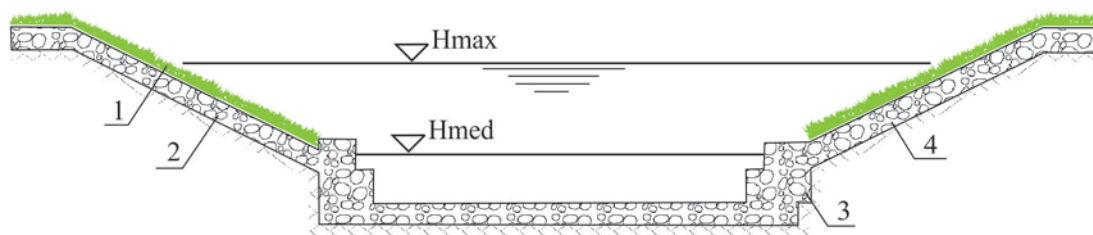
- za izvođenje radova, neophodni su pristupni putevi za mehanizaciju, prelazi, platforme, a za to ne postoji dovoljno raspoloživog prostora, zbog kuća koja se nalaze na samoj obali rečnog korita,
- u reci je uglavnom nizak vodostaj, od vodnog ogleđala do krune konstrukcije visina je između 2 i 2.5 m, pa ljudi, živina ili domaće životinje koje upadnu u reku ne mogu lako izaći bez pristupnog puta.



Slika 6.1. Varijanta 1 – Karakterističan poprečni presek regulisanog rečnog korita:

1-ispuna od zemlje; 2-potporni zid; 3-linija iskopa; 4-ispuna od iskopanog materijala; 5-obrnuti filter; 6-obloga od betona debljine 30 cm; 7-filtracioni sloj od šljunka debljine 15 cm; 8-špar beton; 9-barbakane od PVC cevi Φ 4-6 cm; 10-rigola od običnog betona

Varijanta 2 (A2). Nova trasa rečnog korita meandrira, jako slično prirodnoj rečnoj trasi. Projektom je predviđen poprečni presek regulisanog rečnog korita koji predviđa zaštitu dna rečnog korita madracom Macaferri, dok su nožice kosine od gabiona Macaferri i kosine zaštićene madracom Macaferri i geomat Macmat sa vegetacijom (slika 6.2).



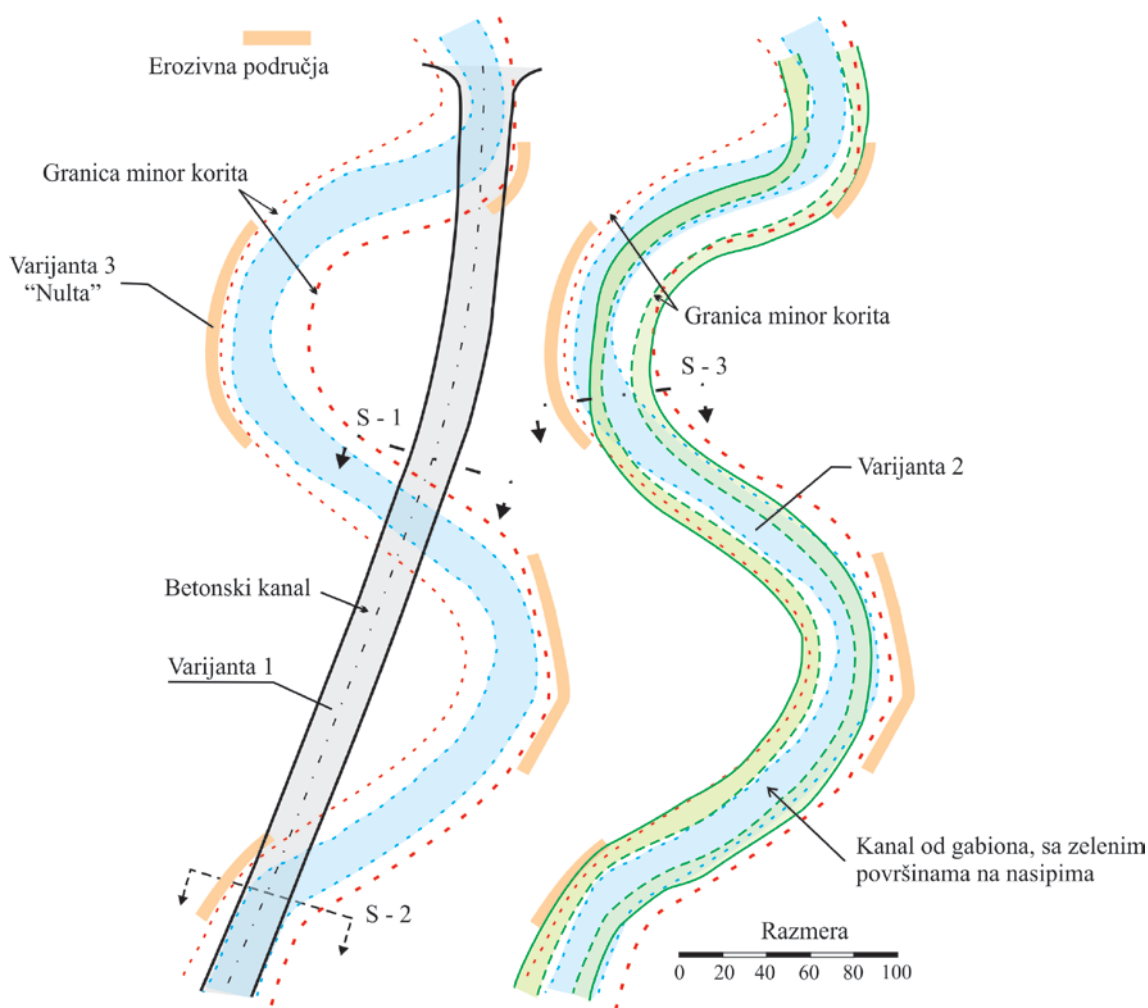
Slika 6.2. Varijanta 2 – Karakterističan poprečni presek regulisanog rečnog korita:

1-Macmat geo-tekstil sa travnatom strukturom; 2,3,4- Macaferri gabioni

Trasa u osnovi je prikazana na slici 6.3. Kanal koji ima dužinu od 557 m (mereno po osovini) u odnosu na dužinu prirodnog korita (mereno po matici), koja je 578 m.

Širina u osnovi je 14 m, dok je ukupna širina 32 m. Procenjuje se da je ukupna vrednost investicije 1.32IS_r.

Može se primetiti se da je varijanta 2 dimenzionisana za obezbeđenje osnovni operativnih zahteva slično ili identično kao varijanta 1.



Slika 6.3. Trasa u osnovi

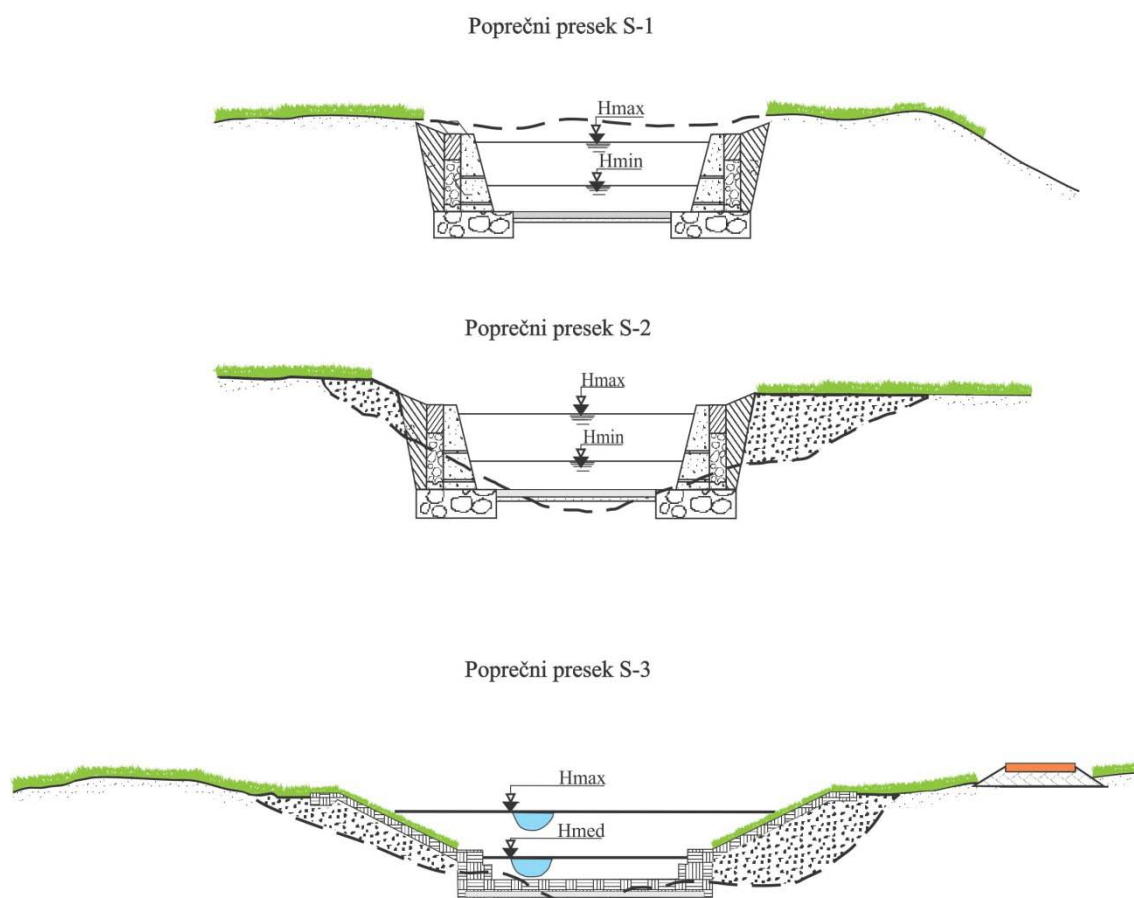
Dakle:

- režim tečenja malih voda (ispod srednjeg višegodišnjeg proticaja) je praktično identičan, oba rešenja imaju istu širinu rečnog korita,
- režim tečenja velikih je vrlo sličan (nivoi vodnog ogledala su praktično identični, varijanta 2 ima veće poprečne preseke, ali i manje nagibe).

Varijanta 3 (A3). Ovo alternativno rešenje je minimalna „nulta varijanta“ koja ne predviđa regulacione radove na uređenju vodotoka, ostavljajući reku da slobodno teče u prirodnom režimu, mada je teško proceniti pojavu mogućih negativnih pojava (erozija, rušenje obala, uvećanje meandara, pojava rastinja u rečnom koritu i smanjenje pada dna i propusne moći). Predviđeni su minimalni radovi na smanjenju erozije lokalnom zaštitom od kamenog nabačaja.

Cena sekundarnih negativnih efekata: erozija, rušenje obala (oštećenje regionalnih puteva, domaćinstva, terena, letine itd.) u periodu od 20 godina je dva puta veća od troškova investicija u varijanti 1, što opravdava realizaciju ovog rešenja uređenja.

Način na koji se uklapaju u teren različiti karakteristični preseki, varijante 1 i varijante 2, prikazan je na slici 6.4.



Slika 6.4. Karakteristični poprečni preseki regulisanog korita u terenu:

S-1 i S-2 – karakteristični poprečni preseki varijante 1;

S-3 – karakterističan poprečni presek varijante 2.

6.3.5 Ocena varijanti prema usvojenim kriterijumima

6.3.5.1 Ocena podkriterijuma $C_{1,1}$ (vrednost investicija)

Ukupna vrednosti investicija koje odgovaraju trima varijantama izražava se multiplikacijom vrednosti investicija varijante A1, označene sa IS_j .

Primarne ocene, koje su normalizovane, računaju se izrazom:

$$N_{i,j}^* = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{M_{i,j}}} \quad (6.8)$$

gde su vrednosti $M_{i,j}$ obrnuto proporcionalne pozitivnim uticajima (i – kriterijum, j – varijanta).

Rezultati su prikazani u sledećoj tabeli:

Varijanta	Investicije ($M_{i,j}$)	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	IS_I	0.085052	0.085052
A2	$1.32 \cdot IS_I$	0.064433	0.064433
A3	$0.1 \cdot IS_I$	0.850515	0.850515

Tabela 6.6. Ocena podkriterijuma $C_{1,1}$

Ako se eliminiše A3, rezultati su sledeći:

Varijanta	Investicije ($M_{i,j}$)	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	IS_I	0.568966	0.568966
A2	$1.32 \cdot IS_I$	0.431034	0.431034

Tabela 6.7. Ocena podkriterijuma $C_{1,1}$ (A1, A2)

6.3.5.2 Ocena podkriterijuma $C_{1,2}$ (troškovi sekundarnih efekata)

Investicije koje odgovaraju trima varijantama se dobijaju množenjem cene sekundarnih efekata A3, ocenjene sa E_3 .

Proračun se radi slično kao u prethodnoj tački.

Varijanta	Investicije ($M_{i,j}$)	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	$0.1 \cdot E_3$	0.488	0.488
A2	$0.1 \cdot E_3$	0.488	0.488
A3	$2 \cdot E_3$	0.024	0.024

Tabela 6.8. Ocena podkriterijuma $C_{1,2}$

Ako se eliminiše A3, kriterijum $C_{1,2}$ nestaje u potpunosti.

6.3.5.3 Ocena podkriterijuma $C_{2.1}$ (estetika pejzaža)

Varijante dobijaju primarne ocene procenom, prema proceduri predstavljenoj u poglavlju 6.1.4.1, tačka 3.1 (ocene od 1 do 10).

