



УНИВЕРЗИТЕТУ НОВОМ САДУ
ПОЉОПРИВРЕДНИ ФАКУЛТЕТ

Проф. др Милица Вранешевић



ОБЈЕКТИ У ЗАШТИТИ ОД ЕРОЗИЈЕ

УЏБЕНИК





Проф. др Милица Вранешевић

ОБЈЕКТИ У ЗАШТИТИ ОД ЕРОЗИЈЕ



**POJOPRIVREDNI
FAKULTET**
UNIVERZITET U NOVOM SADU

**Универзитет у Новом Саду
Пољопривредни факултет
Департман за Уређење вода**

Нови Сад, 2025.

ЕДИЦИЈА ОСНОВНИ УЏБЕНИК

Оснивач и издавач едиције

Универзитет у Новом Саду
Пољопривредни факултет Нови Сад,
Трг Доситеја Обрадовића 8, 21000 Нови Сад

Година оснивања

1954.

Главни и одговорни уредник едиције

др Ненад Магазин, редовни професор
Декан Пољопривредног факултета

Чланови Комисије за издавачку делатност

Проф. др Марица Петровић, председник
Проф. др Ивана Давидов, члан
Проф. др Зорица Срђевић, члан
Проф. др Ксенија Мачкић, члан
Доц. др Дејан Беуковић, члан

CIP - Каталогизација у публикацији
Библиотеке Матице српске, Нови Сад

712:[502.52:631.4(075.8)

ВРАНЕШЕВИЋ, Милица, 1983-

Објекти у заштити од ерозије / Милица Вранешевић. - Нови Сад :
Пољопривредни факултет, 2025 (Ниш : Графика Галеб). - 90 стр. :
илустр. ; 30 см. - (Едиција Основни уџбеник)

Тираж 20. - Библиографија.

ISBN 978-86-7520-632-3

а) Ерозија -- Заштита -- Објекти б) Пејзажна архитектура -- Заштита
од ерозије

COBISS.SR-ID 173206025

Аутор
Проф. др Милица Вранешевић

ОБЈЕКТИ У ЗАШТИТИ ОД ЕРОЗИЈЕ

Главни и одговорни уредник
Проф. др Ненад Магазин, декан

Уредник
Доц. др Радош Земунац, директор

Технички уредник:
Проф. др Милица Вранешевић

Рецензенти:
Проф. др Зорица Срђевић, УНО Уређење, заштита и коришћење вода, Департман за
Уређење вода, Пољопривредни факултет, Универзитет у Новом Саду
Проф. др Маријана Каповић-Соломун, УНО Екологија шума, Шумарски факултет,
Универзитет у Бања Луци

Издавач:
Универзитет у Новом Саду, Пољопривредни факултет Нови Сад

Забрањено прештампавање и фотокопирање. Сва права задржава издавач.

Штампа:
Графика Галеб доо, Ниш

Штампање одобрила:
Комисија за издавачку делатност

Тираж:
20

Место и година штампања:
Нови Сад, 2025

Одлуком наставно-научног већа Пољопривредног факултета у Новом Саду од
28.04.2025. рукопис је одобрен за издавање као основни уџбеник.

Фотографија корица: Велика брана на Ћетињи, Ужице, 2025. (фото: Б. Вранешевић)

Предговор

Ерозија је један од узрока деградације земљишта, водних ресурса и инфраструктуре. Убрзана природним и антропогеним факторима, доводи до губитка плодног земљишта, наноса у водотоцима, смањења капацитета акумулација и оштећења хидротехничких објеката. Такође повећава ризик од бујичних поплава, угрожавајући насеља, пољопривредне површине и саобраћајнице. Контрола ерозије захтева систематско планирање и примену техничких решења. Објекти у заштити од ерозије, попут попречних и паралелних објеката у бујичним токовима, брзотока и акумулација, играју важну улогу у очувању водних ресурса и земљишта. Њихово правилно пројектовање и извођење омогућавају контролу ерозионих процеса, успостављање стабилности водотока и заштиту приобалних подручја.

Овај уџбеник има за циљ да пружи теоријске основе и практичне смернице за пројектовање и примену објеката за заштиту од ерозије. Намењен је студентима који слушају предмет *Објекти у заштити од ерозије* на студијским програмима „Уређење, коришћење и заштита вода“ и „Пејзажна архитектура“ на IV години. Поред студената, уџбеник могу користити и инжењери, истраживачи и доносиоци одлука у области заштите земљишта и вода, као и сви стручњаци који се баве планирањем и извођењем хидротехничких објеката.

Уџбеник је подељен у неколико тематских целина које омогућавају постепено усвајање знања из области заштите од ерозије и пројектовања одговарајућих објеката.

Поред тога што представља неопходну литературу за студенте, овај уџбеник пружа корисну теоријску основу и за инжењере који се баве водопривредним, пољопривредним, шумарским и грађевинским радовима у областима заштите вода и земљишта. Разумевање ерозионих процеса и техничких решења за њихову контролу кључно је за одрживо управљање природним ресурсима и заштиту инфраструктуре.

Стечено знање из области заштите од ерозије потребно је применити у пракси како би се смањиле последице деградације земљишта и водних ресурса. Развој нових метода и технологија за контролу ерозије представља сталан изазов за инжењере и истраживаче. Надам се да ће овај уџбеник допринети бољем разумевању значаја проблема и подстаћи даљи рад на унапређењу заштите од ерозије, како код будућих инжењера који тек граде своје знање, тако и код стручњака у пракси, којима може послужити као референтна литература за продубљивање стручних знања и подсећање на кључне принципе и решења у овој области.

У новом Саду,
20. март 2025. године

Аутор
Проф. др Милица Вранешевић

Захвалност

*Изражавам искрену захвалност професору **Сими Белићу**, који је први конципирао овај предмет и својим знањем и посвећеношћу усмерио моје разумевање ове области. Његова подршка и савети научили су ме како да свакодневно обогаћујем овај предмет, надограђујући га новим сазнањима и искуствима.*

*Захвалност дугујем рецензенткињама, проф. др **Зорици Срђевић** и проф. др **Маријани Каповић-Соломун**, које су конструктивним саветима и сугестијама допринеле да овај уџбеник добије јаснију структуру и већу стручну вредност.*

*Као грађевинском инжењеру, сестри **Биљани Цоцек** се посебно захваљујем, јер је дала драгоцен допринос кроз оригиналне и прецизно обрађене илустрације, чија је улога у визуелизацији сложених концепата немерљива.*

*Захваљујем се и својим родитељима **Драгани** и **Драгану Рајковић**, који су са великом пажњом читали рукопис и, као стручњаци из својих области, пружили драгоцене коментаре и непроцењиву подршку.*

*Највећу захвалност упућујем својој породици – супругу **Бранку** и деци, **Снежани**, **Максиму** и **Светлани**, који су са неизмерном стрпљивошћу и разумевањем подржавали сваки тренутак који сам посветила овом раду. Њихова љубав и подршка били су ми највећа снага и инспирација за све што сам постигла.*

*Аутор
Проф. др Милица Вранешевевић*

Садржај

УВОД.....	10
1. КЛАСИФИКАЦИЈА ВОДОПРИВРЕДНИХ ОБЈЕКТА.....	11
2. ПОДЛОГЕ КОД ПРОЈЕКТОВАЊА ОБЈЕКТА	16
3. АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ И ОПТЕРЕЋЕЊА ОБЈЕКТА	18
ОБЈЕКТИ ЗА УРЕЂЕЊЕ БУЈИЧНИХ ТОКОВА	21
1. ЕРОЗИЈА – ПОЈАМ И ИСТОРИЈАТ.....	21
2. КЛАСИФИКАЦИЈА ЕРОЗИОНИХ ПРОЦЕСА	24
2.1. Класификација ерозије земљишта на бази ерозионих агенаса	26
2.2. Класификација ерозије земљишта на бази ерозионих облика	26
2.3. Класификација ерозије земљишта на бази ерозионих агенаса и ерозионих облика.....	26
2.4. Класификација ерозије земљишта према јачини ерозионих процеса	27
3. ЕРОЗИЈА ВЕТРОМ.....	31
3.1. Облици кретања земљишних честица узрокованог ветром	32
3.2. Фактори који утичу на еолску ерозију	36
3.3. Главни принципи контроле еолске ерозије.....	39
4. ЕРОЗИЈА ВОДОМ	41
4.1. Класификација водне ерозије.....	43
4.2. Фактори настанка ерозије водом	50
4.3. Главни принципи контроле водне ерозије	57
5. БУЈИЧНИ ТОКОВИ.....	58
5.1. Класификација бујичне ерозије	62
5.2. Системи уређења бујичних токова	66
5.3. Пројектовање радова у бујичном кориту	78
5.4. Одређивање максималних протицаја бујичних вода	78
5.5. Пројектовање трасе регулације за уређење бујичног тока.....	87
5.6. Пројектовање уздужног пада бујичног тока.....	88
6. ПАРАЛЕЛНИ ОБЈЕКТИ У БУЈИЧНОМ КОРИТУ	89
7. ПОПРЕЧНИ ОБЈЕКТИ У БУЈИЧНОМ КОРИТУ	92
7.1. Елементи попречних објеката.....	95
7.2. Хидрауличко димензионисање попречних објеката.....	97

7.3. Статичко димензионисање попречних објеката.....	106
7.4. Техничке препоруке за извођење и пројектовање.....	111
8. БРЗОТОЦИ.....	113
8.1. Хидраулички прорачун брзотока.....	117
9. ПИТАЊА ЗА ПРОВЕРУ ЗНАЊА ИЗ ОБЛАСТИ: ОБЈЕКТИ ЗА УРЕЂЕЊЕ БУЛИЧНИХ ТОКОВА	119
АКУМУЛАЦИОНИ БАСЕНИ У ФУНКЦИЈИ ЗАШТИТЕ ОД ЕРОЗИЈЕ	120
1. АКУМУЛАЦИЈЕ – ПОЈАМ, ЗНАЧАЈ И ПРИМЕНА.....	120
2. ПОСЛЕДИЦЕ ФОРМИРАЊА ВЕШТАЧКИХ ЈЕЗЕРА	124
2.1. Економске и социјалне последице.....	125
2.2. Планирање употребе земљишта.....	127
2.3. Друштвено – економске последице	129
2.4. Институционални аспекти.....	130
2.5. Оцена изводљивости и финансијски аспекти	130
3. ИЗБОР ЛОКАЦИЈЕ ЗА ОБРАЗОВАЊЕ АКУМУЛАЦИЈЕ	132
3.1. Карактеристике слива	132
3.2. Климатски чиниоци	135
3.3. Топографски услови.....	136
3.4. Хидрогеолошки услови	137
3.5. Анализа наноса	138
3.6. Потребе корисника.....	140
3.7. Одређивање корисне запремине акумулације	142
3.8. Управљање акумулацијама	143
3.9. Режији изравнања у акумулацијама.....	144
4. ИЗБОР МЕСТА И ВЕЛИЧИНЕ АКУМУЛАЦИЈЕ	145
5. КЛАСИФИКАЦИЈА БРАНА	147
5.1. Бетонске бране.....	149
5.2. Меке бране	157
5.3. Камене бране	167
5.4. Земљане бране	170
6. Елементи насутих земљаних брана	173
6.1. Тело насуте земљане бране	175
6.2. Обликовање косина и облога косина.....	180

6.3. Градња тела бране	181
7. ОСМАТРАЊЕ БРАНА	184
8. ЕВАКУАЦИОНИ ОРГАНИ	188
8.1. Преливни органи	188
8.2. Испусни органи	191
9. УЗРОЦИ РУШЕЊА МАЛИХ ЗЕМЉАНИХ БРАНА	192
9.1. Рушење услед преливања	193
9.2. Рушење услед провирних вода	194
9.3. Рушење услед клизања косина бране	194
9.4. Рушење услед удара таласа	196
9.5. Рушење услед неисправности преливних и испусних органа.....	196
9.6. Рушење усле осталих узрочника.....	198
10. ПИТАЊА ЗА ПРОВЕРУ ЗНАЊА ИЗ ОБЛАСТИ: АКУМУЛАЦИОНИ БАСЕНИ У ФУНКЦИЈИ ЗАШТИТЕ ОД ЕРОЗИЈЕ.....	199
ЛИТЕРАТУРА	200

УВОД

У савременом свету, где су климатске промене постале неизбежна стварност, нарочито у оквирима хидрометеоролошких екстрема (поплава и суше), борба против ерозије земљишта добила је на значају. Ерозија, у најширем смислу, представља процес који угрожава екосистеме, умањује плодност земљишта и представља озбиљну претњу не само за пољопривредне производњу, већ и за читаву планету. У том контексту, неопходно је да се више различитих струка укључи у развијање нових техника и објеката који ће помоћи у заштити и обнови деградираних површина угрожених ерозионим процесима.

Објекти који се користе у заштити од ерозије врше и друге функције неопходне за неометан рад у области водопривреде, пољопривреде, шумарства, саобраћаја, енергетике и других грана. У сваком уређењу водених ресурса у одређеној области или сливу, обично постоји више приступа за остваривање ефикасног управљања, коришћења и заштите вода. Међу тим могућим решењима, често се може идентификовати једно које доноси највећу нето корист када се сагледају предности и недостаци таквог уређења. Газдовање водом или водопривредно планирање обухвата планирање, пројектовање, извођење и експлоатацију објеката с циљем максимизирања користи и минимизирања или елиминисања могућих штета. Такво планирање захтева увид у разне привредне и техничке аспекте, што га чини веома сложеним. Због те сложености, водопривреда се не може посматрати као самостална грана привреде, јер би укључивала многе већ постојеће секторе. Уместо тога, водопривреда представља правилно разумевање односа према водним ресурсима. Ова перспектива је променљива у времену, јер је неопходно да се прилагођава потребама друштва, могућим и новим методама управљања водама и захтевима за заштиту животне средине.

Комплетно уређење вода се постиже избором одговарајућег техничког решења и одређивањем прикладне конструкције. Те активности спадају у област хидротехнике, која укључује научна истраживања и техничка решења за радове и конструкције намењене регулацији и управљању водама.

Конструкције примењене у радовима на водама, без обзира да ли их користимо или се бранимо од њих, називамо **хидротехничке конструкције** или **водопривредни објекти**. Водопривредне објекте групишемо према њиховој намени тј. по врсти рада на водама. Намена објеката је извршење задатака из домена:

- **уређења вода,**
- **коришћења вода,**
- **заштите од вода** (у ову групу спадају и објекти у заштити од ерозије) и
- **заштите вода.**

Сви објекти морају испунити одређене услове, а то су:

- **планирана функција,**
- **статичка стабилност,**
- **хидрауличка поузданост и**
- **утицај на околину.**

1. КЛАСИФИКАЦИЈА **ВОДОПРИВРЕДНИХ ОБЈЕКТА**

Постоји више различитих класификација водопривредних објеката. Најчешће коришћена је она која класификује објекте према:

- месту изградње,
- условима коришћења,
- деловању на ток воде и
- намени.

Према месту изградње објекти даље могу да се разврстају на:

- **Речне објекте** који се граде директно на воденим токовима (рекама, каналима и потоцима) ради регулације тока, заштите од поплава и ерозије или за потребе коришћења воде.
- **Језерске објекте** који се граде на природним или вештачким језерима (акумулацијама). Користе се за складиштење воде, снабдевање водом, хидроенергетику, наводњавање или заштиту од поплава.
- **Подземне објекте** који се постављају испод површине земље ради коришћења подземних вода или заштите од загађења.
- **Обалне и приобалне објекте** се налазе на обалама мора, језера и великих река, где служе за заштиту од ерозије, контролу плављења или за посебне намене, као што су луке, марине и одбрамбени објекти.
- **Услужне објекте и инфраструктуру** који обухватају објекте изграђене у близини водопривредних објеката ради обављања потребних операција и надзора, као што су пумпе, контролне станице и приступни путеви.

Подела према условима коришћења омогућава ефикасно планирање и прилагођавање водопривредних објеката специфичним потребама и околностима коришћења. Објекти могу да се поделе на:

- **Сталне објекте** који се пројектују, граде и експлоатишу тако да функционишу током дужег временског периода и служе за дугорочно

коришћење водних ресурса или заштиту од ерозије или поплава. У зависности од врсте уграђеног материјала у економским прорачунима, предвиђа се да њихова експлоатација буде од 25 до 100 година. Према значају и штети која би могли да се деси услед њиховог рушења ови објекти се даље могу поделити у две подгрупе:

- Објекти ван категорије који подразумевају енергетске објекте, високе бране, водоторњеве и сл. и
- Објекте прве категорије који подразумевају бране, црпне станице, обалоутврде водоводе и сл.
- **Привремене објекте** који се постављају ради краткотрајног коришћења, ремонта или привремене заштите и обично се уклањају након што испуне своју функцију. То су, на пример, привремени насипи, привремене преграде и монтажне бране које се користе у току грађевинских радова или током сезонских плављења.
- **Сезонске објекте** који се користе само у одређеним периодима године, зависно од сезонских потреба или климатских услова.
- **Објекте са повременим коришћењем** који се активирају само у случају потребе, као што су објекти за одбрану од поплава, који функционишу током високих вода или екстремних хидролошких услова (покретне црпне станице и сл.).

Подела према деловању на ток воде омогућава боље планирање и управљање водним ресурсима у зависности од специфичних потреба и карактеристика речних система и деле се на:

- **Објекте за задржавање воде.** Ови објекти се граде како би задржали део или целу количину воде и контролисали проток низводно. Примери укључују бране, акумулације и ретензионе базене који складиште воду ради смањења поплавних таласа, наводњавања или хидроенергетских потреба.
- **Објекте за преусмеравање тока воде** који се граде у служби скретање дела тока воде ка одређеном подручју или објекту. У ову групу спадају канали, деривациони системи и уставе које преусмеравају воду ка хидроелектранама, пољима за наводњавање или другим корисницима.
- **Објекте за регулацију тока** који се користе за контролу брзине и обима протока воде кроз одређене делове водотокова. Ту спадају насипи, обалоутврде и корита прилагођена за регулисање тока и смањење ерозиони процеса или поплава.
- **Објекте за заштиту од поплава.** Ови објекти су пројектовани да задрже или усмере воду током поплава како би заштитили људе, имовину и

инфраструктуру. Примери су насипи, поплавни зидови и ретенциони простори који смањују интензитет поплавних таласа.

- **Објекте за подизање нивоа воде** који се постављају како би подигли ниво воде ради омогућавања пловидбе или снабдевања водом. Ту спадају уставе, преграде или бране које подижу ниво реке или канала на жељену висину.

Подела према намени омогућава да се водопривредни објекти ефикасно користе за различите потребе и услове управљања водним ресурсима и деле се на:

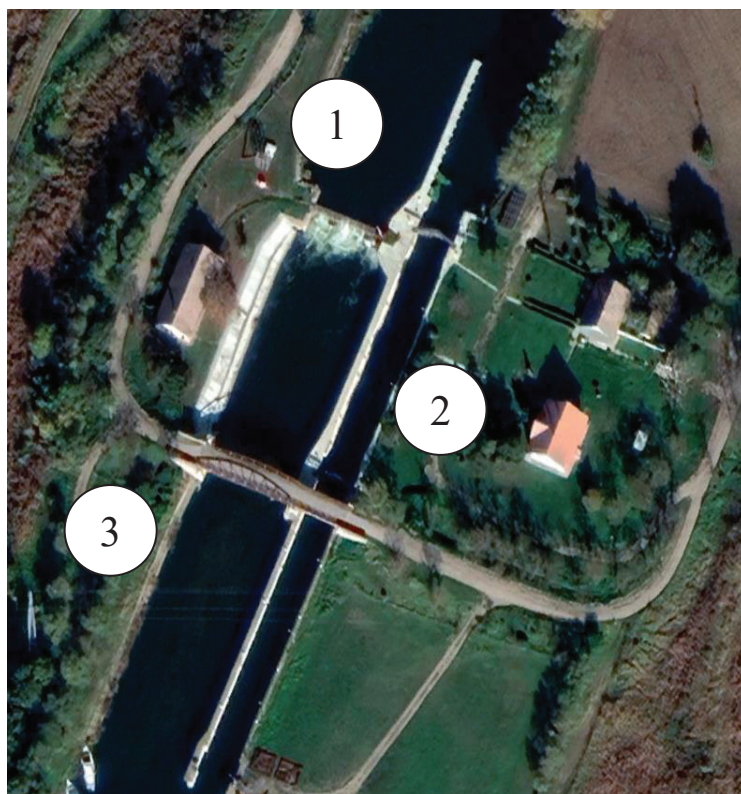
- **Објекте за регулацију нивоа и протицаја** који користе се за подизање нивоа воде или регулисање пада дна корита, како би се стабилизовао проток и стабилизовали ерозиони процеси. Ту спадају уставе, прагови и слично.
- **Објекти за спајање нивоа** омогућавају контролисано спуштање воде између различитих висина, користе се за контролу брзине, правца и обима протока воде, чиме се смањују ерозија, седиментација и опасности од поплава. У ову категорију спадају преливи, брзотоци, каскаде и слапишта.
- **Објекти за заштиту обала и регулацију водотока** користе се за спречавање ерозије обала, стабилизацију корита и усмеравање тока воде. У ову групу спадају обалутврде, напери, заштитне обложне конструкције, кејски зидови и слично.
- **Објекти за одбрану од поплава** служе за заштиту насеља, инфраструктуре и пољопривредног земљишта од изливања река и великих вода. Укључују насипе, заштитне зидове и друге баријере.
- **Објекти за акумулисање воде и успоравање тока** користе се за формирање акумулација које омогућавају складиштење воде за водоснабдевање, енергетику, наводњавање или заштиту од поплава. Главни објекти су бране.
- **Објекти за вођење, прикупљање и расподелу воде** користе се за транспорт воде између различитих тачака ради снабдевања, одводњавања или других потреба. Овде спадају цевоводи, канали, аквадукти, тунели и сифони.
- **Објекти за коришћење водних снага** служе за претварање потенцијалне и кинетичке енергије воде у електричну или механичку енергију. У ову групу спадају хидроелектране.
- **Црпне станице** користе се за подизање воде на више нивое или за уклањање вишка воде из угрожених подручја.
- **Резервоари** служе за привремено складиштење воде ради равномерне дистрибуције, обезбеђивања воде у сушним периодима или у време повећане потрошње воде.