Primarne ocene se normalizuju korišćenjem formule:

$$N_{i,j} = \frac{N_{i,j}^*}{\sum_{j=1}^n N_{i,j}^*} \quad (6.9)$$

Rezultati su prikazani u sledećoj tabeli:

Varijanta	Investicije ($M_{i,j}$)	Primarne ocene N^*
A1	2	0.143
A2	9	0.642
A3	3	0.215

Tabela 6.9. Ocena podkriterijuma $C_{2.1}$

Varijanta	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	2	0.182
A2	9	0.818

Tabela 6.10. Ocena podkriterijuma $C_{2.1}$ (A1, A2)

6.3.5.4 Ocena podkriterijuma $C_{2.2}$ (uslovi stanovništva)

Ocenjivanje varijanti radi se procenom, kao u prethodnoj tački, a rezultati su sledeći:

Varijanta	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	4	0.286
A2	8	0.572
A3	2	0.142

Tabela 6.11. Ocena podkriterijuma $C_{2.2}$

Ako se eliminiše alternativno rešenje A3, rezultati su sledeći:

Varijanta	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	4	0.33
A2	8	0.67

Tabela 6.12. Ocena podkriterijuma $C_{2,2}$ (A1, A2)

6.3.5.5 Podkriterijum $C_{3,1}$ (GIPS - indeks globalnog uticaja rešenja)

Proračun podkriterijuma *GIPS* podrazumeva detaljnu analizu proračuna primarnih ocena, u skladu sa poglavljem 5.

Za sva alternativna rešenja, koeficijenti A , R i T su jednaki, odnosno:

- *Dužina denaturalizovane rečne deonice* predstavlja odnos dužine regulisane deonice rečnog toka (3.2 km postojeća regulacija i 0.58 km nova planirana na predmetnoj deonici) prema celokupnoj dužini deonice (10 km) je 37,8%, odakle sledi da A ima vrednost 4.4.
- *Klasa vodotoka R* je 8 (tabela 5.3, reka je I klase, $1 \leq Q_m < 5$ i ima veliki ekološki značaj)
- *Vremenski period trajanja uticaja T* je 20 godina.

Intenzitet uticaja regulacionih radova na životnu sredinu I (odnosno ekološka cena) varijante 3 je vrlo mala, jer ne menja režim tečenja, pa se usvaja procenjena vrednost od 0.1.

Za druge dve varijante, koeficijenti I_i se određuju na sledeći način:

- *Ekološka cena izmene prirodne rečne trase*. Razvijena dužina (prirodnog korita) je 578 m i dužina po pravoj liniji između krajeva uredene deonice je 430 m.

Razvijena dužina u varijanti A1 je 433 m, a u varijanti A2 je 557 m.

Shodno tome, meandriranje rečne trase je za:

$$- \text{ prirodni rečni tok: } S_n = 578/430 = 1.344$$

$$- \text{ regulisani rečni tok:}$$

$$A1: S_1 = 433/430 = 1.007$$

$$A2: S_2 = 557/430 = 1.295$$

- Razlike u meandriranju rečnog toka, nakon uređenja i u prirodnom režimu, su a_1 je 0.337 odnosno a_2 je 0.288.

Shodno dijagramu sa slike 5.3, njima odgovara ekološka cena I_1 (1) od 7,8 i I_1 (2) od $7.8-6.8=1$.

- *Ekološka cena suženja rečnog toka, promene povratnog perioda punjenja korita malih voda i povećanja širine vodnog ogledala pri malim vodama je $I_2=I_3=I_4=0$ za obe varijante, ukoliko one nemaju izgrađene nasipe i zadržavaju širinu prirodnog rečnog korita.*
- *Ekološka cena promene fizičkih svojstava staništa i njihove konektivnosti određuje se u skladu sa tabelom 5.1, odakle sledi da je $I_5(1)=I_5(2)=12$*
- *Ekološka cena promene strukture materijala u rečnom koritu mereno učestalošću proticaja koji ispiraju podsloj određuje se prema dijagramu na slici 5.7.*

U prirodnom režimu se procenjuje da proticaj koji može da izazove ispiranje podsloja ima učestalost od 6/god. U obe varijante, ovakvi proticaji se najverovatnije neće javiti tokom jedne prosečne godine, pa je $I_6(1)=I_6(2)=2$.

- *Ekološka cena smanjenja plavne zone poplavnog talasa verovatnoće 3% je nula u obe varijante pa je $I_7(1)=I_7(2)=0$.*
- *Ekološka cena izgradnje veštačkih prepreka na ribljem putu na deonici od 10 km ne menja se zbog regulacionih radova niti u jednom alternativnom rešenju, pa je $I_8(1)=I_8(2)=0$.*

Suma koeficijenata I_1, \dots, I_8 jednaka je:

- varijanta 1: $I = 21.8$
- varijanta 2: $I = 15.0$

U skladu sa izrazima za proračun $GIPS=L \cdot I \cdot T \cdot w^2 \cdot 10^{-4}$ i $L=(l/w) \cdot A \cdot R$, sa

$$w^2 = 1ha$$

u obe alternative i znajući da je

$$w_1 = 19.2 \text{ m i } w_2 = 32.9 \text{ m}$$

sledi:

$$L(1) = 430/19.2 = 22.4, L(2) = 430/32.9 = 13.1,$$

Vrednost koeficijenata A i R je identična za oba rešenja, pa oni nisu uključeni u proračun.

Odavde su dobija konačna vrednost $GIPS$ (indeks globalnog uticaja rešenja uređenja) za oba alternativna rešenja:

- varijanta 1: $GIPS = 0.9766$

- varijanta 2: $GIPS = 0.3930$

Obe vrednosti se smatraju primarnim karakteristikama za oba alternativna rešenja. Primarne i normalizovane ocene, sračunate preko izraza 6.2 i 6.3 imaće vrednosti:

Varijanta	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	0.075466	0.075466
A2	0.187532	0.187532
A3	0.737002	0.737002

Tabela 6.13. Ocena podkriterijuma $C_{3,1}$

Ako se A3 eliminiše, rezultati su sledeći:

Varijanta	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	0.286945	0.286945
A2	0.713055	0.713055

Tabela 6.14. Ocena podkriterijuma $C_{3,1}$ (A1, A2)

6.3.5.6 Podkriterijum $C_{3,2}$ ($GICS$ - indeks globalnog uticaja konstruktivnog rešenja)

Podkriterijum $GICS$ (indeks globalnog uticaja konstruktivnog rešenja) – $C_{3,2}$, meri se koeficijentom I_c , a shodno tabeli 4.2:

- varijanta 1 – kruta konstrukcija, nepermeabilna, ne pospešuje razvoj vegetacije: $I_c=10$,
- varijanta 2 – elastična konstrukcija, pospešuje razvoj vegetacije: $I_c=1$,
- varijanta 3 – prirodni režim tečenja, ne pospešuje previše razvoj vegetacije: $I_c=1$.

Sa ovim vrednostima, sprovodi se proračun parametra globalnog uticaja konstruktivnog rešenja, a koristi se izraz $GICS=A \cdot R \cdot I_c \cdot T \cdot (l/w) \cdot w^2 \cdot 10^{-4}$, vrlo sličan izrazu za proračun $GIPS$, gde je umesto I stavljena oznaka I_c .

Rezultujuće vrednosti su:

- varijanta 1:
 $GICS=0.4480$
- varijanta 2:

$$GICS = 0.0262$$

- varijanta 3:

$$GICS = 0.0262$$

Ove tri vrednosti smatraju se primarnim karakteristikama alternativnih rešenja. Primarne i normalizovane ocene, sračunate preko izraza 6.2 i 6.3 imaju vrednosti:

Varijanta	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	0.028410	0.028410
A2	0.485795	0.485795
A3	0.485795	0.485795

Tabela 6.15. Ocena podkriterijuma $C_{3.2}$

Ako se eliminiše alternativno rešenje A3, rezultati su sledeći:

Varijanta	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	0.055251	0.055251
A2	0.944749	0.944749

Tabela 6.16. Ocena podkriterijuma $C_{3.2}$ (A1, A2)

6.3.5.7 Podkriterijum $C_{3.3}$ (stepen denaturalizacije životne sredine)

Primarne ocene dobijaju se procenom (6.1.4.1, tačka 3.1), a rezultati su sledeći (za slučaj sa dve i tri varijante):

Varijanta	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	1	0.056
A2	8	0.444
A3	9	0.500

Tabela 6.17. Ocena podkriterijuma $C_{3.3}$

Varijanta	Primarne ocene N^*	Normalizovane ocene
A1	1	0.11
A2	8	0.89

Tabela 6.18. Ocena podkriterijuma $C_{3.3}$ (A1, A2)

6.3.6 Proračun rezultujućih težinskih ocena

Nakon proračuna ocena svih alternativnih rešenja po svim kriterijumima, sledi proračun ukupnog broja težinskih ocena (poglavlje 6.1.5). Rezultati su prikazani u sledećim tabelama:

Slučaj poređenja tri varijante (A1, A2, A3)

Kriterijum	Težinska vrednost P	Podkriterijum	Težinska vrednost p	A1		A2		A3	
				Normalizovane ocene	Težinske ocene $Np1$	Normalizovane ocene	Težinske ocene $Np2$	Normalizovane ocene	Težinske ocene $Np3$
C_1	0.415	$C_{1.1}$	0.20750	0.085	0.018	0.064	0.013	0.851	0.177
		$C_{1.2}$	0.20750	0.488	0.101	0.488	0.101	0.024	0.005
C_2	0.170	$C_{2.1}$	0.05700	0.143	0.008	0.642	0.037	0.215	0.012
		$C_{2.2}$	0.11300	0.286	0.032	0.572	0.065	0.142	0.016
C_3	0.415	$C_{3.1}$	0.13695	0.075	0.010	0.188	0.026	0.737	0.101
		$C_{3.2}$	0.20750	0.028	0.006	0.486	0.101	0.486	0.101
		$C_{3.3}$	0.07055	0.056	0.004	0.444	0.031	0.500	0.035
UKUPNO	1.000		1.00000		0.179		0.374		0.447

Tabela 6.19. Proračun rezultujućih težinskih ocena

Slučaj poređenja dve varijante (A1, A2)

Kriterijum	Težinska vrednost p	Podkriterijum	Težinska vrednost p	A1		A2	
				Normalizovane ocene	Težinske ocene $Np1$	Normalizovane ocene	Težinske ocene $Np2$
C_1	0,415	$C_{1.1}$	0.20750	0.569	0.118	0.431	0.089
		$C_{1.2}$	0.20750	0.000	0.000	0.000	0.000
C_2	0,17	$C_{2.1}$	0.05700	0.182	0.010	0.818	0.047
		$C_{2.2}$	0.11300	0.333	0.038	0.667	0.075
C_3	0,415	$C_{3.1}$	0.13695	0.287	0.039	0.713	0.098
		$C_{3.2}$	0.20750	0.055	0.011	0.945	0.196
		$C_{3.3}$	0.07055	0.11	0.008	0.890	0.063
UKUPNO	1.000		1.00000		0.225		0.568

Tabela 6.20. Proračun rezultujućih težinskih ocena (A1, A2)

Poređenje alternativnih rešenja, jasnije je, ako sračunamo odnos njihovih težinskih ocena sa težinskim ocenama alternativnog rešenja 1, koje je uzeto za referentno.

U poslednjoj koloni je prikazan odnos između težinskih ocena alternativnog rešenja 2 i alternativnog rešenja 3.

Rezultati su prikazani u narednim tabelama.

Prva tabela 6.21, daje uporedni prikaz slučaja poređenja težinskih ocena tri alternativna rešenja, a druga tabela 6.22, prikaz slučaja težinskih ocena poređenja dva alternativna rešenja):

Slučaj poredenja tri varijante (A1, A2, A3)

Kriterijum	N_{p1}	N_{p2}	N_{p3}	N_{p1}/N_{p1}	N_{p2}/N_{p1}	N_{p3}/N_{p1}	N_{p2}/N_{p3}
$C_{1.1}$	0.018	0.013	0.177	1	0.753	10.012	0.075
$C_{1.2}$	0.101	0.101	0.005	1	1.000	0.050	20.000
$C_{2.1}$	0.008	0.037	0.012	1	4.490	1.503	2.986
$C_{2.2}$	0.032	0.065	0.016	1	2.000	0.507	3.945
$C_{3.1}$	0.010	0.026	0.101	1	2.507	9.827	0.255
$C_{3.2}$	0.006	0.101	0.101	1	17.357	17.357	1.000
$C_{3.3}$	0.004	0.031	0.035	1	7.929	8.929	0.888
UKUPNO	0.179	0.374	0.447	1	2.083	2.494	0.835

Tabela 6.21. Uporedni prikaz težinskih ocena

Slučaj poredenja dve varijante (A1, A2)

Kriterijum	N_{p1}	N_{p2}	N_{p1}/N_{p1}	N_{p2}/N_{p1}
$C_{1.1}$	0.118	0.089	1	0.757469
$C_{1.2}$	0.000	0.000	1	1.000000
$C_{2.1}$	0.010	0.047	1	4.494505
$C_{2.2}$	0.038	0.075	1	2.003003
$C_{3.1}$	0.039	0.098	1	2.484321
$C_{3.2}$	0.011	0.196	1	17.181820
$C_{3.3}$	0.008	0.063	1	8.090909
UKUPNO	0.225	0.568	1	2.52931

Tabela 6.22. Uporedni prikaz težinskih ocena (A1,A2)

6.4 PRIMENA PROMETHEE METODA

6.4.1 Istorijski kontekst metode

Metodu višekriterijumskog odlučivanja PROMETHEE razvili su profesori Brans i Vincke [Brans et al., 1985]. Metoda PROMETHEE pripada grupi metoda „višeg reda“ i predstavlja jednu od najpoznatijih i najčešće primenjivanih metoda višeg reda, obzirom da prati transparentni računski postupak, a donosiocima odluka je lako shvatljiva. Osim toga, prednosti ove metode leže u načinu strukturiranja problema, količini podataka koja može biti obrađena, mogućnosti kvantifikacije kvalitativnih podataka, dobroj softverskoj podršci i vizualizaciji rezultata [Macharis et al., 2004; Nikolic et al., 2009; Rousis et al., 2008].