- **Објекти за пловидбу** обезбеђују услове за транспорт робе и путника воденим путевима. У ову категорију спадају пловни канали, преводнице и пристаништа.
- **Објекти комуналне хидротехнике** служе за снабдевање становништва и индустрије водом, као и за прикупљање и третман отпадних вода. Ту спадају водоводне мреже, канализационе мреже, постројења за пречишћавање и објекти за кондиционирање воде.
- **Објекти за уређење подземних вода** користе се за регулацију нивоа и кретања подземних вода, обезбеђивање пијаће воде или спречавање негативног утицаја високих подземних вода. Ови објекти укључују дренажу, упојне и изливне бунаре, сабирне галерије, игло-бунаре и ињекционе завесе.

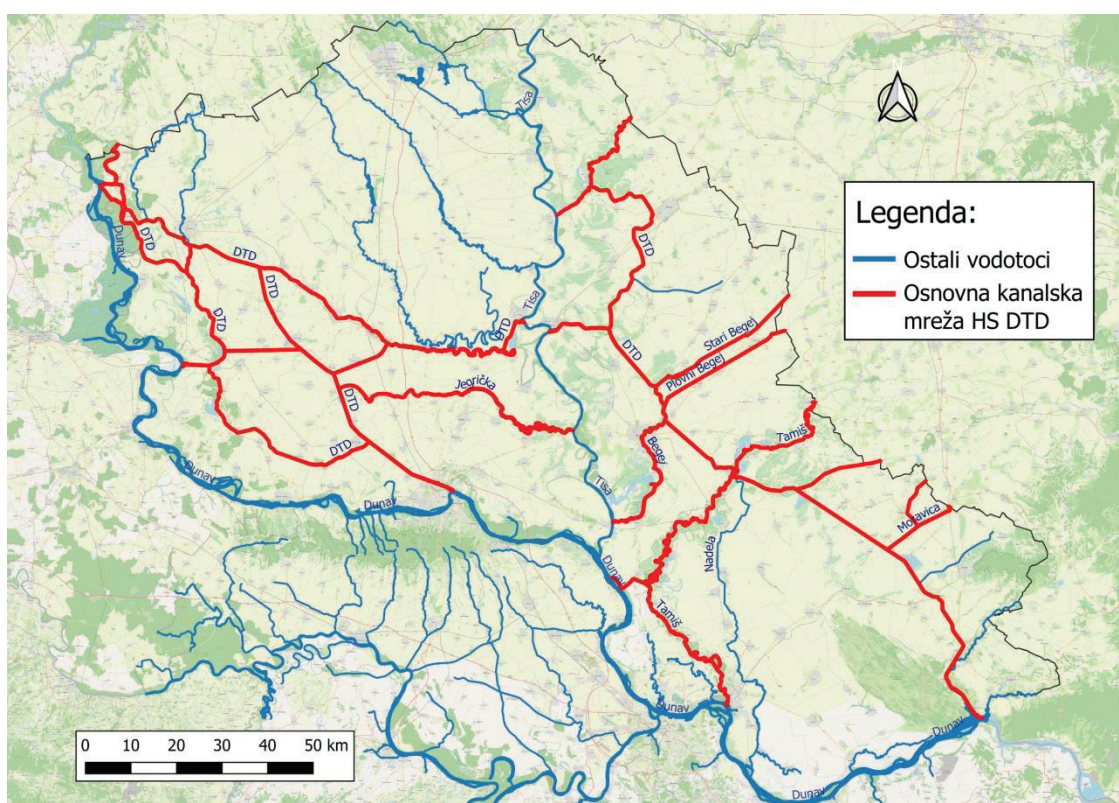
Треба истаћи да се водопривредни објекти често граде као група објеката на једном месту са различитим функцијама, који су међусобно повезани на различите начине. Овако груписани објекти чине хидрочвор и део су хидросистема.

Хидрочвор представља групу објеката повезаних заједничким радом и положајем. Један од примера хидрочвора налази се поред насеља Клек у општини Зрењанин, на реци Бегеј, где је на једном месту укључен низ инфраструктурних објеката намењених регулацији водотока и пловидби (Слика 1). Главни објекти овог хидрочвора су устава и преводница, чије су главне функције регулисање нивоа воде за пловидбу бродова капацитета до 650 тона, чак и при ниским и средњим протицајима. Ширина отвора уставе је 22,5 метара, а регулација нивоа воде врши се помоћу „Поире“ система са табластим затварачима. Овај хидрочвор је изграђен 1914. Године, са једном комором за пролаз бродова, као део ширег пројекта каналисања и омогућавања пловидбе Бегејом између Тисе и Темишвара током Аустроугарске монархије. Преводница Клек је током 1969. године реконструисана у двокоморну са три двокрилне капије, чиме је омогућено ефикасније функционисање. На локацији се налази и стари гвоздени мост из 1912. године, који додатно доприноси историјском значају објекта.

Хидросистем је сачињен од групе објеката које обједињује више хидрочворова и других објеката на систему у циљу испуњавања заједничких задатака водопривреде. Најпознатији хидросистем у Србији је Хидросистем Дунав-Тиса-Дунав представљен је на слици 2 (Хс ДТД) и он повезује токове река Дунав и Тиса кроз Војводину.



Слика 1. Хидрочвор Клек (1- устава, 2- преводница, 3- мост)



Слика 2. Хидросистем Дунав-Тиса-Дунав (Карта: Земунац, 2025)

Хс ДТД представља јединствени хидросистем, чије основне намене су: одводњавање, наводњавање, снабдевање водом, прихватање употребљених вода, пловидба, прихватање воде са територије суседних земаља, шумарство, риболов, туризам и рекреација. Преко Хс ДТД одводњава се укупно 1.060.000 ха земљишта. Овај хидросистем прихвата 326 м³/с воде и из њега је могуће је наводњавати 510.000 ха у Војводини. На каналима Хс ДТД има око 30 претоварних места – пристаништа, специјализованих пристаништа и пристаништа са депонијом. Могући годишњи промет на пловним каналима Хс ДТД је око 7.000.000 т. У протеклих неколико година промет износи око 1.000.000 т, а највећи остварени промет је био 1979. године и износио је 4.213.000 т.

2. ПОДЛОГЕ КОД ПРОЈЕКТОВАЊА ОБЈЕКТА

Приликом пројектовања објекта и пратећих радова неопходно је користити подлоге како би се обезбедило прецизно планирање и димензионисање у складу са условима који владају на терену и самим потребама пројекта. Подлоге које се најчешће користе могу бити:

Климатске и хидролошке подлоге – укључују информације о падавинама, температури, ветровима и испаравању, које су важне за димензионисање објекта. Ове подлоге су од суштинске важности за разумевање услова у којима ће објекат или систем функционисати:

- Климатске карактеристике
 - Подаци о падавинама - интензитет, трајање, учесталост,
 - Температуре - просечне, екстремне, сезонске варијације,
 - Евопотранспирација – утрошак воде испаравањем и транспирацијом биљака, просечне и екстремне вредности.
 - Отицај воде - количина воде која отиче са површине итд.
- Режим водотока
 - Поплавни таласи - временске и просторно динамике током поплава,
 - Нивограми и хидрограми - промена нивоа и протока током времена.
 - Учесталост и вероватноћа екстремних појава (поплаве, суше).
 - Коинциденција појава – истовремене или повезане појаве различитих хидролошких или метеоролошких догађаја који утичу на режим водотока (појављивање кише и топљења снега,

суперпонирање поплавних таласа, дуготрајне кише и већ засићено земљиште).

- Критична анализа повезаних појава (нпр. поплаве узроковане топљењем снега).
- Режим издани
 - Дубина и флукуације подземних вода.
 - Учесталост и вероватноћа екстремних појава.
 - Критична дубина.
 - Квалитет воде у издани (хемијски и физички параметри).

Топографске подлоге подлоге – Неопходне за просторну анализу и пројектовање инфраструктуре.

- Карте и планови
 - Географске и хидрографске карте за општи преглед терена (мањих размера 1:100.000 – 1:200.000).
 - Детаљни планови за техничке пројекте (већих размера 1:1.000 – 1:20.000).
- Посебна снимања
 - Карте у размерама 1:500 – 1:1.000 за тачну локацију и облик објеката.
 - Теренска мерења за прецизну висинску и просторну анализу.

Геолошке, хидрогеолошке и геоморфолошке подлоге обезбеђују информације о карактеристикама земљишта и подземних вода.

- Геолошке карактеристике
 - Положај и својства колектора (слабо или добро пропусни слојеви).
 - Подина (основни слојеви испод колектора и њихова стабилност).
- Хидрогеолошке карактеристике
 - Флукуације подземних вода и капацитет њиховог складиштења.
 - Утицај на доступност воде за водоснабдевање.
- Геоморфологија
 - Опис рељефа (планине, долине, алувијалне равни) који утиче на хидролошке процесе.

Геомеханичке подлоге су кључне за процену стабилности земљишта и пројектовање темеља:

- Особине материјала
 - Запреминска тежина (масивност материјала).
 - Гранулометријски састав (проценат песка, иловаче, глине).
 - Носивост и кохезија (сила која држи земљиште заједно).
 - Филтрациона својства (пропустљивост за воду).
 - Хемијски састав (могући утицаји на корозију или квалитет воде).
- Позјамишта

- Локације са којих се узимају материјали за насипе, бране или друге структуре.

Остале подлоге омогућавају шире сагледавање услова за извођење радова:

- Саобраћајни услови - доступност терена и транспорт материјала и опреме.
- Енергетска мрежа - приступ електричној енергији за радове и функционисање објеката.
- Коришћење земљишта - структура земљишта (пољопривредно, шумско, грађевинско).
- Имовински односи - власнички односи над земљиштем на којем ће се радови изводити, укључују и планове, законе и прописе који регулишу коришћење водних ресурса и изградњу водопривредних објеката.
- Економско-демографске карактеристике - информације о утицају пројекта на локалну заједницу, економској оправданости и потенцијалним корисницима водопривредног објекта.
- Сеизмологија - анализа ризика од земљотреса.
- Екологија - утицај на животну средину, биљни и животињски свет, као и мере заштите. Оне су важне за испуњавање регулаторних захтева и одрживост пројекта.