Posebna prednost metode PROMETHEE je da zajedno sa pristupom PCA u formi vizualizacije GAIA, predstavlja dobar alat za razmatranje rezultata dobijenih višekriterijumskim modelima. Alat vizuelizacije GAIA razvili su Mareschal i Brans godine 1988. Veoma je važan jer služi kao podrška proceni važnosti kriterijuma. Vizualizacija rezultata čini metod višekriterijumskog odlučivanja pristupačnijim („*user-friendly*“) i sprečava pojavu efekta crne kutije („*black box effect*“) [Brans et al., 1994].

Zbog svoje konceptualne jednostavnosti postala je popularna poslednjih nekoliko godina. Naročito je primetna njena široka primena u situacijama donošenja odluka kao što su procene i rešavanja problema upravljanja vodama. Naime, Behzadian i njegovi saradnici 2010. godine dali su kratak pregled literature o različitim metodologijama i primenama PROMETHEE u različitim naučnim oblastima, gde se poseban deo ove publikacije bavi primenom metode PROMETHEE u specifičnim oblastima kao što su hidrologija i upravljanje vodnim resursima [Bahzadian, 2010]. Prema njihovom istraživanju objavljeno je preko 30 radova iz oblasti hidrologije i upravljanja vodnim resursima, pri čemu je većina radova bila posvećena održivom planiranju vodnih resursa, proceni strategija upravljanja vodnim resursima i planovima navodnjavanja. Pored toga, ovi autori ističu da je publikacije ove dve teme vrlo inovativna u poređenju sa drugim primenama metode PROMETHEE [Abu-Taleb et al., 1995; Ayoko et al., 2007; Raju, Pillai, 1999; Chou et al., 2007; Khelifi et al., 2006].

Familija PROMETHEE obuhvata metode PROMETHEE I, II, V, i VI. Osnovna razlika između njih je ta što PROMETHEE I podrazumeva delimično rangiranje alternativnih rešenja, verzija II takođe omogućava kompletno rangiranje, verzija V podrazumeva segmentaciju ograničenja, a verzija VI se koristi kada nisu precizno dodeljeni težinski kriterijumi [Brans, 1982; Brans, 1996; Brans, 2002; Brans et al., 1992; Brans et al., 1995].

Detaljni postupak primene metode PROMETHEE, već je objašnjen u nekoliko publikacija [Brans et al., 1994; Queiruga et al., 2008]. Cilj „višeg rangiranja“ metodom PROMETHEE je utvrđivanje stepena dominacije jednog alternativnog rešenja nad drugim u okviru skupa opcija A (gde je svaka opcija $a_i \in A$, for $i=1, \dots, m$), za svaki kriterijum C_j (gde je $j = 1, \dots, n$), koji treba biti postignut poređenjem parova alternativnih rešenja iz skupa A . Brans i Mareschal su definisali detaljan proces metode PROMETHEE kroz tri osnovna koraka [Brans et al., 1994], gde se svi kriterijumi smatraju pseudo-kriterijumima, budući da je model graničnih vrednosti

preferencije (n) i/ili indiferencije (m), vezan za vrednosti kriterijuma, a prema datim alternativnim rešenjima.

Pored toga, PROMETHEE metod zahteva da u fazi pravljenja modela, relativne funkcije preferencije i težinski kriterijumi budu definisani za svaki kriterijum [Macharis et al., 2004]. Brans i Vincke 1985. godine, predložili su šest funkcija preferencije u cilju definisanja granica preferentnih i indiferentnih zona [Brans et al., 1985]. Ove funkcije preferencije prikazane su u tabeli 6.23. Konačna rang lista alternativnih rešenja obezbeđena je na osnovu mrežnog toka („*net-flow*“) (Φ) za svako alternativno rešenje, koji zapravo predstavlja balans između pozitivnog (Φ^+) i negativnog (Φ^-) toka prema datim alternativnim rešenjima, to jest razliku $\Phi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i)$.

Postupak „*korak po korak*“ primene ovog metoda višeg ranga predstavljena je u nastavku [Brans et al., 1994]:

Korak 1. Formiranje matrice uticaja/tabele dvostrukog unosa. Matrica uticaja usvojenih kriterijuma ($j=1, \dots, n$) i alternativnih rešenja ($i=1, \dots, m$) može biti uspostavljena putem kardinalnih (kvantitativnih) i regularnih (kvalitativnih) podataka.

Korak 2. Primena funkcije preferencije $P(a, b)$. Za svaki kriterijum, izabrana funkcija preferencije $P(a, b)$ se primenjuje u cilju odlučivanja razlike preferentnosti ishoda a u odnosu na ishod b (tabela 6.24).

Korak 3. Proračun opšteg ili globalnog indeksa $\pi(a, b)$ koji predstavlja intenzitet preferencije a nad b .

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot P_j(a, b); \left(\sum_{j=1}^n w_j = 1 \right) \quad (6.10)$$

Korak 4. Proračun tokova višeg ranga za svako alternativno rešenje $a \in A$:

- Pozitivan tok preferencije višeg ranga (izlazni tok):

$$\Phi^+(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (6.11)$$

- Negativan tok preferencije višeg ranga (ulazni tok):

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{m-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (6.12)$$

PROMETHEE I metod omogućava parcijalno rangiranje alternativnih rešenja, dok PROMETHEE II omogućava kompletno rangiranje alternativnih rešenja računanjem mrežnih tokova:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (6.13)$$

Deo podataka o međusobno neuporedivim alternativnim poređenjima u slučaju PROMETHEE II je izgubljen.

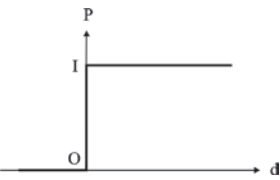
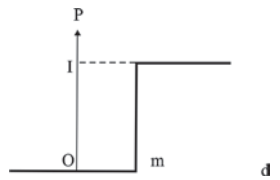
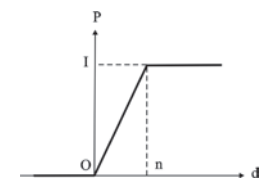
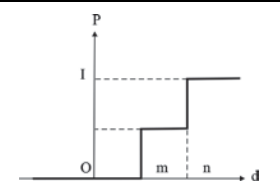
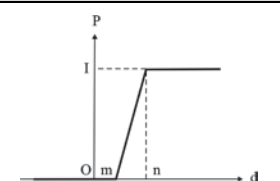
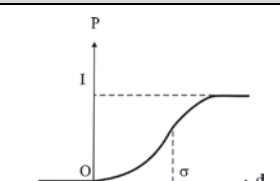
Tip I: Jednostavan kriterijum		
	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$	-
Tip II: Kvazi-kriterijum		
	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq m \\ 1, & d > m \end{cases}$	m
Tip III: Kriterijum sa linearnom preferencijom		
	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ d/n, & 0 \leq d \leq n \\ 1, & d > n \end{cases}$	n
Tip IV: Nivojski kriterijum		
	$P(d) = \begin{cases} 0, & d < 0 \\ 1/2, & m < d < n \\ 1, & d \geq n \end{cases}$	m, n
Tip V: Kriterijum sa linearnom preferencijom i oblašću indiferentnosti		
	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq m \\ \frac{d-n}{n-m}, & m < d \leq n \\ 1, & d > n \end{cases}$	m, n
Tip VI: Gausov kriterijum		
	$P(d) = 1 - e^{-\frac{d^2}{2\sigma^2}}$	σ

Tabela 6.23. Tipovi funkcija preferencije

Analiza GAIA („*Geometrical Analysis for Interactive Aid*“ - „*Geometrijska Analiza za Interaktivnu Pomoć*“), kao dodatak metodi PROMETHEE, pruža važne informacije o rangiranju u dvodimenzionalnom prostoru, dobijenim ekstrahovanjem PCA.

Na ovaj način, moguće je grafički predstaviti problem rangiranja i u isto vreme odrediti karakteristike odnosa između alternativnih rešenja i pružiti važne informacije o prirodi kriterijuma i uticajima parametara težinskih kriterijuma na finalni rezultat rangiranja [Mareschal, 1988].

Kao što je gore napomenuto, ključna tačka u primeni ove metode je definisanje odgovarajuće funkcije preferencije i dodeljivanje težinskih koeficijenata svakom kriterijumu.

Da bi se utvrdile težinske vrednosti kriterijuma potrebno je definisati kriterijume po važnosti u modelu višekriterijumske analize, gde je važnost kriterijuma odraz subjektivne preferencije donosioca odluka kao i subjektivnih karakteristika samog kriterijuma [Zeleny, 1982].

Subjektivna prednost donosioca odluka obično se dodeljuje na osnovu sopstvenog iskustva, znanja i percepcije problema putem tehnika prioriternih pronalaženja poput Analitičkog Hijerarhijskog Procesu (AHP) [Macharis et al., 2004] ili metode Delphi.

Međutim, glavni problem subjektivnog dodeljivanja težinskih vrednosti kriterijumima je nedoslednost [Mareschal, 1988], što bi uglavnom mogao biti rezultat činjenice da donosioci odluka ne mogu uvek biti doslednog prosuđivanja u različitim težinskim šemama i procesima dodeljivanja težinskih vrednosti kriterijumima, jer su suštinski zavisni od samog konteksta.

Osmi toga, ovaj problem može se prevazići korišćenjem procesa objektivnog dodeljivanja težinskih koeficijenata, koji se vrši nezavisno od subjektivnih prioriteta različitih donosioca odluka i to naročito važi kada pouzdane subjektivne težinske vrednosti kriterijuma nisu dostupne.

Osim toga, objektivni težinski kriterijumi važnosti, mereni prosečnom suštinskom informacijom generisanom u datom skupu alternativnih rešenja za svaki kriterijum, odražava prirodu konflikata kriterijuma i omogućava formiranje međuzavisnih kriterijuma [Diakoulaki et al., 1995].

Da bi se procenile objektivne težine može se primeniti dobro poznati metod „*Šenonova entropija*“ („*Shannon's Entropy*“) [Zhi-hong et al., 2006]. Koncept Šenonove entropije koristan je za merenje relativnog razlike intenziteta težinskih vrednosti kriterijuma, da bi se opšta esencijalna slika predstavila donosiocu odluka, odnosno može izmeriti količinu korisnih informacija u dobijenim podacima [Zhi-hong et al., 2006].

Dakle, manja entropijska vrednost upućuje na manji stepen poremećaja sistema, što ukazuje da je razlika vrednosti objekata za evaluaciju na istom kriterijumu visoka odnosno kriterijum pruža više korisnih informacija.

Procedura korak po korak za računanje entropije objektivnih težinskih vrednosti kriterijuma prikazana je u nastavku:

Korak 1. Iz matrice odlučivanja definisane u višekriterijumskoj analizi, svaki element mora biti normalizovan za svaki od kriterijuma C_j ($j=1, \dots, n$):

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}; i = 1 \dots m; j = 1 \dots n. \quad (6.14)$$

Gde je x_{ij} učinak (skor) svakog alternativnog rešenja za dati kriterijum u matrici odlučivanja. Kao posledica, normalizovana matrica odlučivanja koja predstavlja relativni (normalizovani) učinak, dobija se na sledeći način:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{bmatrix}. \quad (6.15)$$

Korak 2. Skup informacija odlučivanja sadržanih u normalizovanoj matrici odlučivanja i emitovanih iz svakog kriterijuma C_j ($j = 1, \dots, n$) može se meriti vrednošću entropije E_j , kao što sledi:

$$0 \leq E_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \leq 1; i = 1 \dots m; j = 1 \dots n. \quad (6.16)$$

gde je odnos $1/\ln(m)$ konstantan, što garantuje entropijsku vrednost E_j između 0 i 1.

Korak 3. Stepen divergencije (d_j) opšte esencijalne informacije sadržane u svakom kriterijumu C_j ($j=1 \dots n$) može biti sračunat kao što sledi:

$$d_j = 1 - E_j; j = 1 \dots n. \quad (6.17)$$

Korak 4. Konačno, entropijska težina j -tog kriterijuma izračunava se na sledeći način:

$$w_{ej} = w_{oj} = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}; j = 1 \dots n. \quad (6.18)$$

Dodatno. Ukoliko donosilac odluka ima a priori subjektivnu važnost težinskih vrednosti (w_{sj}), onda integrisani pristup subjektivnih i objektivnih težinskih vrednosti kriterijuma može biti predložen [Jian et al., 1999], gde se integrisane težine w_{inj} za svaki kriterijum, računaju kao:

$$w_{inj} = \frac{w_{sj} \cdot w_{oj}}{\sum_{j=1}^n w_{sj} \cdot w_{oj}}; j = 1 \dots n. \quad (6.19)$$

6.4.2 Pregled rezultata metode PROMETHEE

U cilju rangiranja predloženih alternativnih konstruktivnih rešenja uređenja rečnih tokova u ovom delu doktorske teze primenjena je metoda kompletnog rangiranja PROMETHEE II za dva slučaja višekriterijumske analize alternativnih rešenja predstavljenih u prvom delu ovog poglavlja i publikaciji „*Multi criteria Analysis of Hydraulic Structures for River Training Works*“ [Marković, 2012]:

Analiziran je i rangiran slučaj poređenja sva tri alternativna rešenja:

1. A1 – betonski kanal,
2. A2 – kanal do gabiona,
3. A3 – „*nulta varijanta*“ regulacionih radova u koritu malih voda.

Takođe, slučaj uporedne analize dva alternativna rešenja A1 i A2 je ispitan i rangiran.

Višekriterijumski model PROMETHEE zasniva se na ulaznim podacima – normalizovanim ocenama datih u tabelama 6.19 i 6.20.

Kriterijumi	Podkriterijumi
Ekonomski - C_1	$C_{1.1}$ – vrednost investicija i troškova održavanja za vremenski period od 5 do 20 godina $C_{1.2}$ – cena sekundarnih uticaja
Socijalni - C_2	$C_{2.1}$ – estetika, pejzaž $C_{2.2}$ – uticaj izvođenja regulacionih radova na stanovništvo u priobalju
Ekološki - C_3	$C_{3.1}$ – <i>GIPS</i> - indeks globalnog uticaja alternativnog rešenja $C_{3.2}$ – <i>GICS</i> - indeks globalnog uticaja konstruktivnog rešenja $C_{3.3}$ – stepen denaturalizacije postojećeg ekosistema

Tabela 6.24. Usvojeni kriterijumi modela višekriterijumskog odlučivanja

Uzimajući u obzir da su sve ocene alternativnih rešenja po svim kriterijumima normalizovane formulama 6.1 i 6.2, maksimalne/minimalne karakteristike svih kriterijuma u oba slučaja definisane su maksimalnom opcijom.

Pored toga, formiranje modela zahteva dodeljivanje nekoliko parametara svakom od kriterijuma. Obzirom da su podaci kvantitativnog karaktera, izabran je tip funkcije preferencije III („Kriterijum sa linearnom preferencijom i oblašću indiferentnosti“), za svaki od kriterijuma, čime se postiže vidljivija razlika u prednostima alternativnih rešenja.

Prag preferencije n_j ($j=1, \dots, n$; za n kriterijuma) definisan je razlikom maksimalnih i minimalnih vrednosti alternativnih rešenja za svaki kriterijum ($n_j = 100\%$), tako da sve vrednosti alternativnih rešenja, čije su vrednosti niže od maksimalnih vrednosti za svaki od kriterijuma, smatraju se važnim za proces analize.

Za proces planiranja projektovanja i izgradnje konstrukcija za uređenje rečnih tokova, koji predstavlja složen i dinamičan sistem, zahteva se određivanje grupe evaluacionih kriterijuma koji obezbeđuju merenje svih relativnih aspekata predloženih rešenja.

U ovom radu, za oba definisana slučaja, usvojen je sledeći skup kriterijuma, predstavljen u tabeli 6.25.

Kriterijum	Podkriterijum	Slučaj dve varijante			Slučaj tri varijante		
		Sc.1- w_{sj}	Sc.2- w_{oj}	Sc.3- w_{inj}	Sc.1- w_{sj}	Sc.2- w_{oj}	Sc.3- w_{inj}
C_1	$C_{1,1}$	0.2075	0.2707	0.3520	0.2075	0.0079	0.0126
	$C_{1,2}$	0.2075	0.1452	0.1888	0.2075	0	0
C_2	$C_{2,1}$	0.0570	0.0966	0.0345	0.0570	0.1814	0.0790
	$C_{2,2}$	0.1130	0.0676	0.0479	0.1130	0.0472	0.0407
C_3	$C_{3,1}$	0.13695	0.1717	0.1473	0.13695	0.0777	0.0813
	$C_{3,2}$	0.20750	0.1397	0.1816	0.20750	0.3983	0.6314
	$C_{3,3}$	0.07055	0.1082	0.0478	0.07055	0.2875	0.1550

Tabela 6.25. Težinske vrednosti kriterijuma za različite scenarije

Kriterijumu navedeni u tabeli 6.24, predstavljaju višekriterijumski okvir za rangiranje ocena alternativnih rešenja A1, A2 i A3.

Osim toga, pošto izabrani kriterijumi nemaju isti značaj u definisanom modelu višekriterijumske analize, procena težinskih koeficijenata svakog kriterijuma takođe utiče na rezultat višekriterijumske analize.

Dakle, tri različita scenarija težinskih koeficijenata kriterijuma razvijena su u cilju predstavljanja suprotstavljenih sistema vrednosti (vidi tabelu 6.25).

Scenario 1 (Sc.1). Prvi (referentni) scenario koristi subjektivne težinske vrednosti kriterijuma u višekriterijumskoj analizi, koja su evaluirana i predstavljena u tabelama 6.19 i 6.20.

Scenario 2 (Sc.2). Drugi scenario koristi objektivne težine sračunate entropijskom metodom.

Scenario 3 (Sc.3). Treći scenario koristi integrisane subjektivne i objektivne težinske vrednosti kriterijuma.

Merene vrednosti težinskih koeficijenata dodeljenih kriterijumima prema različitim scenarijima prikazane su u tabeli 6.25.

6.4.2.1 Pregled rezultata analize tri alternativna rešenja

Za definisani scenario analize tri alternativna rešenja kompletno rangiranje metodom PROMETHEE II izvršeno je korišćenjem softverskog paketa Decision Lab 2000. Na osnovu definisanih ulaznih parametara i podataka, dobijene su vrednosti pozitivnog (Φ^+) i negativnog (Φ^-) kao i glavni mrežni tokovi (Φ) predstavljeni u tabeli 6.26.

Rangiranje	Sc.1		Sc.2		Sc.3	
	Varijanta	Φ	Varijanta	Φ	Varijanta	Φ
1	A2	0.2483	A3	0.3695	A3	0.3923
2	A3	0.1981	A2	0.1443	A2	0.0216
3	A1	-0.4464	A1	-0.5137	A1	-0.4138

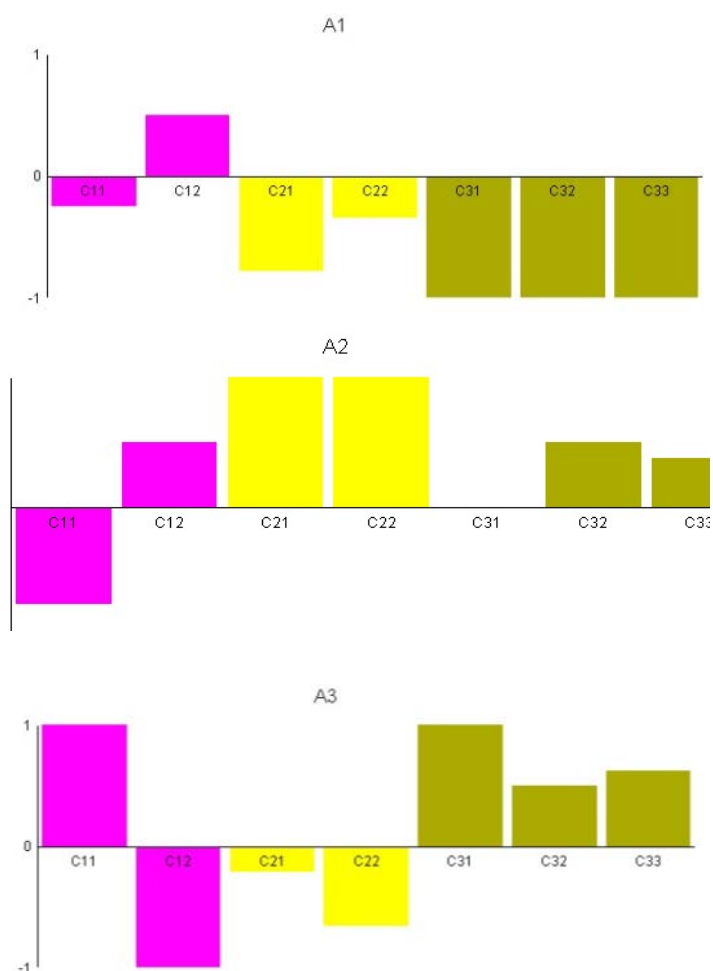
Tabela 6.26. Kompletno rangiranje usvojenih scenarija

Vrednosti mrežnog toka pokazuju da je najbolje alternativno rešenje za scenario Sc.1 (scenario sa subjektivnim skupom težinskih koeficijenata) alternativno rešenje A2 – kanal od gabiona, dok je za druga dva scenarija Sc.2 i Sc.3 alternativno rešenje A3 – „nulta varijanta” određeno kao rešenje izbora konstruktivnog rešenja najveće prednosti.

Štaviše, u sva tri scenarija najmanje preferentno alternativno rešenje je A1 - betonski kanal. Do glavnog razloga ovakvih rezultata rangiranja može se doći analizom uticaja svih kriterijuma na alternativna rešenja. Rezultati dobijeni korišćenjem softverskog paketa Decision Lab 2000, predstavljeni su na slici 6.5. Na osnovu slike 6.6, može se uočiti da alternativno rešenje A1-betonski kanal ima pozitivan uticaj sa gledišta ekonomskih kriterijuma $C_{1.2}$ (cena sekundarnih uticaja), obzirom da alternativno rešenje ima dobru ocenu performansi za cenu sekundarnih uticaja. Dalje, alternativno rešenje A2 – kanal do gabiona, ima pozitivan uticaj sa gledišta

kriterijuma $C_{1,2}$, $C_{3,2}$, $C_{3,3}$, kao i oba socijalna kriterijuma $C_{2,1}$ i $C_{2,2}$ obzirom da je alternativno rešenje A2 najpreferentnije obzirom na socijalne uticaje rešenja uređenje rečnog toka.

Alternativno rešenje A3 takozvana „*nulta varijanta*“ ima pozitivan uticaja sa gledišta ekoloških kriterijuma $C_{3,1}$, $C_{3,2}$ i $C_{3,3}$, kao i kriterijuma $C_{1,1}$, obzirom da ovo alternativno rešenje ima najbolje ocene performanse za vrednost investicija i troškova održavanja za vremenski period od 5 do 20 godina. Sa druge strane ovo alternativno rešenje ima veoma loš socijalni uticaj u odnosu na konkurentno alternativno rešenje A2.



Slika 6.5. Uticaj svih kriterijuma predloženih alternativnih rešenja:

x-osa predstavlja usvojene kriterijume;

y-osa predstavlja tok preferencije alternativnih rešenja za svaki kriterijum.

Dakle, primene težinske vrednosti u takvom slučaju višekriterijumske analize, gde prisutni konfliktne kriterijumi, ozbiljno utiču na finalno rangiranje rezultata u predloženom slučaju scenarija. U prvom scenariju, kada su korišćene subjektivne težinske vrednosti, težinske vrednosti kriterijuma $C_{1,2}$ i $C_{2,2}$ imale su skupa važnost blizu 32% u modelu rangiranja, što je jasan pokazatelj da je alternativno A2 snažno u prednosti u odnosu na alternativno rešenje A3 za ova dva kriterijuma. Ova činjenica dovodi alternativno rešenje A2 na prvo mesto u slučaju scenarija 1.

U druga dva scenarija (Sc.2 i Sc.3), gde je korišćen metod entropije za računanje objektivnih težina u modelu višekriterijumske analize, alternativno rešenje A3 je određeno kao najpovoljnija opcija. Primenjen metod entropije otkriva da je najvažniji kriterijum, tj. kriterijum koji omogućava najveću diferencijaciju između ocene učinka alternativnih rešenja, kriterijum $C_{1,1}$, obzirom da ima najmanju entropijsku vrednost. Kao rezultat, važnost kriterijuma $C_{1,1}$ u modelu PROMETHEE povećan je sa 20.75% (Sc.1) na 27.07% u scenariju 2 i na 35.20% u scenariju 3, i u isto vreme procenjena ukupna važnost kriterijuma $C_{1,2}$ i $C_{2,2}$, koja je povoljnija u alternativnom rešenju A2, smanjena je za 10%. Kao rezultat, rangiranjem pomoću metode PROMETHEE II, korišćenjem objektivnih i integrisanih težinskih vrednosti kriterijuma alternativno rešenje A3 preuzelo je prvu rang poziciju.

Pored toga, dodatna prednost metode PROMETHEE je mogućnost korišćenja GAIA (*Geometrical Analysis for Interactive Assistance*) ravni u ovoj višekriterijumskoj analizi, predstavljenoj na slici 6.6.

S obzirom da je vrednost Δ (koja predstavlja kvantitativnu meru informacionih u definisanom modelu) sasvim zadovoljavajuća ($\Delta = 100\%$), validnost korišćenja ovog grafičkog alata u daljoj prezentaciji rezultata je sasvim logična. U praksi, vrednost Δ je oko 60% i u većini slučajeva veća je od 80% [Brans et al., 1994].

GAIA ravan predstavlja projekciju skupa n alternativnih rešenja koji može biti prezentovan kao oblak od n tačaka u k -dimenzionalnom prostoru, gde n predstavlja broj alternativnih rešenja i k broj kriterijuma.

Na osnovu položaja kriterijuma u ravni GAIA (kvadrati), saglasnost ili sukob između pojedinih kriterijuma može biti utvrđena. Takođe, položaji alternativnih rešenja (trouglovi) određuju jačinu ili slabost karakteristika akcija u odnosu na kriterijum, tj., što je bliže pravcu vektora kriterijuma alternativno rešenje je bolje po tom kriterijumu [Nikolic et al., 2009; Brans et al., 1994].