Коришћењем свих наведених подлога обезбеђује се интегрално планирање и пројектовање које узима у обзир све релевантне аспекте и ризике обезбеђујући техничку изводљивост, безбедност и минималан утицај на околину при пројектовању и реализацији водопривредних и мелиоративних радова.

3. АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ И ОПТЕРЕЋЕЊА ОБЈЕКТА

Код водопривредних објеката, анализе стабилности и оптерећења су кључне за обезбеђивање сигурности, функционалности и дуготрајности објекта. Ове анализе подразумевају спровођење статичких и хидрауличких прорачуна како би се обезбедило добијање стабилне конструкције која ће моћи безбедно да се експлоатише у пројектованом радном веку. У ту сврху приликом пројектовања је неопходно анализирати стабилност објекта **у целини**, као и стабилност **делова објекта**.

Анализе стабилности и оптерећења код водопривредних објеката обухватају следеће аспекте:

1. Стабилност објекта у целини

- **Статичка стабилност**

- Носивост земљишта односи се на процену да ли земљиште може да поднесе оптерећење објекта без прекомерног (апсолутна величина слегања) или неравномерног слегања.
- Клизање подразумева анализу могућности померања објекта услед несиметричног деловања активних сила и отпора трења.
- Потисак укључује испитивање хоризонталног притиска воде (хидростатичког) или земљишта који може довести до померања или дестабилизације.
- Стабилност косина се односи на процену отпорности нагиба терена на урушавање (кључује прорачун критичних услова под којима косина остаје стабилна, као и идентификацију могућности клизања или одрона).
- **Хидрауличка стабилност**
 - Филтрациона стабилност представља испитивање отпорности на испирање честица земљишта услед протока воде кроз подлогу или конструкцију.
 - Ерозивна стабилност подразумева анализу могућности оштећења објекта услед енергије воде, као што је хидраулички скок и последица стварање ерозионог левка или спирање воде на површини чиме се мењају услови стабилности.

2. Стабилност појединачних делова објекта

- Анализа напрезања подразумева испитивање момената, нормалних и трансверзалних сила, као и косих главних напона који делују на поједине делове објекта (напрезања на притисак, затезање, смицање и торзију).
- Провера дозвољених напрезања представља утврђивање да ли напрезања остају унутар граница које материјал може да поднесе.

3. Анализа оптерећења се спроводи за све могуће случајеве који могу да се јаве и демонстрирају неповољна стања, а то су:

- **Током изградње објекта**
 - Утицај изграђених и неизграђених делова.
 - Услови и начини затрпавања објекта и постављања опреме.
 - Максимално дозвољено слегање током изградње.
 - Утицај воде која делује на објекат.
- **Током експлоатације објекта**
 - Деловање воде при максималним протицајима.
 - Утицај екстремних денивелација водостаја.
 - Утицај обрнутих денивелација водостаја.
 - Анализа неповољних коинциденција, као што су истовремене падавине и топљење снега, суперпонирање поплавних таласа, дуготрајне кише и већ засићено земљиште у сливу.
- **Током ремонта објекта**
 - Избор времена ремонта (Избегавање ремонта у периодима највећих хидрауличких и механичких напрезања).

- Анализа асиметричних оптерећења која се јављају током радова.
- **У ванредним условима**
 - Хаваријска оптерећења у систему или на појединим деловима објекта.
 - Деловања у случају ванредних ситуација попут земљотреса, поплава или ратних услова.

4. Типови оптерећења су од кључног значаја код водопривредних објеката, јер обезбеђује њихову безбедност, функционалност и дуговечност. Према начину понашања конструкције односно објекта, оптерећења могу бити статичка и динамичка и то:

- **Стална оптерећења**
 - Сопствена тежина конструкције,
 - Тежина неносивих елемената објекта,
 - Притисак воде (хидростатички притисак), земљишта и нанесеног материјала (сувог или важног стања),
 - Потисак,
 - Хидродинамички притисак,
 - Атмосферски притисак или вакуум који може да се ствара уз објекат,
 - Деформације услед скупљања материјала или слегања подлоге.
- **Променљива оптерећења**
 - Деловање таласа, ветра, снега и леда (удар, преливање и сл.),
 - Температурне промене и скупљање материјала,
 - Деформације подлоге (слегање, бубрење, мраз),
 - Корисна оптерећења као што су саобраћај или транспорт робе.
- **Удесна оптерећења**
 - Утицаји услед тренутних догађаја као што су земљотреси, пасиван земљани притисак или силе трења опреме.

Свеобухватна и прецизна анализа стабилности и оптерећења водопривредних објеката је сложен процес који захтева мултидисциплинарни приступ и уз коришћење статичких и хидрауличких прорачуна и коришћење инжењерских метода и савремених алата, омогућава пројектовање безбедног, функционалног и економичног објекта који може издржати све предвиђене услове током радног века.

ОБЈЕКТИ ЗА УРЕЂЕЊЕ БУЈИЧНИХ ТОКОВА

1. ЕРОЗИЈА – ПОЈАМ И ИСТОРИЈАТ

Под појмом ерозија подразумева се процес откидања, одношења, транспорта и таложења површинског слоја земљине коре под утицајем природних и антропогених агенаса.

Током историје, дефинисање и проучавање ерозије су се развијали, што је омогућило боље разумевање утицаја овог процеса на природно окружење, пољопривреду и људске заједнице.

У античким цивилизацијама, појам ерозије није био познат под тим именом, али су људи примећивали њене ефекте. Стари Египћани, Месопотамци и Кинези су били свесни да киша и реке могу обликовати земљиште и еродирати обале. На пример, годишње поплаве Нила су доносиле плодну алувијалну земљу, али су такође могле еродирати пољопривредна подручја.

Грчки филозофи попут Аристотела и Херодота размишљали су о променама у пејзажима и како воде утичу на земљиште. Аристотелов допринос овој области је концепт да реке и кише временом обликују земљу тако што односе честице земљишта и таложе их на другим местима. Он је приметио да воде које теку низ падине носе материјал који се касније таложи у низијама или у рекама, што је врло блиско модерном схватању ерозије и седиментације. Херодот бележи да се делта Нила шири и мења облик захваљујући таложењу муља који се доноси током поплава и да је резултат седиментације заправо плодна земља која остаје.

У старом Риму у Плутарховим записима стоји да је после крчења вегетације земља на Сицилији била захваћена ерозијом, а сеоско становништво је изгубило „корен на рудној груди“ и бежало у градове. Именицом „еросион“ и глаголом „еродере“ Римљани су означавали процесе везане за распадање, откидање и осиромашивање површинског слоја земљишта.

За време средњег века, ерозија није била предмет систематског проучавања, али су њени ефекти били јасно видљиви, нарочито у пољопривреди. Људи су уочавали да неправилно обрађивање земље може довести до губитка плодног слоја тла под утицајем киша и ветрова. У Европи је интензивна сеча шума, повезана са ширењем

пољопривредних површина и градњом, додатно убрзавала процесе ерозије, што је често резултирало замуљивањем река и смањењем приноса усева.

Развој науке у доба ренесансе донео је боље разумевање природних процеса, укључујући ерозију. Научници попут Леонарда да Винчија примећивали су како вода и ветар могу да обликују пејзаж, чак и шире регије. У 17. и 18. веку, научници су почели да повезују ерозију с променама у геолошким формацијама, што је поставило темеље за модерну геологију.

Индустријализација и ширење пољопривреде у 19. и 20. веку показали су колико људске активности могу убрзати ерозију. Током Dust Bowl-а (Сушна катастрофа у САД-у 1930-их), јасно је уочена повезаност између лошег управљања земљом и масовне ерозије. Ово је довело до развоја пракси за очување земљишта и примене биотехничких мера, попут садње заштитних појасева дрвећа, формирања упојних ровова, терасирања косина и многих других мера, како у самим сливовима, тако у водотоковима.

Данас је ерозија детаљно проучавана у контексту климатских промена и одрживог развоја. Разумевање овог процеса кључно је за заштиту земљишта, спречавање поплава и очување природних ресурса. Појавиле су се и нове технологије, попут сателитског праћења и моделирања, које омогућавају прецизније мерење ерозије и њених ефеката.

Ерозија је кроз историју еволуирала од схватања као искључиво природног процеса до свеобухватног концепта који укључује и значајан људски утицај. Овај феномен је данас део бројних интердисциплинарних истраживања и стратегија заштите природе. Све већа потреба за храном и деградација земљишта налажу хитно спровођење сложених мера за очување сваког угроженог хектара. Подаци показују да је чак 92% пољопривредног земљишта подложно ерозионим процесима.

У борби против ерозије, неопходно је размотрити различите интересе и активности корисника одређених подручја. На пример, мере као што су пошумљавање, изградња контурних ровова и тераса могу допринети очувању земљишта, али могу имати негативан утицај на доступност воде за енергетику и наводњавање. Стручњаци често занемарују шире последице својих активности, попут промена у водном режиму које могу убрзати ерозију низводно или узводно од акумулација.

Иако ерозија може имати и позитивне ефекте, као што су депоновање плодног лесног материјала или формирање новог земљишта кроз абразију стена, штете које изазива далеко надмашују ове користи. Ерозија се стога углавном посматра као негативан процес, чије је управљање кључно за одрживи развој.

Дефиниција ерозије, како је разрађивана кроз историју, одражава напредак у разумевању тог процеса, који је од кључне важности за очување земљишта, пољопривреду и животну средину. Ево како се развијала дефиниција ерозије, почевши од 1932. године:

- Малетић, 1932: Свака текућа вода има особину да односи распаднут материјал што значи да копа и дуби своје корито. Та снага удубљивања и копања дна назива се ерозија.

- Марјанов, 1964: Одношење земљишта под утицајем деструктивних сила воде и атмосфере назива се ерозија земљишта.
- Биолчев, 1966: Ерозија представља рушење и одношење земљишта и подкопавање матичне подлоге од нерегулисаног површинског отицања воде.
- Гавриловић, 1972: Под појмом ерозије у елементарном смислу треба подразумевати промене на површинском слоју земљишног рељефа, које настају као последица деловања кише, снега, мраза, температурних разлика, ветра и текућих вода или услед антропогеног фактора.
- Лујић, 1973: Ерозија је широко распрострањена појава просецања земљишта и одношење његових растреситих састојака струјама воде и ветра.
- Лазаревић, 1975: По ерозијом, у ширем смислу, подразумева се укупан процес разарање површинског хоризонта Земљине коре, покретање (спирање), одношење и таложење тих продуката основних стена и земљишта - радом различитих ерозионих агенаса: воде свих агрегатних стања, ветра и температурних промена. У ужем смислу, ерозија је разарање, одношење и таложење стена и земљишта као резултат дисперзивне акције кишних капи на земљиште и ерозивно-транспортне снаге текуће воде.
- Киркбу и Морган, 1980: Ерозија представља разарање површинског слоја земљишта под дејством ветра и воде.
- Захар, 1982: Ерозија је разарање педосфере или литосфере деловањем спољних геоморфолошких фактора.
- Заславскиј, 1983: Под појмом ерозија подразумева се спирање и подривање земљишта а понекад и матичне стене под утицајем површинског отицања воде. Као резултат деловања ерозије модификује се првобитни земљишни рељеф.
- Ћирић, 1986: Ерозија земљишта подразумева процес одвајања земљишног материјала од масе целокупног земљишта и транспорт тог материјала ерозивним агенсима - водом и ветром.
- Ђоровић, 2005: Ерозија земљишта је процес откидања, транспорта и таложења честица земљишта и геолошке подлоге деловањем ерозивних сила воде и ветра.
- Миљковић 2005: У свим облицима ерозије углавном се јављају три феномена: Разарање са почетним кретањем материјала, одношење - транспорт и депоновање.