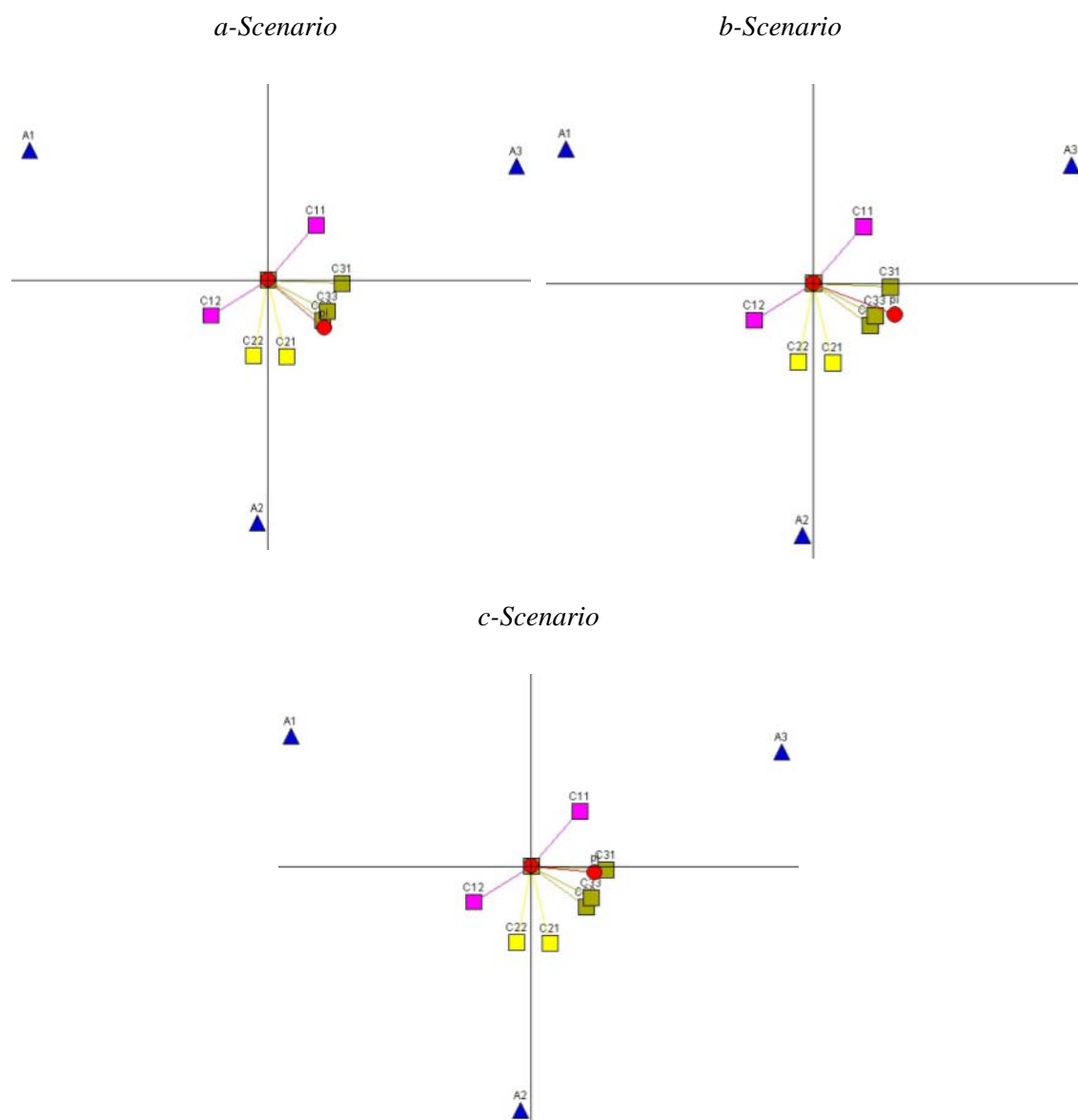
Kao što se može videti na slici 6.6, svih sedam kriterijuma imaju neki uticaj na proces rangiranja alternativnih rešenja. Osim toga, pozicije kriterijuma u ravni GAIA pruža informaciju o konfliktности kriterijuma i kao što je prikazano postoji jak konflikt između kriterijuma $C_{1,1}$ sa jedne strane i grupe kriterijuma $C_{1,2}$, $C_{2,1}$, $C_{2,2}$ sa druge strane. Dakle, tvrdnja da ovi kriterijumi direktno utiču na rangiranje rezultata je potvrđena.

Takođe, orijentacija ovih kriterijuma ka alternativnim rešenjima u ravni GAIA definiše njihov pozitivan ili negativan uticaj na alternativna rešenja. Zatim, položaj alternativnog rešenja A2 u ravni GAIA ukazuje da ovo alternativno rešenje ima najbolje ocene performansi za kriterijum $C_{1,2}$, i u oba socijalna kriterijuma $C_{2,1}$ i $C_{2,2}$. Sa druge strane, alternativno rešenje A3 ima najbolju ocenu performansi za vrednost investicija i troškova održavanja za vremenski period od 5 do 20 godina.

Što se tiče tri ekološka kriterijuma i njihovog položaja u GAIA, može se videti na slici 6.6 da oba alternativna rešenja A2 i A3 mogu zadovoljiti ovu grupu kriterijuma, naročito alternativno rešenje A3 koje je bliže ovoj grupi kriterijuma.

Položaj trećeg alternativnog rešenja A1 ukazuje je da ovo alternativno rešenje najmanje pogodna opcija obzirom da niti jedan kriterijum nije usmeren ka njemu. Štap odlučivanja pi (crveni štap), pokazuje pravac kompromisnog rešenja kao rezultat težinskih vrednosti dodeljenih kriterijumima.

Na slici 6.6 može se videti da je štap odlučivanja u scenariju 1 blago usmeren ka alternativnom rešenju A2, međutim, kada težinske vrednosti kriterijuma počinju da se menjaju kroz scenarije Sc.2 i Sc.3, štap odlučivanja počinje da se kreće u pravcu alternativnog rešenja A3, što potvrđuje rezultat rangiranja PROMETHEE II scenarija slučajja tri alternativna rešenja.



Slika 6.6. GAIA ravan za definisane slučajeve scenarija:
a-Scenario 1; b-Scenario 2; c-Scenario 3

6.4.2.2 Pregled rezultata analize dva alternativna rešenja

Za definisani scenario slučaja dva alternativna rešenja, sprovedeno je PROMETHEE II kompletno rangiranje takođe korišćenjem softverskog paketa Decision Lab 2000.

Na osnovu definisanih ulaznih parametara i podataka, dobijene su vrednosti pozitivnog (Φ^+) i negativnog (Φ^-) kao i glavni mrežni tokovi (Φ) predstavljeni u tabeli 6.27.

Rangiranje	Sc.1		Sc.2		Sc.3	
	Varijanta	Φ	Varijanta	Φ	Varijanta	Φ
1	A2	0.7261	A2	0.9895	A2	0.9834
2	A1	-0.7261	A1	-0.9895	A1	-0.9834

Tabela 6.27. Kompletno rangiranje izabranih scenarija

Rezultati sva tri scenarija ukazuju da je alternativno rešenje A2 - kanal od gabiona pogodnije od alternativnog rešenja A1- betonski kanal.

U ovom slučaju, postoji jasna slika procesa rangiranja, obzirom da je alternativno rešenje A2 dominantnije nad alternativnim rešenjem A1 po šest kriterijuma, osim za kriterijum $C_{1,1}$, gde alternativno rešenje A1 ima bolju ocenu performansi od alternativnog A2.

Da bi se odredila robusnost preferencijalnih odnosa analiza stabilnosti intervala sprovedena je korišćenjem softvera Decision Lab 2000.

Stabilnost intervala dobijena je za svaki kriterijum definisanjem granica u kojima se vrednost težinskih koeficijenata pojedinih kriterijuma može rangirati, dok to ne utiče na rezultate izvedene u okviru PROMETHEE II rangiranja.

Širok interval stabilnosti ukazuje da se rangiranje ne menja čak i kada parametar varira u širokom obimu.

Prema analizi intervala stabilnosti težinskih vrednosti, niti jedan od kriterijuma nije bio značajno nestabilan ili je imao uzak interval stabilnosti, dok će se položaj rangiranja dva alternativna rešenja promeniti samo ako značaj kriterijuma $C_{1,1}$ bude povećan 76% u modelu PROMETHEE.

6.5 TUMAČENJE I UPOREDNA ANALIZA REZULTATA

Korišćenjem pojednostavljene metode *ELECTRE* kao alata višekriterijumskog odlučivanja slučaja analize dva i tri alternativna rešenja, dobijene su subjektivne težinske vrednosti kriterijuma, odnosno, postoji samo jedan scenario slučaja.

Uparednom analizom *tri alternativna rešenja* može se zaključiti sledeće:

- alternativno rešenje A3 (prirodno rečno korito) ima prednost, pre svega zbog malih investicija i zaštite postojećeg ekosistema,
- razlika u težinskim ocenama u odnosu na alternativno rešenje A2 (konstrukcija od gabiona Macaferri sa zatravljenim kosinama) je relativno mala (16,5%); ukoliko se uzme u razmatranje stav lokalnog stanovništva, stiže se do zaključne odluke da se realizuju radovi na alternativnom rešenju A2, koji bi smanjili opasnost od stalne nestabilnosti obala minor korita,
- alternativno rešenje A1 (konstrukcija od betona) je najlošije rešenje, ima investicije 24,26% manje u odnosu na alternativno rešenje A2;
- uz mogućnost ponovne detaljnije analize i konsultacije sa lokalnim stanovništvom sa gledišta realizacije regulacionih radova, *preporučuje se primena rešenja sa konstrukcijom od gabiona Macaferri i ozelenjenim kosinama (A2).*

Uparednom analizom *dva alternativna rešenja*, uz pretpostavku da će se svakako realizovati, može se zaključiti sledeće:

- alternativno rešenje A2 (konstrukcija od gabiona Macaferri sa ozelenjenom kosinom) ima jasnu prednost,
- i pored viših procenjenih investicija (sa preko 24%), prednosti koje daje ovo konstruktivno rešenje, uticaj na stanovništvo (uključujući i uticaj na pejzaž) uz odgovarajuću konzervaciju ekosistema su odlučujući,
- *preporučuje se primena konstrukcije sa gabionima Macaferri sa ozelenjenom kosinom (A2).*

Višekriterijumska analiza jasno ukazuje na činjenicu da razmatranje samo i isključivo investicione vrednosti objekta i troškove održavanja, kao osnovnih kriterijuma odabira rešenja uređenja rečnog toka, ne odgovara svim zahtevima i opštim i lokalnim interesima.

Sa druge strane, korišćenjem *metode PROMETHEE* kao alata u višekriterijumskom odlučivanju, dobijeni su subjektivni, objektivni i integrisani težinski koeficijenti, odnosno postoje tri različita scenarija slučaja.

Uparednom analizom *tri alternativna rešenja* može se zaključiti sledeće:

- vrednosti mrežnih tokova pokazuju da je najpovoljnije alternativno rešenje scenarija Sc.1 (scenario sa subjektivnim težinskim koeficijentima) alternativno rešenje A2 - kanal do gabiona,
- za druga dva scenarija Sc.2 i Sc.3 (scenariji sa objektivnim i integrisanim težinskim koeficijentima) alternativno rešenje A3 - „*nulta varijanta*” je određeno kao najpovoljnije,
- osim toga, u sva tri scenarija na poslednjem mestu rangiranja nalazi se alternativno rešenje A1- betonski kanal,

- uprkos činjenici da je alternativno rešenje A3 određeno kao najpovoljnije u poslednja dva scenarija (Sc.2 i Sc.3), ovo rešenje ima jak negativan socijalni uticaj u odnosu na konkurentno alternativno rešenje A2,
- zbog toga, obzirom da je A1 alternativno rešenje najnepovoljnije u sva tri scenarija i alternativno rešenje A3, socijalno neprihvatljivo, *preporučuje se primena rešenja sa konstrukcijom od gabiona Macaferri i ozelenjenim kosinama (A2).*

Uporednom analizom *tri alternativna rešenja*, uz pretpostavku da će se svakako realizovati, može se zaključiti sledeće:

- A2- kanal od gabiona je povoljniji od alternativnog rešenja A1 u sva tri scenarija,
- alternativno rešenje A2 je dominantno nad alternativnim rešenjem A1 po šest kriterijuma, osim za kriterijum $C_{1,1}$, gde alternativno rešenje A1 ima bolju ocenu performansi od alternativnog rešenja A2,
- posledično, najbolje rangirano alternativno rešenje i time *čvrsto preporučeno je alternativno rešenje (A2).*

Kao što se može videti iz prethodnih rezultata, za slučaj dva i tri alternativna rešenja jednog ili tri scenarija, u svakom proračunu, najbolje rangirano i preporučeno alternativno rešenje je *rešenje sa konstrukcijom od gabiona Macaferri i ozelenjenim kosinama (A2).*

7 PRIMERI DOBRE PRAKSE IZBORA ODRŽIVOG KONSTRUKTIVNOG REŠENJA

7.1 REGULACIJA LJILJANSKE REKE

Ljiljanska reka je desna pritoka Južne Morave u koju se uliva oko 2.5 km nizvodno od Bujanovca odnosno na oko 2 km od ušća Trnovačke reke. Nastaje spajanjem Košaračke reke i Jastrebačke odnosno Selačke reke, neposredno uzvodno od sela Ljiljance sa ukupnom površinom sliva od oko 18 km².

Ljiljanska reka ima dužinu od oko 4 km. Selačka reka, kao njena desna pritoka, ima dužinu od oko 8 km, a Košaračka, kao njena leva pritoka ima dužinu preko 9 km.

U slivu Ljiljanske reke ukupne površine od 17.6 km² hidrografska mreža je jako dobro razvijena. Okvirna zastupljenost biljnog pokrivača je procentualno 62% šuma, 20% obradivih površina i oko 18% livada i pašnjaka.

Ljiljanska reka je samo jedna u nizu neuređenih desnih bujičnih pritoka Južne Morave. Neuređeni su i tokovi Bujanovačke reka, Bogdanovačke reka, Ljiljanske reka, Žvebečke reka, Krševićka reke i drugih.

Tokovi ovih reka u zoni ušća u Južnu Moravu ukrštaju se sa trupom veoma važnom saobraćajnicom, železničkom prugom Niš – Skoplje, gde su ugrađeni propusti nedovoljne propusne moći tako da pri većim vodama u pritokama priobalje uzvodno od pruge biva poplavljeno.

Duž pomenutih desnih pritoka nalazi se više naselja koja imaju velikih nevolja i problema pri pojavi bujičnih voda ovih pritoka. Najdrastičniji slučaj ugrožavanja priobalja od bujičnih voda Ljiljanske reke dogodio se januara 1996. godine kada je bujični poplavni talas prošao kroz selo Ljiljance koje je udaljeno oko 4 km od ušća Ljiljanske reke u Južnu Moravu.

Tom prilikom je došlo do posebno intenzivnog dejstva bujične i dubinske erozije pri čemu je „odnešen“ priobalni seoski put – ulica, potkopano nekoliko električnih stubova i ugrožen novo sagrađeni most u selu. Formirano je jako veliko korito (širine i preko 40 m) sa strmim nestabilnim obalama prosečne visine od oko 3 m.

Najugroženija deonica reke je kroz selo Ljiljance u dužini od oko 1400 m. Korito Ljiljanske reke ima tendenciju stalnog produblivanja u svom srednjem toku i obrušavanja obala naročito kroz selo Ljiljance pričinjavajući velike štete.

U slivu Ljiljanske reke izvedeni su antierozioni radovi na sanaciji postojećih akutnih erozivnih procesa. U cilju podizanja postojećeg produbljenog dna izgrađene se poprečne pregrade od gabiona sa biološkim regulacionim radovima– uređenjem rečnog toka traverzama od pletera između pregrada.

Za proračun regulisanog toka Ljiljanske reke usvojena je velika voda verovatnoće pojave jednom u 50 godina $Q_{2\%}=25,43 \text{ m}^3/\text{s}$ i kontrolne jednom u sto godina $Q_{1\%}$.

Izgrađeno je 11 poprečnih pregrada od 1m na prelivnom delu, na rastojanju od 115 m (kaskadno tečenje). Formiran je trapezni proticajni profil sa širinom u dnu od 10 m i nagibom kosina od 1:2.

Formiranje trapeznog proticajnog profila obezbeđuju vrbovi pleteri na rastojanju od oko 15m kao i po jedan red vrbovih sadnica na rastojanju od oko 1m duž leve i desne regulacione linije. Dimenzije pregrada su od 0.5 m do 1.5 m.

Preliv je pravougaonog oblika na pregradama širine 10 m, visina preliva 1,5 m [DVP Erozijski, 2008].

Analiza konstruktivnog rešenja data je u Tabeli 7.1.



Slika 7.1. Biološki regulacioni radovi - traverze od pletera



Slika 7.2. Izgradnja pregrade od gabiona



Slika 7.3. Pregrada od gabiona



Slika 7.4. Kaskade

I Konstruktivne karakteristike				
Ime objekta	Cilj regulacionih radova	Fleksibilnost/ krutost rečnog korita	Slobodno dreniranje	Intenzitet erozije
Regulacija Ljiljanske reke u selu Ljiljance.	Zaštita rečnog korita od fluvijane erozije, zaštita sela Ljiljanci od poplava, zaštita mosta i puteva.	Fleksibilno rečno korito	Postoji slobodno dreniranje.	Smanjen izgradnjom kaskada i traverzi od pletera.
II Upravljanje/održavanje				
Sanacija objekta			Redovno održavanje	
Teška	Srednje teška	Jednostavna	Srednje teško	Teško
	Zbog bujičarskog karaktera reke.		Jednostavno, pristupačno, niska cena.	
III Cena investicija				
Trajanje (životni vek) konstrukcije				
Pregrade od gabione, 6-7 godina. Nakon tog perioda potrebne su sanacije. Pleteri imaju višegodišnji životni vek.				
IV Problemi zaštite životne sredine				
Ekološka prihvatljivost		Urušavanje pejzaža		
Ekološki prihvatljivo rešenje		Usled velikih poplava pejzaž je uništen, predviđeno je ozelenjavanje površina.		
V Karakteristike regulacionih mera				
Problem imovinskih odnosa		Uticaj regulacionih radova	Saradnja lokalnog stanovništva	
Rešeni problemi eksproprijacije.		Oštećenja na putevima	Jako dobra	
VI Moguća alternativna rešenja				
Postoje alternativna kruta rešenja sa lošijim uticajem na životnu okolinu, pejzaž, većom cenom investicija, težim za održavanje i sanaciju (zaštita kosina i rečnog dna betonskim pločama)				

Tabela 7.1. Analiza konstruktivnog rešenja

7.2 REGULACIONI RADOVI NA TULOVSKOJ RECI

Tulovska reka je leva pritoka Južne Morave u koju se uliva kod mesta G. Krajince, na stacionaži km 115+066. Najviša tačka sliva u slivu Tulovske reke je vrh Vrvu Koliba sa nadmorskom visinom 995 mnm. Tulovska reka je bujični vodotok koji se formira na severnim obroncima planine Kukavice i istočnim obroncima Rudarske kose. Glavni tok se formira od Goleme i Male reke i pritoka Slaniške doline i Janičarske reke kao leve pritoke i niza malih pritoka. Sliv je izuzetno izduženog oblika. Površina sliva je oko 41 km². Korito je uglavnom suvo tokom godine, $Q_{1\%} = 29, 20 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Vodotok preseca niz veoma značajnih saobraćajnica: autoput Beograd-Niš-Skoplje, železničku prugu, stari "carski drum", regionalni put Leskovac - Vlasotince, stari autoput i lokalni put M-9 Nomanica – Zloćudovo – Krajince - Mrštane. Više puta u toku godine, u periodu od 2000 do 2005. godine, Tulovska reka je poplavila Leskovac i prigradska naselja Ančiki i Bobište i naselja Guberevac, Donji i Gornji Bunibrod, Badince (seosko groblje), Nomanicu, Zloćudovo elektro postrojenje i put Leskovac-Vlasotince. Regulacija je izvedena od mosta na starom autoputu do propusta na novom autoputu u mestu Gornje Krajince odnosno od km 0+000 do km 8+100. Pregledna analiza konstruktivnog rešenja data je u tabeli 7.2.



Slika 7.6. Prirodno rečno korito



Slika 7.7. Čišćenje rečnog korita od rastinja



Slika 7.8. Zemljani regulacioni radovi



Slika 7.9. Regulisano rečno korito

I Konstruktivne karakteristike				
Ime objekta	Cilj regulacionih radova	Fleksibilnost/krutost rečnog korita	Slobodno dreniranje	Intenzitet erozije
Regulacioni radovi na Tulovskoj reci	Zaštita mosta, puta i pruge od poplava	Fleksibilna konstrukcija	Slobodno dreniranje	Jak intenzitet erozivnih procesa
II Upravljanje/održavanje				
Sanacija objekta			Redovno održavanje	
Teška	Srednje teška	Jednostavna	Srednje teško	Teško
		Košenje trave, čišćenje korita od rastinja	Gradilište nije u gradskoj oblasti, dobro pristupno	
III Cena investicija				
Trajanje (životni vek) konstrukcije				
Vek trajanja ovih konstrukcija je izuzetno dug, sem u slučaju velikih poplava, kada dolazi do oštećenja obala.				
IV Problemi zaštite životne sredine				
Ekološka prihvatljivost		Urušavanje pejzaža		
Ekološki prihvatljivo rešenje.		Zadržan je prirodni pejzaž.		
V Karakteristike regulacionih mera				
Problem imovinskih odnosa	Uticaj regulacionih radova		Saradnja lokalnog stanovništva	
Problem eksproprijacije postoji.	Izgradnja deponija, mašine oštećuju puteve		Jako dobro	
VI Moguća alternativna rešenja				
Zaštita obala i rečnog dna madracima i gabionima zbog bolje zaštite od erozije.				

Tabela 7.2. Analiza konstruktivnog rešenja

Slabo razvijeni erozioni procesi na slivu i u koritu ovaj vodotok svrstavaju u slabe bujice (koeficijent bujičavosti 0.92), ali na delu između Zoljeva i Tulova dolazi do pojave većeg broja klizišta. Postojeća regulacija Tulovske reke, dužine oko 1300 m, od Zloćudova do Badinca, sa odbrambenim nasipima, izvedena je 1974/75. godine, ali nema projektne dokumentacije, pa nije poznato za koje vode je korito dimenzionisano [DVP Erozijska Kragujevac, 2008].

8 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PREPORUKE ZA DALJA ISTRAŽIVANJA

8.1 ZNAČAJ I AKTUELNOST ISTRAŽIVANJA

Zaštita prirodne i životne sredine je imperativ savremenog doba i u tom pogledu mora postojati opšti društveni konsenzus. Sve naučne discipline koje su u vezi sa prirodom, bilo direktno ili indirektno, moraju voditi računa o ekologiji. U tom okviru, vodoprivreda ima posebno značajnu ulogu, zbog ogromnog značaja vode za životnu sredinu.

Pristup uređenju i korišćenju vodotoka mora biti zasnovan na harmonizaciji vodoprivrednih i ekoloških ciljeva. Bez obzira na aktuelno finansijsko stanje srpske vodoprivrede, takav pristup mora biti naše opredeljenje u budućnosti.

Sa tog stanovišta, zadatak naše nauke bi se sastojao u permanentnom praćenju svetskih trendova i dostignuća u oblasti uređenja, korišćenja i zaštite voda, kao i u analizi pozitivnih i negativnih iskustava drugih zemalja. Na taj način, naša vodoprivredna praksa će biti spremna da prihvati i realizuje savremene koncepte uređenja vodotoka u onom trenutku kada globalna ekonomska snaga zemlje i finansijski potencijal vodoprivrede to budu omogućili [Petković, 2002].

Princip pristupanja problemu uticaja hidrotehničkih konstrukcija na životnu sredinu ne može se utvrditi apriori, obzirom da je to uglavnom rezultat sinteza iskustava u ovoj oblasti.

Pravilno rešavanje problema uticaja konstrukcija na životnu sredinu, posebno u izuzetno kompleksnom domenu hidrotehničkih konstrukcija, nameće izradu dugotrajne „kompleksne i detaljne interdisciplinarnе studije“ i bez ovakvih studija očekivani, iako približni rezultati i predviđanja, nisu pouzdani.

S obzirom da nijedno rešenje nije optimalno kao i podjednako i/ili sva očekivanja i kriterijumi, neophodno je napraviti kompromis u cilju definisanja „redosleda važnosti efekata i aktivnosti (mera) za svaki problem zasebno“, da bi se stavio fokus na najvažnije i da bi bili isključeni sekundarni ne toliko važni aspekti. Ovaj princip je uobičajen, ali praksa pokazuje da okultni interesi često loše tumače procenu ekološkog uticaja i marginalizuju ili isključuju esencijalna pitanja odnosno probleme, koji mogu izazvati najveće posledice.

Veoma je važno, a i preporučljivo da se „prihvate odluke i selektuju rešenja zainteresovanih strana“, tako što će biti uzete u razmatranje relevantne procene, sva mišljenja i kriterijumi koji su izraženi ili su očekivani; donošenje proizvoljnih odluka (tj. onih koje nisu prihvaćene jednoglasno) može imati kasnije, naročito po izvođača radova, ozbiljne i vrlo neprijatne materijalne i moralne posledice.

Zbog činjenice da je većina neophodnih mera (naročito onih koje se odnose na projektovanje) neraskidivo vezana za samu hidrotehničku konstrukciju „projektovanje, selekcija i

implementacija rešenja i mera poboljšanja uticaja na životnu sredinu mora biti sprovedena pod nadzorom i/ili koordinacijom stručnjaka iz oblasti hidrotehnike“.

Preporučljivo je, pri svakoj uporednoj analizi različitih alternativnih rešenja, a uzimajući u obzir implicitne sekundarne efekte, uključiti i osnovno rešenje koje ne predviđa izgradnju hidrotehničke konstrukcije (koja se često naziva i „*alternativa nula*“).

Glavni i konkretan metod za realizaciju gore pomenutih principa je „*ekološko inženjerstvo ili bioinženjerstvo*“. Bioinženjerstvo u svim poljima ljudskih aktivnosti mora naći rešenja, metode i način za razvoj privrede za sprečavanje zagađenja životne sredine, i to razvijajući i uvodeći nove tehnologije i koje ne zagađuju okolinu, zamenom korišćenja pojedinih prirodnih resursa, promenom kriterijuma uspešnosti tj. učinka na kojima se i zasniva usvajanje odluka o ekonomskom razvoju, ublažavanjem neposredno i direktno neizbežno negativnih uticaja na životnu sredinu, itd.

U svojoj primeni, ekološko inženjerstvo mora početi od pretpostavke da očuvanje ekološke ravnoteže, ne podrazumeva nepromenjeno stanje u prirodi, jer je to suprotno osnovnim zakonima njenog postojanja i samim tim neizvodljivo, već da brzinu, dubinu i obim ovakvih promena održi u granicama koje su u skladu sa uravnoteženim razvojem prirodne sredine i mogućnostima obnavljanja, prilagođavanja živog sveta.

Osnovni cilj i kriterijum za procenu mogućnosti i prihvatljivosti promene životne okoline nastalih usled ljudskih aktivnosti mora biti dugotrajno poboljšanje života ljudi, što uključuje i dugotrajno poboljšanje prirode i životne sredine.

Ovakva odgovornost prema budućim generacijama mora postati karakteristika svih naših aktivnosti; ona uključuje ne samo dobru volju i veru već i kompetentnost u svim poljima delovanja naučnih i tehničkih istraživanja, raspodelu finansijskih sredstava, političku i administrativnu brigu, promenu u mentalitetu i načinu razmišljanja i ponašanja većine ljudi, počevši od onih koji imaju moć i u poziciji su da utiču na usvajanje odluka.

Postizanje ovakvih ciljeva je moguće samo ako su pojedinci i institucije uključeni u pripremu, projektovanje, izvođenje i eksploataciju hidrotehničkih konstrukcija savesni i dobro informisani o ekološkim radovima, imaju dobru volju i odlučuju ili deluju uzimajući uvek u obzir posebne odgovarajuće kriterijume.

Ovakav odnos predstavlja suštinu onog što mi nazivamo vodno-ekološko inženjerstvo.

Da bi se uvelo u praksu ono podrazumeva tehničku i naučnu kompetenciju, multidisciplinarnost i stvarnu građansku i društvenu svest.

Njegova spora i otežana implementacija zavisi i uslovljena je neraskidivom vezom između mera za poboljšanje uticaja na životnu sredinu i koncepcije i rešenja u projektu, izvođenja ili eksploatacije uređenja i hidrotehničkih objekata, za razliku od drugih brojnih inženjerskih domena u kojima je zaštita životne sredine često ograničena na „priključivanje“ instalacija za prečišćavanje vazduha ili vode u klasičnom tehnološkom lancu.