Из свих наведених дефиниција закључује се да је суштина код свих дефиниција ерозије заправо процес откидања, одношења, транспорта и таложења површинског слоја земљине коре под утицајем природних и антропогених агенаса.

2. КЛАСИФИКАЦИЈА ЕРОЗИОНИХ ПРОЦЕСА

За успешну борбу против ерозионих процеса, кључно је познавати и разумети њихове узроке и начине настанка, као њихову генезу. Као што је већ наведено, ерозија представља процес који настаје под утицајем унутрашњих и спољашњих сила.

Класификација ерозије земљишта може бити вршена на много начина, али све оне имају за циљ препознавање основног ерозионог агенса, дефинисање јачине његовог деловања и величине материјалне штете коју проузрокују на земљишту у одређеним физичко географским уловима. Такође, класификације омогућавају и избор најефикаснијих и најекономичнијих мера заштите земљишта од ерозије у датим условима.

Постоје бројне класификације ерозије земљишта и то на бази ерозионог агенса, према ерозионом облику, према брзини и јачини развоја ерозионих процеса, према ерозионим факторима, врсти и крупноћи земљишних агрегата, према производним могућностима и др.

У зависности од главног изазивача ерозионих процеса – агенса и распрострањености појаве, ерозија се може класификовати на следећи начин:

1. Ерозија водом или водна ерозија која се дели у подгрупе
 - Регионална или плувијална ерозија (ерозија кишом),
 - Флувијална ерозија (ерозија текућом водом),
 - Глечерска или глацијална (ерозија ледом и снежним лавинама),
2. Ерозија ветром или еолска ерозија и
3. Абразиона ерозија (комбинована ерозија изазвана радом ветра и воде – ерозија настала услед морских, језерских или речних таласа).
4. Биотичка ерозија
 - Антропогена ерозија (коју изазивају дефорестација, интензивна пољопривреда, изградња и урбанизација),
 - Зоогена ерозија (изазвана је копањем различитих врста животиња, ходањем стоке или друге активности које утичу на структуру земљишта које су последица животињских активности на неком подручју),
 - Фитогена ерозија (корење биљака може директно утицати на стабилност земљишта, како кроз стабилизацију, тако и у неким случајевима кроз деградацију земљишта; такође неравномерно уклањање биљне масе може имати значајан утицај на појаву ерозије)
 - Микробиогена (улога микроорганизама - бактерија, гљива и алги може бити значајна у процесима који доводе до разградње или промене

структуре земљишта и стена, последично и до појаве ерозионих процеса).

Поред појма ерозије постоје и појмови као што су:

Денудација (оголивање) која подразумева распадање стена и земљишних агрегата после уклањања вегетационог покривача, а под деловањем атмосферских сила.

Аблација (уклањање, скидање) која означава одношење земљишних честица у ниже делове рељефа услед различитих сила ерозије.

Акумулација (нагомилавање, таложење) представља затрпавање нижих делова падина, равница и долина са ерозионим наносом.

Корозија (бочно разједање, нагризање) указује на бочно разарање обала јаруга, потока, речица и великих река услед ерозије водом.

Суфозија и микросуфозија (пропадање, спуштање) најчешће називане унутрашњом ерозијом, представљају процес постепеног слагања земљишта услед деловања подземних вода.

Како би практична изучавања процеса ерозије била једноставнија и једнообразна, уведен је појам **средњи годишњи интензитет ерозије**. Под овим појмом се подразумева просечна годишња количина земљишта које је откинуто, спрано и наталожено по јединици површине. Овај показатељ интензитета ерозионих процеса се изражава у мм спраног или наталоженог земљишта тј. у $\text{м}^2/\text{км}^2$ год., $\text{м}^3/\text{ха}$ год., $\text{т}/\text{км}^2$ год. или $\text{т}/\text{ха}$ годишње.

Код природних сливова средњи годишњи интензитет ерозије водом увек је представљен просечним губитком површинских слојева земљишта. Разлог за то је што природни сливови и ерозивна подручја увек морају имати одређени нагиб, јер без нагиба не би било отицања воде, а самим тим ни губитка земљишта услед ерозије. Губитак земљишта услед ерозионих процеса од 1 мм дебљине површинског слоја годишње одговара интензитет ерозије од $10 \text{ м}^3/\text{ха}$ годишње или $1.000 \text{ м}^3/\text{км}^2$ годишње.

Средњи годишњи интензитет еолске ерозије, без обзира на услове који владају у сливном подручју, може да буде изражен не само одношењем већ и засипањем подручја са земљишним честицама ношених ветровима из веома удаљених области. Најчешћи пример еолске ерозије је и појава значајних количина најфинијих честица које долазе из Сахарског подручја које се зове жута киша.

Мерењима је утврђено да је процес одношења површинског слоја земљишта константно присутан и да постоји у свим деловима копна, изузев ако је копно под сталним леденим покривачем или је на дну мора и океана.

2.1. Класификација ерозије земљишта на бази ерозионих агенаса

Класификација ерозије на бази ерозионих **агенаса** има свега неколико представника. Сматра се да суштину најбоље осликава класификација коју је предложио проф. Гавриловић 1972. године. Према овој класификацији, ерозија је подељена на:

- Водну ерозију коју чине плувијална, флувијална и глацијална ерозија,
- Еолску ерозију и
- Абразиону ерозију која настаје услед комбинованог деловања ветра и воде, односно таласа.

2.2. Класификација ерозије земљишта на бази ерозионих облика

На бази ерозионих **облика** су дате бројне класификације ерозије. Аутори тих класификација углавном су делили ерозију на три основна облика:

- Површинска ерозија или спирање,
- Јаружаста ерозија и
- Речна ерозија.

Врло ретко, класификације обухватају појаве као што су кретање земљишних маса (клизишта), распадање стена и подземну ерозију.

2.3. Класификација ерозије земљишта на бази ерозионих агенаса и ерозионих облика

Бројне класификације које су формиране на бази ерозионих **агенаса и ерозионих облика** су последица још увек недовољно раздвојених појмова ерозије земљишта и деунудације, односно интерпретације ових термина од стране ерозиониста (пољопривредних и шумарских стручњака) и геоморфолога. Постојање овако великог броја класификација је само доказ да постоје значајна преплитања ерозионистичких и геоморфолошких схватања узрока и генезе ерозионих процеса. Једна од најчешће коришћених класификација, заснована на ерозионим агенсима и облицима ерозије, јесте класификација коју је предложио проф. Гавриловић. Она подразумева поделу ерозије на:

1. Водна ерозија (ерозија водом) која се дели у подгрупе

1.1. Регионална (плувијална) ерозија,

- Површинска ерозија која се дели даље у подгрупе
 - Обична површинска ерозија - ерозија кишним капима,

- Ламинарна или слојевита ерозија,
 - Осулинска или распадинска ерозија,
 - Мешовита ерозија која се дели даље у подгрупе
 - Површинска ерозија са местимичном појавом мањих бразди и јаружица,
 - Површинска са местимичном појавама мањих површинских клижења земљишта, солифлукција и лаких клижења,
 - Карстна ерозија у почетном и средњем стадијуму,
 - Површинска ерозија комбинована „везовима“ и малим пирамидалним облицима насталим од „бомбардовања“ земљишта кишним капима уколико су такви облици у почетном стадијуму,
 - Дубинска или линеарна ерозија која се дели даље у подгрупе
 - Браздаста ерозија,
 - Јаружаста ерозија,
 - Јаружасто-пирамидална ерозија,
 - Урвинска ерозија,
 - Јака крашка ерозија.
- 1.2. Флувијална ерозија (ерозија текућом водом) која се дели у две подгрупе
- Бујична ерозија
 - Бујична ерозија спирњачког типа где су доминантни процеси регионалне ерозије,
 - Бујична ерозија подривачког типа где су доминантни процеси дубинске ерозије,
 - Бујична ерозија мешовитог типа где су распрострањени облици површинске и дубинске ерозије,
 - Бујична ерозија карстног типа где су доминантни облици карстне ерозије.
 - Речна ерозија
- 1.3. Глацијална ерозија (ерозија ледом и снежним лавинама)
2. Еолска ерозија (ерозија ветром)
3. Абразиона ерозија (ерозија ветром и водом - ерозија таласима).

2.4. Класификација ерозије земљишта према јачини ерозионих процеса

Према јачини ерозионих процеса ерозија може бити:

- Нормална (геолошка, геоморфолошка, физиогена, толерантна, дозвољена) и

- Убрзана.

Нормална или толерантна ерозија представља губитак земљишта који се може надокнадити природним педогенетским процесима или путем људских интервенција, чиме се одржава постојећа дубина и плодност земљишта. Према неким ауторима, ова вредност износи око 1 цм земљишта за 100 година, али се граница може разликовати у зависности од дубине земљишта и услова који утичу на његово формирање. Толерантна ерозија се користи као референтна тачка у планирању и примени мера заштите земљишта. Циљ је одржати ерозију на нивоу који омогућава дугорочну продуктивност земљишта. Када губитак земљишта пређе толерантни ниво, долази до смањења плодности земљишта, деградације екосистема, смањења приноса у пољопривреди и појачаних ерозионих процеса, укључујући јаружасту и дубоку ерозију. За Централну Србију, на бази вишегодишњих истраживања која су спровођена на ерозионим парцелама, дефинисано је да је толерантна ерозија за водну ерозију износи 2 т/ха годишње.

Класификација ерозије земљишта на основу интензитета ерозионих процеса може се извршити на различите начине, али се најчешће дели на:

- квантитативне,
- квалитативне и
- синтетичке.

При том, квантитативне чине класификације које обухватају димензионе податке. Када се ерозиони губитак изражава кроз губитак појединих хоризоната или хранљивих материја онда је квалитативна, а синтетичка је заснована на бази више ерозионих и геоморфолошких параметара формирајући општу ерозиону слику. Важно је нагласити да ове класификације важе само за процес убрзане ерозије.

Квантитативне класификације интензитета ерозије земљишта изражавају губитак земљишта у одговарајућим јединицама мере, по јединици површине и временској јединици. Најчешће коришћене мере су: $\text{м}^3 \text{ ха}^{-1} \text{ год}^{-1}$ или $\text{т ха}^{-1} \text{ год}^{-1}$. Интензитет ерозије се може одредити и на основу укупне дужине јаруга по јединици површине. Један од основних примера ових класификација је класификација коју је предложила ФАО (Табела 1) и проф. Ђоровић за Србију (Табела 2).