Očigledno je da veliki broj zahteva favorizuje ispravna i racionalna rešenja problema uticaja na hidrotehničkih konstrukcija na životnu okolinu. Među takvim zahtevima, možemo istaći nekoliko:

- obezbeđenje odgovarajuće ili bar minimalne kompetencije i kvalifikacije lica koje učestvuju u donošenju odluka vezanih za uređenje vodotokova obzirom na kompleksnost i interdisciplinarnost prirode ovakvih aktivnosti,
- analiza većeg broja rešenja uređenja i konstruktivnih rešenja (slika 7.1), koje se značajno razlikuju ne samo aspekta analize cena i prihoda („*cost-benefit*“ analiza), već i sa drugih aspekata (socijalnih, ekoloških, itd.),
- uključivanje u svakodnevnu praksu metodologije zasnovane na višekriterijumskoj analizi, koja može da zameni proizvoljno, netačno i sporno razmišljanje i zaključivanje,
- pripremanje opštih regionalnih ili nacionalnih ekoloških studija, koje dopuštaju racionalno izvođenje hidrotehničkih rešenja, a prema ekološkom i biološkom potencijalu različitih zona, rečnih slivova i deonica reke,
- stavljanje akcenta na projekte hidrotehničkih konstrukcija i odgovarajuće procene njihovog uticaja na životnu okolinu, na identifikaciju i implementaciju određenih rešenja koja ublažavaju negativne uticaje na životnu okolinu.

Neophodan je i osvrt na situaciju u Srbiji, u oblasti uređenja vodotoka. U vezi s tim, treba istaći da su do sada skoro sve naše reke regulisane po klasičnom konceptu uređenja vodotoka, bez ozbiljnijeg pristupa ekološkim aspektima problematike. Međutim, bilo je i primera drugačijeg pristupa ovoj problematici [Đorđević et al., 1993].

Bez obzira na klasičan koncept regulacije, nije u svim slučajevima regulisanih vodotoka došlo do degradacije priobalnih i akvatičnih ekosistema.

Širina rečnih koridora, raznovrsnost morfoloških oblika i varijacije hidrauličko – morfoloških uslova vodotoka imaju veoma povoljan uticaj na akvatične i priobalne ekosisteme. S druge strane, u većini slučajeva manjih i srednjih vodotoka rečni koridori su znatno suženi posle izvršene regulacije.

Pored toga, regulacionim radovima je izvršeno približno ujednačavanje hidrauličko – morfoloških parametara vodotoka, što je negativno uticalo na uslove opstanka priobalnih i akvatičnih ekosistema.

Na osnovu prethodnog prikaza se može zaključiti da bi savremeni pristup uređenju vodotoka zahtevao renaturalizaciju većeg broja regulisanih reka u Srbiji. Međutim, ako se ima u vidu opšta situacija u srpskoj vodoprivredi, koja se karakteriše brojnim problemima i velikom finansijskom oskudicom, očigledno je se renaturalizacija vodotoka nikako ne može svrstati u aktuelne prioritete, niti je treba planirati u bližoj budućnosti.

Realno bi bilo pristupiti delimičnoj renaturalizaciji vodotoka samo u onim slučajevima kada je i inače neophodna rekonstrukcija regulisanog minor i major korita, usled određenih oštećenja (najčešće, posle većih poplava) [Petković, 2002].

8.2 NAUČNI DOPRINOS DOKTORSKE TEZE

Pojednostavljeni metod višekriterijumskog odlučivanja ELECTRA kao i PROMETHEE GAIA metod koji su primenjeni u ovoj doktorskoj tezi, veoma su dobro poznati u dosadašnjoj matematičkoj teoriji.

Dakle sa naučnog aspekta primenjene optimizacione metodologije razvijene u radu, autor nije dao nov naučni doprinos.

Naučni doprinos ogleda se u sveobuhvatnoj analizi različitih aspekata vezanih za uticaj konstrukcija za uređenje rečnih tokova na životnu sredinu, koji nisu tretirani u literaturi do danas, odnosno:

- metodologiji izbora optimalnih hidrotehničkih konstruktivnih rešenja za uređenje rečnih tokova, koja podjednako razmatra ekonomski interes, socijalni interes i zaštitu životne sredine,
- zahtevi i aktivnosti koji su neophodni za efikasno rešavanje problema vezanih za uticaj hidrotehničkih konstrukcija na životnu sredinu, jasno su definisani.

Tokom poslednje decenije, može su uočiti razrada nekoliko optimizacionih metoda primenjenih u izboru tzv. „ispravnog rešenja“ u skladu sa izabranim kriterijumima.

Ovaj rad razrađuje primenu višekriterijumske analize metodom izbora odgovarajućeg alternativnog rešenja uređenja rečnih tokova predloženog za izabranu deonicu rečnog toka.

Pristup se bazira na autorovom izboru kriterijuma i treba da identifikuje, najbolje rešenje za održivi razvoj rečnog sistema, uključujući uticaj na životnu sredinu izvođenje predloženih regulacionih radova.

8.3 KRITIČKI ASPEKT I PREPRORUKA ZA DALJA ISTRAŽIVANJA

Morfologija rečnog toka je jedan od najkompleksnijih fenomena mehanike fluida. Na vrhu kompleksnosti fenomena su erozija, transport i depozicija nanosa, (naročito u slučaju kohezivnih materijala) gde se još uvek koriste empirijske metode, imaju mogući pozitivan ili negativan uticaj na životnu sredinu (uključujući i socijalne uticaje) i svakako iniciraju postavljanje nekoliko važnih pitanja o razradi brzih matematičkih rešenja.

Težinske ocene, dodeljene od strane autora su slične težinskim ocenama koje su primenili Batelle ili Leopold u matičnom pristupu za studiju EIA i prikazuju istu osetljivost subjektivnih rešenja koja treba biti poboljšana.

Međutim, rešenje predloženo primenom višekriterijumske analize može biti korišćeno za definisanje rešenja ili skupa rešenja u prethodnoj studiji izvodljivosti. Analiza korišćenjem predloženog pristupa izbora postojećih slučajeva gde su konsekvence implementacije važnih regulacionih radova već poznate, mogu značajno poboljšati ili verifikovati sistem izbora alternativnih rešenja.

Optimizacione tehnike iako nisu još uvek u toliko meri prihvaćene od strane inženjerskih zajednica i dalje pružaju značajne mogućnosti razvoja.

Rezultati dobijeni u radu i izvedeni zaključci imaju opšti karakter i mogu se primeniti u svim oblastima upravljanja vodama pri izboru optimalnog hidrotehničkog konstruktivnog rešenja.

Pažnja autora i ostalih istraživača i inženjera u budućnosti treba biti usmerena na utvrđivanje uticaja izgradnje hidrotehničkih konstruktivnih rešenja na životnu sredinu i druge oblasti upravljanja vodama, koje su važne u izboru hidrotehničkih rešenja u skladu sa evropskim trendovima.

LITERATURA

1. [Abu-Taleb et al., 1995] ABU-TALEB, M.F., MARESCHAL, B. *Water resources planning in the Middle East: application of the PROMETHEE V multicriteria method*, *European Journal of Operational Research*, 81: 500-511, 1995
2. [Andrews, 1983] ANDREWS, E.D. *Entrainment of Gravel From Naturally Sorted Riverbed Material*. *Geological Society of America Bulletin*, 94: 1225 - 1231, 1983
3. [Andrews, 1984] ANDREWS, E.D., *Bed-material entrainment and hydraulic geometry of gravel-bed rivers in Colorado*. *Geological Society of America Bulletin*, 95: 371-378, 1984
4. [Arandelović, 2012] ARANĐELOVIĆ, D., MARKOVIĆ, M., MARKOVIĆ-BRANKOVIĆ, J. *Uticaj opterećenja leda na hidrotehničke konstrukcije u rečnom toku*, *Savetovanje Hidrauličara i Hidrologa*, 2012
5. [Așchilean, 2011] AȘCHILEAN, D. *The influence of the foundation systems on the quality and efficiency of the constructions*. PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Technical Univestiy Cluj-Napoca, 2011
6. [Ayoko et al., 2007] AYOKO, G.A., SINGH, K., BALEREA, S., KOKOT, S. *Exploratory multivariate modeling and prediction of the physico-chemical properties of surface water and groundwater*, *Journal of Hydrology*, 336: 115-124, 2007
7. [Behzadian et al., 2010] BEHZADIAN, M., KAZEMZADEH, R.B., ALBADVI, A., AGHDASI, M. *PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and application*, *European Journal of Operational Research*, 200(1): 198-215, 2010
8. [Bao et al., 2011] BAO, C., FANG, C. *Water Resources Flows Related to Urbanization in China: Challenges and Perspectives for Water Management and Urban Development*, *Water Resource Management*, 25: 531-552, 2011
9. [Belton et al., 2002] BELTON, V., STEWART, T. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers, 2002
10. [Boldur-Lățescu, 1982] BOLDUR-LĂȚESCU, G., CIOBANU, G., BĂNCILĂ, I. *Analiza sistemelor complexe*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1982
11. [Brans et al., 1985] BRANS, J.P., VINCKE, P.H. *A preference ranking organization method*, *Management Science*, 31: 647-656, 1985
12. [Brans, 1982] BRANS, J.P. *L'ingenierie de la decision. Elaboration d'instruments d'aide a la decision. Methode PROMETHEE*. In: Nadeau, R., Landry, M.

- (Eds.), *Laide a la decision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir*. Presses de Universite Laval, 1982
13. [Brans, 1996] BRANS, J.P. *The space of freedom of the decision maker modelling the human brain*, *European Journal of Operational Research*, 92: 593-602, 1996
 14. [Brans, 2002] BRANS, J.P. *Ethics and Decision*, *European Journal of Operational Research*, 136: 340-352, 2002
 15. [Brans et al., 1986] BRANS, J.P., MARESCHAL, B., VINCKE, P.H. *How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method*, *European Journal of Operational Research*, 24: 228- 238, 1986
 16. [Brans et al., 1992] BRANS, J.P., MARESCHAL, B. *PROMETHEE V – MCDM problems with segmentation constraints*. *INFOR*, 30(2): 85-96, 1992
 17. [Brans et al., 1994] BRANS, J.P., MARESCHAL, B. *The PROMETHEE GAIA decision support system for multicriteria investigations*, *Investigation Operativa*, 4 (2):107-117, 1994
 18. [Brans et al., 1995] BRANS, J.P., MARESCHAL, B., *The PROMETHEE VI procedure. How to differentiate hard from soft multicriteria problems*, *Journal of Decision Systems*, 4: 213-223, 1995
 19. [Brans et al., 1985] BRANS, J.P., VINCKE, P.H. *A preference ranking organization method. The PROMETHEE method for MCDM*, *Management Science*, 31: 641-656, 1985
 20. [Carstensen, 2008] CARSTENSEN, D. *Ice in hydraulic engineering–theory, phenomena, design parameters*. *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen*, 37, 2008
 21. [Charnes et al., 1961] CHARNES, A., COOPER, W.W. *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. John Wiley & Sons, NY, 1961
 22. [Chen et al., 1992] CHEN, S.J., HWANG, C.L. *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer, NY, 1992
 23. [Chou et al., 2007] CHOU, T.Y., LIN, W.T., LIN, C.Y., CHOU, W.C. *Application of fuzzy theory and PROMETHEE technique to evaluate suitable ecotechnology method: A case study in Shihmen Reservoir Watershed, Taiwan*, *Ecological Engineering*, 31: 269-280, 2007
 24. [Colson et al., 1989] COLSON, G., DE BRUYN, C. *Models and methods in multiple criteria decision making*. Pergamon, Oxford, 1989
 25. [Diaconu, 1999] DIACONU, S. *Waterways – Planning, impact, rehabilitation*. HGA, Bucharest, 1999
 26. [Decision Lab, 2000] DECISION LAB 2000. Visual Decision Inc. Montreal, Canada, 2000
 27. [Diakoulaki et al., 1995] DIAKOULAKI, D., MAVROTAS, G., PAPAYANNAKIS, L.,

- Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method, Computers and Operations Research*, 22: 763-770, 1995
28. [Dodgson et al., 2000] DODGSON, J., SPACKMAN, M., PEARMAN, A.D. *Multi-criteria analysis manual*. Department of the Environment, Transport and Regions, London, 2000
29. [DVP Erozija-Kragujevac, 2010] DVP „EROZIJA“ KRAGUJEVAC. *Idejni i Glavni projekat regulacije Tulovske reke od mosta na starom autoputu do propusta na novom autoputu u selu Gornje Krajince odnosno od km 0+000 do km 8+100*, 2010
30. [DVP Erozija-Niš, 2008] DVP „EROZIJA“ NIŠ. *Regulacija Ljiljanske reke SO Bujanovac – izgradnja pregrade br. 1,10,11 i izgradnja ulivnog objekta*, 2008
31. [Đorđević et al., 1993] ĐORĐEVIĆ, B., JURAK, B. *Naturalna regulacija vodotoka kao način prikladnog uklapanja vodoprivrednih sistema u životnu sredinu, Vodoprivreda*, 24: 137–140, 1993
32. [Ermatita et al., 2011] ERMATITA., SRI, H., RETANTYO, W., AGUS, H. *Electre Methods in Solving Group Decision Support System Bioinformatics on Gene Mutation Detection Simulation, International Journal of Computer Science & Information Technology*, 3(1): 40 – 52, 2011
33. [Figueira et al., 2005] FIGUEIRA, J., GRECO, S., EHRGOTT, M. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London, 2005
34. [Figueira et al., 2005] FIGUEIRA, J., MOUSSEAU, V., ROY, B. *ELECTRE methods*. In J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott, editors, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London, 2005
35. [Fischenich, 2001] FISCHENICH. *Stability Thresholds for Stream Restoration Materials*. EMRRP Technical Notes Collection, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, M.S., 2001
36. [Fischer et al., 2011] FISCHER, J.M., AMEKUDZI, A. *Quality of Life, Sustainable Civil Infrastructure, and Sustainable Development: Strategically Expanding Choice, Journal of Urban Planning and Development*, 137(1): 39-48, 2011
37. [Flug et al., 2000] FLUG, M., SEITZ, H.L. *Multicriteria decision analysis applied to Glen Canyon Dam, Journal of Water Resources Planning and Management*, 126 (5): 270–276, 2000
38. [Friedman et al., 2000] FRIEDMAN, J., HASTIE, T., TIBSHIRANI, R. *Additive Logistic Regression: a Statistical View of Boosting, Annals of Statistics*, 28: 337-37, 2000
39. [Hajwkowicz et al., 2007] HAJKOWICZ, S., COLLINS, K. *A Review of Multiple Criteria Analysis*

- for Water Resource Planning and Management, Water Resource Management*, 21: 1553-1566, 2007
40. [Hajwkowicz et al., 2008] HAJKOWICZ, S., HIGGINS, A. *A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management, European Journal of Operational Research*, 184(1): 255-265, 2008
41. [Harmancioglu, 2008] HARMANCIOGLU, N.B. *Integrated Information Base For Sustainable Water Resources Management, Integration of Information for Environmental Security. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 4: 393-428, 2008
42. [Hemphill et al., 1989] HEMPHILL, R.W., BRAMLEY, M.E. *Protection of River and Canal Banks. Construction, and Industry Research Association, Butterworths, London*, 1989
43. [Hermans et al., 2007] HERMANS, C.M., ERICKSON, J.D., NOORDEWIER, T., SHELDON, A., KLINE, M. *Collaborative environmental planning in river management: An application of multicriteria decision analysis in the White River Watershed in Vermont, Journal of Environmental Management*, 84: 534-546, 2007
44. [Hostmann, 2005] HOSTMANN, M. *Decision Support for River Rehabilitation. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich*, 2005
45. [Hupp, 1992] HUPP, C. *Riparian vegetation recovery patterns following stream channelization: a geomorphic perspective, Ecology*, 73: 1209-1226, 1992
46. [Hwang et al., 1979] HWANG, C.L., YOON, K. *Multiple Attribute Decision Making, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 164, Springer, Berlin, 1979
47. [Hyde et al., 2003] HYDE, K., MAIER, H., COLBY, C. *Incorporating Uncertainty in the PROMETHEE MCDA Method, Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12: 245-259, 2003
48. [Hyde et al., 2005] HYDE, K.M., MAIER, H.R., COLBY, C.B. *Reliability-based approach to multicriteria decision analysis for water resources, Journal of Water Resources Planning and Management*, 130 (6): 429-438, 2005
49. [Ionescu, 1986] IONESCU, Ș. *O propunere pentru alegerea variantelor optime de scheme și obiecte ale amenajărilor hidroenergetice, Hidrotehnica*, 31(1), București, 1986
50. [Jian et al., 1999] JIAN, M., ZHI-PING, F., LI-HUA, H. *A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights, European Journal of Operational Research*, 112 (2): 397-404, 1999
51. [Johnson, 1994] JOHNSON, W. *Woodland expansion in the Platte river, Nebraska: patterns and causes, Ecological Monographs*, 64: 45-84, 1994

52. [Joubert et al., 2003] JOUBERT, A., STEWART, T.J., EBERHARD, R. *Evaluation of water supply augmentation and water demand management options for the City of Cape Town, Journal of MCDA*, 12(1): 17–25, 2003
53. [Julien, 1995] JULIEN, P.Y. *Erosion and Sedimentation*, Cambridge University Press, Cambridge, NY, 1995
54. [Keeney et al., 1976] KEENEY, R.L., RAIFFA, H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. John Wiley & Sons, NY, 1976
55. [Kerkes et al., 2006] KERKES, D.J., FASSETT, J.B. *Rapid Drawdown in Drainage Channels with Earthen Side Slope*. Proceedings of the ASCE Texas Section Spring Meeting, Beaumont, TX, 19 -22, 2006
56. [Khelifi et al., 2006] KHELIFI, O., LODOLO, A., VRANES, S., CENTI, G., MIERTUS, S. *A web-based decision support tool for groundwater remediation technologies selection, Journal of Hydroinformatics*, 8: 91-100, 2006
57. [Knighton, 1998] KNIGHTON, D., *Fluvial Forms and Processes A New Perspective*. Oxford University Press Inc. NY, 1998
58. [Koopmans, 1951] KOOPMANS, T.C. *Activity Analysis of Production and Allocation*. John Wiley & Sons, NY, 1951
59. [Kusumadewi et al., 2006] KUSUMADEWI, S., HARTATI, S., HARJOKO, A., WARDOYO. R. *Fuzzy Multi-Attribute Decision Making*. Penerbit Graha Ilmu, 2006
60. [Kuznetsov, 1948] KUZNETSOV, P.A. *Ice load on hydro-electric engineering installations*. Sb. Tr. LONITOV, Moscow-Leningrad, 1948
61. [Leopold et al., 1964] LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G., MILLER J.P. *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman and Co, San Fransisco, 1964
62. [Macharis et al., 2004] MACHARIS, C., SPRINGAEL, J., DE BRUCKER, K., VERBEKE, A. *PROMETHEE and AHP: The design oh operational synergies in multicriteria analysis. Strengthening PROMETHEE with ideas of AHP, European Journal of Operational Research*, 153(2): 307-317, 2004
63. [Mahmoud et al., 2000] MAHMOUD, M.R., GARCIA, L.A. *Comparison of different multicriteria evaluation methods for the Red Bluff diversion dam, Environmental Modelling & Software*, 15: 471-478, 2000
64. [Mareschal, 1988] MARESCHAL, B. *Weight stability intervals in multicriteria decision aid, European Journal of Operational Research*, 33: 54-64, 1988
65. [Marković, 2004] MARKOVIĆ, M. *Geoinformation system for sustainable water management of a river basin in Serbia*. Master thesis, Faculty of Civil Engineering, Ruhr University, Bochum
66. [Marković, 2011] MARKOVIĆ, M., MARKOVIĆ-BRANKOVIĆ, J. *Donošenje odluka u projektima upravljanja životnom sredinom, Zbornik radova*

- Grđevinsko-arhitektonskog fakulteta u Nišu, 26:17-26, 2011
67. [Marković, 2012] MARKOVIĆ, M. *Multi criteria Analysis of Hydraulic Structures for River Training Works*, *Water Resource Management*, 26(13): 3893-3906, 2012
68. [Marković, Đurđanović, 2012] MARKOVIĆ, M., ĐURĐANOVIĆ, J. *Flood risk assessment using GIS: A case study of the Nisava river sector, Serbia*, *International Conference on Land Conservation – LANDCON 1209*, 2012
69. [Mendoza et al., 2006] MENDOZA, G.A., MARTINS, H. *Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms*, *Forest Ecology and Management*, 230(1-3): 1–22, 2006
70. [Neumann et al., 1944] VON NEUMANN, J., MORGENSTERN, O. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, Princeton, 1944.
71. [Nikolic et al., 2009] NIKOLIĆ, DJ., JOVANOVIĆ, I., MIHAJLOVIĆ, I., ŽIVKOVIĆ, Ž. *Multi-criteria ranking of copper concentrates according to their quality – An element of environmental management in the vicinity of copper – Smelting complex in Bor, Serbia*, *Journal of Environmental Management*, 91: 509–515, 2009
72. [Opricović et al., 2007] OPRICOVIĆ, S., TZENG, G.H. *Extended VIKOR method in comparison with outranking methods*, *European Journal of Operational Research*, 178: 514-529, 2007
73. [Pardalos et al, 1995] PARDALOS, P.M., SISKOS, Y., ZOPOUNIDIS, C. *Advances in Multicriteria Analysis*. Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1995.
74. [Pardalos et al., 2010] ZOPOUNIDIS, C., PARDALOS, P.M. *Handbook of Multicriteria Analysis*, Springer, 2010
75. [Petković, 2002] PETKOVIĆ, S. *Savremeni pristup uređenju vodotoka*, *Vodoprivreda*, 2001/1-6: 189 – 194, 2002
76. [Pianc, 1987] PIANC. *Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geo-textiles for inland waterways*. Report of InCom WG04, supplementation to Bulletin no 57, Pianc, Brussels, 1987
77. [Queiruga et al., 2008] QUEIRUGA, D., WALTHER, G., GONZALEZ-BENITO, J., SPENGLER, T. *Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain*, *Waste Management*, 28(1): 181-190, 2008
78. [Raju et al., 2000] RAJU, K.S., DUCKSTEIN, L., ARONDEL, C. *Multicriterion Analysis for Sustainable Water Resources Planning: A Case Study in Spain*, *Water Resources Management*, 14: 435-456, 2000
79. [Raju, Kumar, 1999] RAJU, K.S., KUMAR, D.N. *Multicriterion decision making in irrigation*

- planning, Agricultural Systems*, 62: 117-129, 1999
80. [Raju et al., 2006] RAJU, K.S., KUMAR, D.N. *Ranking Irrigation Planning Alternatives Using Data Envelopment Analysis, Water Resources Management*, 20: 553-566, 2006
81. [Raju, Pillai, 1999] RAJU, K.S., PILLAI, C.R.S. *Multicriterion decision making in river basin planning and Development, European Journal of Operational Research*, 112: 249-257, 1999
82. [Rasekh et al., 2010] RASEKH, A., AFSHAR, A., AFSHAR, M.H. *Risk-Cost Optimization of Hydraulic Structures: Methodology and Case Study, Water Resources Management*, 24: 2833-2851, 2010
83. [Raven et al., 2002] RAVEN, P.J., HOLMES, N.T.H., CHARRIER, P., DAWSON, F. H., NAURA, M., BOON, P.J. *Towards a harmonised approach for hydromorphological assessment of rives in Europe: a qualitative comparison of three survey methods. Aquatic Conservation, Marine and Freshwater Ecosystems* , 12: 477-500, 2002
84. [Rousis et al., 2008] ROUSIS, K., MOUSTAKAS, K., MALAMIS, S., PAPADOPOULOS, A., LOIZIDOU, M. *Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus, Waste Management*, 28(10): 1941-1954, 2008
85. [Roy, 1968] ROY, B. *Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE)*, RIRO, 8 : 57-75, 1968
86. [Roy, 1973] ROY, B. *How outranking relation helps multiple criteria decision making*. In J. Cochrane and Z. M. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Making*, University of South Carolina Press, 179-201, 1973
87. [Saeki, 2011] SAEKI, H. *Mechanical Properties Between Ice and Various Materials Used in Hydraulic Structures: The Jin S. Chung Award Lecture, International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 21(2): 81-90, 2011
88. [Savage, 1954] SAVAGE, L.J. *The Foundations of Statistics*. John Wiley & Sons, NY, 1954
89. [Saville et al., 1962] SAVILLE, T.JR., MCCLENDON, E.W., COCHRAN, A.L. *Freeboard allowances for waves in inland reservoirs, ASCE Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88: 93 -124, 1962
90. [Shields et al., 2006] SHIELDS F.D.Jr., SMITH, R.H. *Effects of large woody debris removal on physical characteristics of a sand-bed river, Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2: 145-63, 2006
91. [Simon et al., 2004] SIMON, U., BRUGGEMANN, R., PUDENZ, S. *Aspects of decision support in water management—example Berlin and Potsdam I—spatially differentiated evaluation, Water Research*, 38:1809-1816, 2004

92. [Tamuno et al., 2009] TAMUNO, P.B.L, SMITH, M.D., HOWARD, G. *Good Dredging Practices: The Place of Traditional Eco-livelihood Knowledge*, *Water Resources Management*, 23: 1367-1385, 2009
93. [TAW, 2004] TAW. *De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2004
94. [UNEP, 1992] UNITED NATIONS. *Climate change 1992*. The Suplymentary Report to The IPCC Scientific Asscessment, United Nations Enviroment Programe, 1992
95. [Urošev et al., 2009] Urošev, M., Milanović, A., Milijašević, D. *Assessment of the river habitat quality in undeveloped areas of Serbia applying the RHS (river habitat survey) method*. Zbornik radova Geografskog instituta „Jovan Cvijić”, SANU, 59 (2): 37-58, 2009
96. [Van der Meer, 1988] VAN DER MEER, J.W. Rock slopes and gravel beaches under wave attack. PhD Thesis. Delft University of Technology, 1988
97. [Van Herpen, 1998] VAN HERPEN, J.A. *Bituminous revetments*. In: Pilarczyk, K.W. (editor), *Dikes and revetments. Design, maintenance and safety assessment*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1998
98. [Vincke, 1992] VINCKE, P. *Multi-criteria Decision-Aid*, John Wiley, Chichester, 1992
99. [Wasson et al.,1998] WASSON J.G., MALAVOI J.R., MARIDET L., SOUCHON Y., PAULIN L. *Impacts écologiques de la chenalisation des rivières*, *Ministere de l'environnement*. Direction de L'Eau, Rapport final, 1998
- 100.[Weistroffer, et al., 2005] WEISTROFFER, H.R., SMITH, C.H., NARULA, S.C. *MCDM Software*. In: *Figueira, J., Salvatore, G., Ehrgott, M. (Eds.), Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer, NY, 989–1018, 2005
- 101.[Wohl, 2000] WOHL, E. *Mountain Rivers*. American Geophysical Union, Washington, D.C., 2000
- 102.[Wydowski et al., 2000] WYDOVSKI, R., WICK, E. *Flooding and aquatic ecosystems*. In: *Inland flood hazards*, Ed. Wohl E. , Cambridge Univesity Press, Cambridge, 2000
- 103.[Zeleny, 1982] ZELENY, M. *Multiple criteria decision making*. NY: McGraw-Hill, 1982
- 104.[Zhi-hong et al., 2006] ZHI-HONG, Z., YI, Y., JING-NAN, S. *Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment*, *Journal of Environmental Sciences*, 18(5): 1020-1023, 2006