Табела 1. Квантитативна класификација ерозије земљишта према ФАО

Угроженост земљишта	Интензитет ерозије ($\text{т ха}^{-1} \text{ год}^{-1}$)
Није угрожено	0
Слабо угрожено	0 - 5
Умерено угрожено	5 - 15
Јако угрожено	15 - 50
Веома јако угрожено	> 50

Табела 2. Квантитативна класификација водне ерозије према проф. Ђоровићу

Категоризација ерозије	Квантитативни износ ($t\ ha^{-1}\ год^{-1}$)
Граница толерантне ерозије	2
Слаба	2 - 10
Средња	10 - 20
Јака	20 - 50
Експесивна	> 50

Квалитативне класификације интензитета ерозије земљишта изражавају губитак појединих генетских хоризоната, као и губитак хранљивих материја. ФАО класификација може се сматрати типичним примером ове врсте класификације (Табела 3), међутим често се примењује и класификација према Бенету (Табела 4).

Табела 3. Ерозионе класе на бази процене угрожености земљишта према ФАО

Ерозионе класе	Угроженост земљишта
I	Није угрожено
II	Слабо угрожено
III	Умерено угрожено
IV	Јако угрожено
V	Веома јако угрожено

Табела 4. Ерозионе класе на бази процене угрожености земљишта према Бенету

Ерозиони степен	Опис јачине ерозије	Удео однетог земљишта
0	Базична ерозија	0%
1	Слаба ерозија	0-25% „А“ хоризонта
2	Умерена ерозија	25-75% „А“ хоризонта
3	Јака ерозија	75-100% „А“ хоризонта
4	Врло јака ерозија	Однет укупан „А“ хоризонт
5	Изузетно јака ерозија	>75% „Б“ хоризонта
6	Друге ерозионе појаве	Клизишта, солифлукције и др.

Синтетичке класификације настале су на бази више ерозионих параметара у функцији геоморфолошких параметара која треба да формира општу слику могућности коришћења земљишта за обраду, затрављивање и пошумљавање. Карактеристични представник ових класификација које се користе у свету је класификација земљишта према производној могућности (Land Capability Class System, LCCS) (Табела 5) и коју је предложио проф. Ђоровић (Табела 6).

Табела 5. Синтетичка класификација еродираниог земљишта према „LCCS“

Ерозиони степен	Опште ерозионо стање земљишта
1	Слабо спирање, терен приближно раван, ерозија слабо изражена, смо 10% обрадиве површине захтева интервенције
2	Умерено одношење земљишта, локалног карактера, потребна антиерозиона заштит на 10-25% површине
3	Умерена ерозија, 25-40% површине је неопходно заштитити
4	Веома јака ерозија, 75% обрађиваног земљишта је под интензивном ерозијом

Табела 6. Синтетичка класификација еродираниог земљишта према Ђоровићу

Јачина ерозионог оштећења	Дефиниција
1. Лака деградација	Шумска простирка је већим делом однета, присутна је на 10-30% површине, присутне су појаве површинске ерозије, спирања и местимична појава плићких бразди (<15cm). Дубина производних хоризоната смањена за највише 30%, док су основне биотичке функције углавном присутне. Овај степен деградације најчешће изазивају деградациони облици W_T . Интервенције у циљу промена у систему газдовања су довољне да спрече даљу деградацију и воде ка природној обнови пуне производне способности земљишта.
2. Умерена деградација	Шумска простирка је присутна на мање од 10% површине. Производни хоризонти земљишта изгубили од 30-50% своје моћности али су задржане основне биотичке функције. Овај деградациони степен је, најчешће, последица деловања површинске водне ерозије спирањем и браздастом ерозијом дубине до 25 cm (W_T , W_p) који доводе и до местимичног огољавања кореновог система.
3. Јака деградација	Шумске простирке нема. Матични супстрат је често на површини због губитка највећег дела земљишта (80%). Основне биотичке функције земљишта су у великој мери уништене. До овог степена деградације, најчешће, доводе дубински процеси водне ерозије у виду јаруга које могу бити и више метара дубине (W_d), као и појава клизишта лакших облика (W_n). Код овог деградационог степена, неопходни су обимни биолошко-технички радови за заустављање даљих деградационих процеса, обнова вегетације и основних производних функција земљишта.
4. Екстремна деградација	Земљишта нема или се јавља само у траговима и основне биотичке функције су потпуно уништене. Најчешће су присутне више метара дубоке и бројне јаруге, осулине (сипари), бујичне плавине и клизишта (W_d , W_n). Обнова оваквих површина, практично је немогућа јер је веома скупа и спора и најчешће је изван могућности материјалних улагања чак и најбогатијих друштава. Овакве површине се, по правилу, искључују из било какве планске производње.

3. ЕРОЗИЈА ВЕТРОМ

Ерозија ветром или еолска ерозија је процес преноса растреситог површинског материјала, током којег честице подлежу абразивном дејству ветра. Распоређивање, премештање и сортирање честица у овом процесу може значајно утицати на земљиште, микрорељеф и пољопривредне активности. Еолска ерозија настаје у различитим условима животне средине, посебно када недостаје адекватна заштита земљишта или вегетациони покривач. Највећи утицај има у пустињама, тундрама, приобалним подручјима и планинским рејонима.

Најозбиљније последице еолске ерозије уочавају се у пределима са ниским, нестабилним и неравномерним падавинама, високим температурама, великим испаравањем и јаким ветровима. Природни процес еолске ерозије може бити знатно убрзан неправилним начином пољопривредне обраде, што доводи до деградације земљишта и оштећења биљака.

Еолска ерозија подразумева откидање, интензивно премештање и таложење честица земљишта. Она представља физички процес изазван дејством ваздушних струја на површину земљишта. Да би се разумела, важно је познавати механизам откидања, подизања и транспорта земљишних честица ветром који се састоји из неколико фаза.

Фазе еолске ерозије су:

1. **Откидање честица и огољавање површине:** Наступа услед дејства мраза, смењивања влажења и сушења, удара кишних капи и обраде земљишта.
2. **Почетак кретања:** Јавља се на најподложнијим деловима земљишта, углавном на честицама пречника између 0,1 и 0,5 мм.
3. **Транспорт земљишних честица ветром:** Одвија се у три облика:
 - **Површинско пузање:** Кретање већих честица које се котрљају по земљишту.
 - **Салтација (поскакивање):** Поскакивање средње великих честица дуж површине.
 - **Суспензија:** Најситније честице остају у ваздуху и могу бити пренесене на велике удаљености.
4. **Разврставање честица (елутријација):** Честице се током кретања сортирају према својој величини, густини и облику.

Еолска ерозија значајно обликује пределе, али може изазвати и озбиљну деградацију земљишта, што захтева примену мера заштите како би се сачували природни и економски ресурси.

Да би се разумели кључни процеси у природи који су у вези са ерозионим процесима неопходно је разјаснити још неке појмове који су важни, јер обликују земљиште и утичу на екосистеме. Њихово разумевање је кључно за пољопривреду,

заштиту земљишта, управљање природним ресурсима и спречавање негативних последица ерозије.

Абразија – То је процес у којем ситне честице земљишта, које носи ветар, ударају у стене и грумење, разбијајући их на мање делове. Ове честице постају довољно мале да их ветар може даље преносити.

Усов – Када честице земљишта падају на површину и при томе покрећу друге честице, настаје ефекат ланчане реакције у којој ветар односи све већу количину земљишта. Овај интензиван облик ерозије назива се усов.

Депонованье – Слично процесу седиментације код водне ерозије, депонованье означава таложење честица земљишта које ветар однесе.

Најмање и најлакше честице прашине се односе најдаље, често далеко изван подручја одакле су биле узете. Оне падну (депонују се) тек када се брзина ветра смањи или када падне киша.

Веће честице које су однешене у суспензији (0,01-0,1 мм) најчешће се депонују на даљини од неколико километара од места порекла. Под природним околностима, ове су честице створиле главне депозите леса. Оне нису прикладне да буду поново одуване јер садрже само мали део честица такве величине које могу поскакивати.

Честице пречника 0,1-0,5 мм које се крећу салтацијом депонују се где год локални услови смањују интензитет ветра. Ово може бити због вегетације или лаганих неравнина површине земљишта. Акумулација ових честица узрокује формирање хумки или дина. Честице земљишта које се крећу пужући по површини не одлазе далеко и углавном остају на подручју са кога потичу.

Консолидација и стабилизација земљишта – Након што ветар депонује честице, природни процеси преузимају улогу стабилизације тог земљишта. Тежина таложеног материјала, киша, скупљање при сушењу, као и деловање вегетације, микроорганизама и ситних животиња, доприносе учвршћивању и стабилизацији новонасталих наслага.

Наведени појмови представљају процесе који помажу у схватању како ветар утиче на земљиште, чиме се доприноси очувању природног баланса и борби против деградације земљишта, што има директан утицај на пољопривреду, биодиверзитет и климатске промене.

3.1. Облици кретања земљишних честица узрокованог ветром

Еолска ерозија се одвија у три основне фазе које подразумевају:

Откидање честица земљишта - У овој фази честице земљишта се одвајају од површинског слоја услед дејства ветра. Ветар својом кинетичком енергијом савладава везе између честица и изазива њихово подизање. Откидање је најизраженије код лакших

и мањих честица, а може бити олакшано процесима попут сушења, влажења, мрза и механичке обраде земљишта.

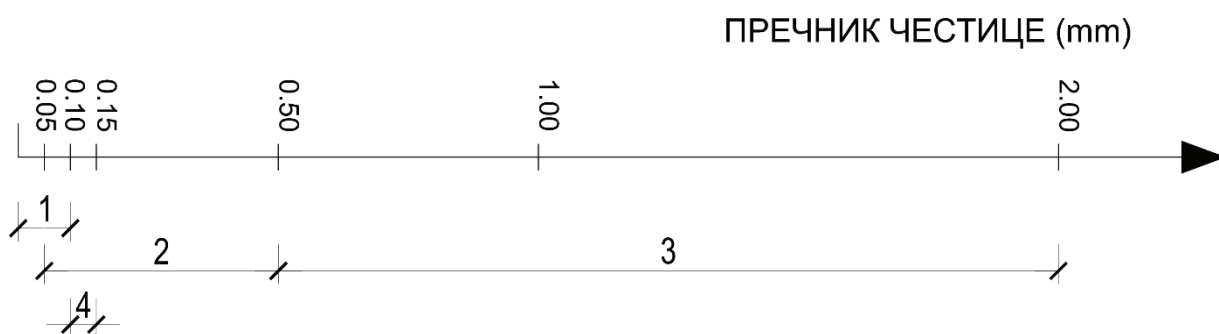
Транспорт честица - Након што ветар подигне честице, оне се транспортују у зависности од своје величине, тежине и снаге ветра. Овај транспорт може бити:

- **Површинско пузање (котрљање):** веће и теже честице се котрљају или клизе по површини.
- **Салтација (поскакивање):** честице средње величине се крећу кратким скоковима.
- **Суспензија:** најситније честице остају у ваздуху и могу се преносити на велике удаљености.

Таложење честица (депоновање) - Када ветар изгуби довољно снаге или наиђе на препреку, честице се таложе. Величина честица одређује где ће се таложити: веће честице остају ближе извору, док ситније могу формирати депозите на великим удаљеностима, попут леса или пешчаних дина.

Еолска ерозија настаје услед кретања ваздуха, који својом снагом преноси честице земљишта. Пошто је ваздух знатно мање густ од воде, његова преносна моћ је знатно слабија у поређењу са водном ерозијом. Чак и најслабији ветрови могу подићи у ваздух и пренети на велике удаљености најситније честице земљишта, док јачи ветрови могу покренути и веће честице које се котрљају по површини.

У лабораторијским условима, помоћу уређаја за симулирање ветра на непоремећеним узорцима земљишта, идентификовани су различити облици кретања честица земљишта под утицајем ветра (Слика 3).



Слика 3. Врсте кретања честица земљишта под утицајем ветра у функцији од њихове величине: 1- Кретање у суспензији, 2 – Салтација, 3 – Котрљање, 4 – Честице које су најлакше и најподложније ерозији

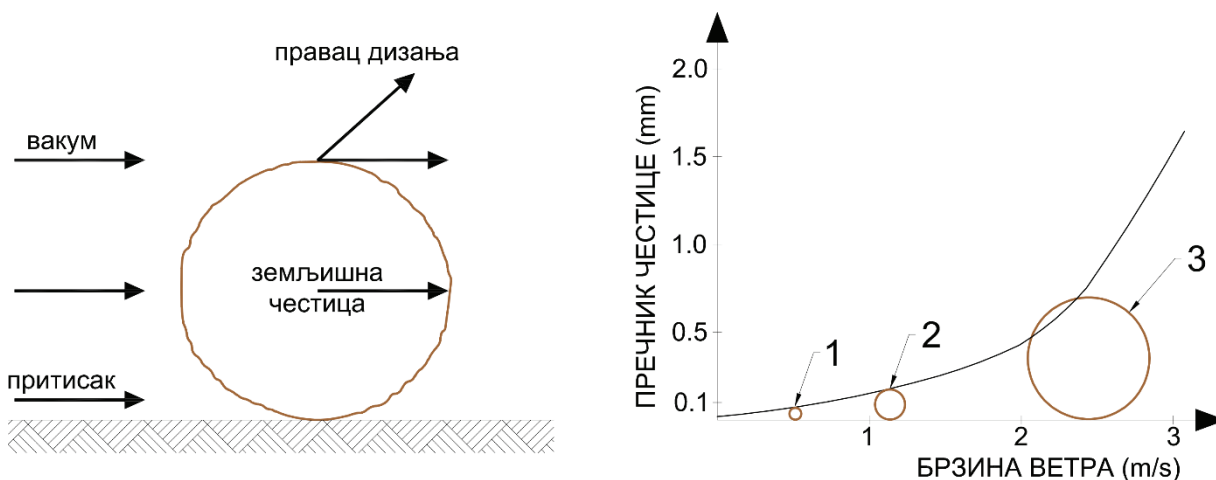
Облици кретања земљишних честица узрокованог ветром представљају различите начине на које се честице земљишта покрећу и преносе под утицајем ваздушних струја. У процесу еолске ерозије разликују се три основна облика кретања честица:

1. Површинско пузање (Котрљање)

Овај облик кретања се односи на котрљање или лагано померање већих и тежих честица по површини земљишта. Честице се померају услед директног удара ветра или због судара са другим честицама које се крећу салтацијом (поскакивањем). Оне бивају гуране по површини и котрљају се, али не поскакују и не лете. Кинетичка енергија јаких ветрова је довољна да узрокује ово кретање. Када је ветар мање брзине, површинско пузање почиње салтацијом. Падајуће честице земљишта ударају већа зрна и предају своју енергију њима, слично као што билијарске кугле преносе енергију при удару. Површинско пузање обично укључује честице пречника већег од 0,5 mm. Оне су превише тешке да би се подигле у ваздух, али их ветар ипак може преместити на краће удаљености.

2. Салтација (Поскакивање)

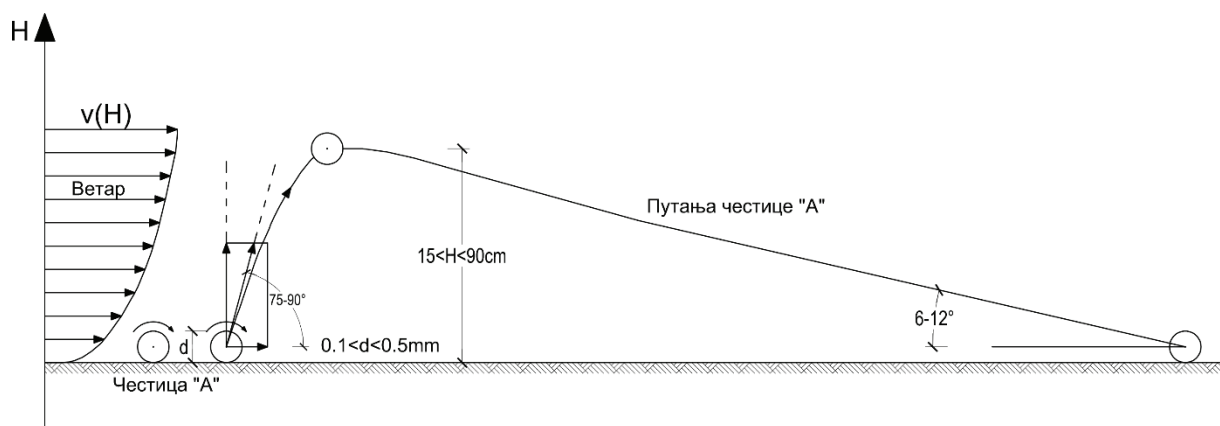
Салтација је најзначајнији облик кретања честица током еолске ерозије, јер захвата честице средње величине, пречника између 0,1 и 0,5 mm, што их сврстава у ситан песак. Овај динамичан процес почиње када снажни ветрови дувају преко незаштићеног земљишта, подижући и односећи честице са његове површине.



Слика 4. Шема покретања различитих величина земљишних честица

Покретање различитих величина честица започиње њиховим котрљањем по земљишту што је и приказано на слици 4. Брзина ветра на самој површини је готово нула, али на висини од неколико милиметара може бити значајна. Овако ветар врши већи притисак на горњи део честице него на доњи, што доводи до њеног **котрљања** великом брзином и окретања око своје осе брзином од 200 до 1.000 обртаја у секунди. Док се честица котрља, њен горњи део се креће у правцу кретања ветра све брже и брже, док доњи део иде у супротном правцу. Ковитлање ваздуха око честице ствара смањен притисак (непотпун вакуум) изнад ње, док је ваздух испод честице под већим притиском. Ова разлика у притисцима постепено **подиже честицу**, која потом скаче у

висину. Хоризонтална компонента њене брзине узрокује да се диже под углом од 75° до 90° . Висина скока зависи од снаге ветра и масе честице. Честице се обично подижу на висину од 15 до 30 cm, понекад до 60 cm, а врло ретко достижу 90 cm. Након подизања, брзина њихове ротације се смањује, а честице улазе у слојеве ваздуха са већом брзином ветра, што додатно убрзава њено **хоризонтално кретање**. У току лета, честица се креће у благом луку. Њен хоризонтални замах узрокује транспорт на удаљеност од неколико десетина центиметара до неколико метара, у зависности од јачине ветра. Највећа концентрација честица које се крећу салтацијом јавља се на висини до 1 метра. Током лета, честица може ударити у друге честице на земљишту и покренути их, чиме се процес додатно убрзава. Како изгубе снагу за даље уздизање, почињу да се крећу у благом силазном луку, затварајући угао са земљиштем између 6° и 12° што је приказано на слици 5.



Слика 5. Путaња – трајекторија кретања земљишне честице током кретања салтацијом

Када се честица спусти на земљиште, она удара друге честице на површини, преносећи кинетичку енергију и тако поново започиње циклус салтације – котрљање, подизање, лет и поновно падање. Фактори који утичу на салтацију су брзина ветра, текстура земљишта, влага и присуство вегетације. Салтација је доминантан облик кретања земљишта у сувим и полусувим подручјима, где је ветар главни узрочник ерозије. Овај облик кретања чини око 50-75% укупног транспорта земљишних честица ветром. Она има значајан утицај на деградацију земљишта, али и на формирање нових облика рељефа, као што су дине.

3. Суспензија

Када честице које се крећу салтацијом падну на површину, оне подижу и узбуђују мање честице земљишта. Те ситније честице, због релативно велике површине у односу на своју тежину, подижу се у ваздух и остају у суспензији. Ношене ветром, ове честице могу путовати на велике удаљености, често и неколико хиљада километара, пре него што се таложе на земљишту или у воденим површинама. Овај фини материјал, који

се састоји од честица пречника мањег од 0,1 mm, чини оно што називамо прашином. Интересантно је да се овај слој прашине не подиже директно деловањем ветра, јер су честице сувише мале и сувише ниско постављене у односу на површину да би их ветар могао лако покренути. Уместо тога, пад честица које се крећу салтацијом ствара импулс који подиже прашину са површине, након чега је ветар одувава. Овај механизам је главни разлог за формирање депозита као што је лес – уместо да га ветар касније уклони, он остаје таложен и постепено се акумулира, формирајући карактеристичне насlage. Процес елутрације подразумева да се током кретања, честице сортирају према величини, густини и облику. Најситније честице се удаљавају највише, док крупније остају ближе извору. Суспензија као облик кретања доприноси формирању прашних облака и има велики утицај на климатске и еколошке услове. Појава жутих киша у Европи објашњава се честицама које су у суспензији и потичу из подручја пустиње Сахаре.

Пошто између величина честица земљишта које се крећу у три облика еолске ерозије нема чврстих и тесних граница, због разлика у брзини ветра и турбуленције и због разноликости облика и густина самих честица у Табели 7 је дата приближна величина честица земљишта покренутих ветром, док је у Табели 8 дата брзина ветра при којој почиње кретање честица различите крупноће.

Табела 7. Гранична величина честица земљишта за различите облике кретања

Облик ерозије ветром	Пречник честице (mm)
Ток у суспензији	< 0,1
Салтација	0,1 - 0,5
Површинско пузање	0,5 - 3,0

Табела 8. Брзина ветра при којој почиње покретање земљишних честица

Крупноћа агрегата (mm)	Средња брзина ветра (m/s)
< 0,25	3.8
0,25 - 0,5	5.3
0,5 - 1,0	6.8
1,0 - 2,0	11.2
2,0 - 3,0	13.1
3,0 - 5,0	17.6

Сви облици кретања су међусобно повезани и заједно обликују пејзаже под утицајем ветра. Разумевање механизма кретања земљишних честица је од суштинског значаја за планирање мера заштите од еолске ерозије и очување земљишних ресурса.

3.2. Фактори који утичу на еолску ерозију

Еолска ерозија је процес који зависи од великог броја фактора који могу утицати на њен интензитет и обим. Ти фактори могу бити природни и антропогени, и они комбинују своје ефекте како би довели до различитих степена ерозивности на одређеним подручјима. Међу најважнијим факторима који утичу на еолску ерозију,

нарочито су значајни у ширем смислу климатски услови (ветар, падавине, ваздушни притисак, влажност), својства земљишта, као и начин коришћења земљишта.

Клима, брзина ветра и турбуленција

Ветар је главни покретач еолске ерозије. Његова брзина, интензитет и континуитет играју кључну улогу у процесу преноса честица земљишта. **Брзина ветра** на површини земљишта представља најважнији фактор који утиче на еолску ерозију. Постоји **минимална брзина ветра** потребна за почетак ерозије, која зависи од различитих услова на терену. Уколико нема честица у ваздуху, за почетак кретања земљишних честица потребна је већа брзина ветра, док када су честице већ присутне у ваздуху (нпр. у процесу салтације), ветар их може лакше померити. Брзина која је потребна да ветар покрене процес ерозије без помоћи већ избачених честица назива се **минимална почетна брзина** тока, а када честице допринесу енергији ветра, говори се о **минималној почетној ударној брзини**. У зависности од услова, минимална потребна брзина креће се између 13-21 km/h, измерено на висини од 15 cm изнад земље.

Турбуленција игра важну улогу у овом процесу, јер додаје ветру вертикалну компоненту, што чини ветар ерозивнијим у преносу честица. Турбулентни ветрови такође могу повећати ерозивну моћ, што је чини једном од главних компоненти која утиче на кретање и подизање честица земљишта.

Температура, ваздушни притисак и релативна влажност

Температура и ваздушни притисак утичу на специфичну тежину ваздуха, што може утицати на енергију коју ветар преноси на земљиште. На пример, високе температуре могу проузроковати исушивање земљишта, што доводи до смањења његове структурне стабилности. Исушено земљиште постаје склоно распадању на ситне честице, које ветар или вода лако односе, чиме се интензивира процес ерозије.

Релативна влажност такође има велики утицај, јер висока влажност чини земљиште отпорнијим на ерозију, јер честице чврсто држе заједно, док сува земљишта лакше подложна ерозији.

Количина, распоред и интензитет падавина

Падавине имају индиректан утицај на еолску ерозију. **Количина, распоред и интензитет падавина** значајно утичу на појаву еолске ерозије, пре свега кроз ефекте на влажност земљишта, развој вегетације и структуру површинског слоја. Велика количина падавина може довести до засићивања земљишта, што утиче на формирање површинске коре, која повећава ризик од еолске ерозије. С друге стране, ако падавине нису довољне, земљиште постаје суво и подложно ерозији. Стална влажност земљишта представља

важну улогу у стварању природне заштите од ветра, чиме се смањује ризик од еолске ерозије.

Земљиште

Еродибилност земљишта ветром зависи од неколико кључних фактора као што су **текстура** (величина и распоред честица), **структура** (поређаност и повезаност честица), **коезивност** (способност честица да се међусобно вежу), **густина** (запреминска маса земљишта) и **садржај влаге** на површини земљишта.

Тип земљишта такође утиче на еродибилност земљишта. Тако на пример, песковита земљишта су лако еродибилна због великог удела честица погодних за салтацију и имају низак садржај везивног материјала, што смањује отпорност на ветар. Глиновита земљишта су стабилнија и кохерентнија, али након влажења и сушења често формирају покорицу која може постати подложна ерозији. Земљишта са агрегатима еродивних величина лако еродирају због мале запреминске тежине агрегата, што омогућава да их ветрови чак мале брзине подигну.

Грубље гранулирана земљишта углавном еродирају у процесу салтације, док ситно прашинска земљишта еродирају у оба процеса – салтацији и суспензији.

Величина честица, такође је један од фактора који утиче на појаву еолске ерозије. Честице мање од 1 mm су високо еродибилне, док честице веће од 1 mm су отпорне на ерозију. Процес ерозије почиње када садржај крупнијих честица падне испод 50%. Праг отпорности без заштитног покривача биљних остатака је садржај агрегата већих од 1 mm у количини од 50-55%.

Релјеф и начин коришћења земљишта

Релјеф и начин коришћења земљишта значајно утичу на еолску ерозију, јер одређују изложеност површине ветру. Равне и отворене области, попут степа и пустиња, најподложније су овом процесу, јер ветар неометано подиже и преноси честице земљишта. Насупрот томе, брдски релјеф може ублажити снагу ветра и деловати као природна баријера. Чак и **микротопографија**, попут малих удолина, може створити природне баријере које штите земљиште од ветра. Ове удолине могу задржати честице земљишта које се сnose процесом салтације и на тај начин штите земљиште од ерозије.

Поред тога, начин коришћења земљишта игра важну улогу – пољопривредне површине без вегетационог покривача и деградиране области знатно су склоније еолској ерозији у поређењу са стабилним теренима који имају заштитни слој вегетације.

Биљке и остали органски остаци

Биљке имају заштитну улогу у спречавању еолске ерозије. Њихово корење стабилизује земљиште и смањује се ефекат удара ветра, тако да земљиште постаје

отпорније на ерозију. Такође, **остали органски остаци**, попут лишћа и стабљика, повећавају храпавост терена, што додатно успорава ветар и смањује могућност одношења честица. У подручјима са мало вегетације, као што су сушни и полусушни региони, еолска ерозија је знатно интензивнија.

Начин обраде и коришћења земљишта

Пољопривредне праксе, пре свега начин обраде земљишта, могу значајно утицати на интензитет еолске ерозије. Интензивно орање и прекомерна експлоатација земљишта нарушавају његову структуру, смањују збијеност и остављају га изложеним ветровима. Са друге стране, очување прекривености земљишта покровним усевима, заштитним појасевима и конзервативним методама обраде, попут минималног орања, може значајно смањити ризик од ерозије. Неодговарајуће коришћење земљишта, попут прекомерне испаше, доводи до уклањања вегетације и повећава подложност ерозији.

Годишња доба

Годишња доба значајно утичу на учесталост и интензитет еолске ерозије. Током сушних летњих периода, када је земљиште суво и без довољно вегетационог покривача, ерозија је најизраженија, посебно у подручјима са јаким и учесталим ветровима. Зими, када је земљиште смрзнуто или прекривено снегом, ерозија је минимална, али мраз може допринети распадању честица, што повећава ризик од ерозије након отапања снега у пролеће. У кишним сезонама, повећана влажност земљишта смањује његову подложност еолској ерозији, спречавајући подизање честица ветром.

Сви ови фактори међусобно делују, стварајући услове за појаву еолске ерозије, односно откидање, транспорт и таложење честица земљишта. Разумевање њихове динамике је кључно за процену ризика и примену мера за заштиту земљишта од ерозије.

3.3. Главни принципи контроле еолске ерозије

Контрола еолске ерозије подразумева низ мера и техника усмерених на спречавање или смањење ерозије земљишта узроковане ветром. Ове мере су кључне за очување плодности земљишта, смањење деградације и заштиту екосистема. Главни принципи контроле еолске ерозије укључују:

Смањење брзине ветра на површини земљишта

Да би се спречило почетно покретање честица земљишта ветром, кључно је смањити брзину ветра на површини испод критичног нивоа. Ово се постиже применом следећих мера:

Ветрозащитни појасеви: Садњом дрвећа, грмља или травнатих баријера ствара се физичка заштита која успорава брзину ветра и смањује његову способност да подиже честице земљишта.

Физичке препреке: Постављањем ограда, мрежа или сличних структура, које апсорбују део енергије ветра, смањује се његово дејство и ризик од ерозије.

Специфична обрада земљишта: Технике обраде које смањују вртложење ветра, попут контурног орања или минималне обраде (примена регенеративне пољопривреде), додатно доприносе заштити земљишта од еолске ерозије.

Набројане мере, примењене појединачно или у комбинацији, помажу у стварању стабилнијих услова на земљишту и смањењу негативног утицаја ветра.

Повећање величине земљишних агрегата

Да би се повећала отпорност земљишта на еолску ерозију, кључно је формирати веће земљишне агрегате, јер они имају већу масу и мање су подложни одношењу ветром. Овај циљ се може да се постигне применом следећих мера:

Применом органских материјала: Додавање компоста, хумуса, стајњака или других органских материја значајно побољшава структуру земљишта. Ова мера подстиче формирање стабилних и већих агрегата, што повећава отпорност земљишта на ерозију.

Контролисано обрадом земљишта: Примена минималне обраде, која чува природну структуру земљишта, или методе попут затрављивања смањују фрагментацију земљишних честица. Ове праксе омогућавају очување већих агрегата и смањују њихову изложеност ветру.

Хватање честица салтације

Да би се спречила секундарна ерозија, кључно је ухватити честице салтације, односно оне које ветар подиже и преноси кратким скоковима. Ово се постиже применом следећих мера:

Малчирање: Прекривањем земљишта органским материјалима попут сламе, сена или компоста, или неорганским материјалима попут шљунка, смањује се директна изложеност површине ветру. Малч задржава честице на месту и додатно помаже у очувању влаге земљишта.

Постављање препрека на земљишту: Коришћење мрежа, ниских ограда или других баријера попут плетера* на површини земљишта (нарочито на међама) ефикасно

зауставља честице које се крећу салтацијом. Ове препреке смањују кретање честица и ограничавају њихов утицај на околну земљиште. Ове мере су кључне за смањење укупног ерозионог процеса и доприносе очувању стабилности и плодности земљишта.

***Плетери** на међама често имају функцију заштите земљишта и означавања граница парцеле, али и спречавања ерозије, јер могу да усмере кретање ветра и заштите земљиште од одношења. Овај облик оgrade је једноставан за израду, еколошки прихватљив и често се користи као декоративни елемент, а уједно има и функционалну вредност у пољопривреди и сточарству.

Одржавање влажности земљишта

Влажно земљиште је много отпорније на еолску ерозију, јер већа влажност повећава кохезионе силе између честица земљишта, чинећи их тежим за подизање ветром. Како би се одржала влажност и смањила опасност од ерозије, нарочито у сушним периодима када је ризик од ерозије највећи, примењују се следеће мере:

Наводњавање: Редовно заливање земљишта помаже у одржавању влажности, чиме се смањује могућност подизања честица ветром и њихово одношење.

Конзервација воде: Технике као што су малчирање, постављање слоја органског материјала на површину земљишта, смањују испаравање воде и помажу у очувању влажности земљишта, што доприноси његовој већој отпорности на ерозију.

Примена метода које смањују вртложење ветра

Одређене препреке које стварају вртложење ветра, али уједно апсорбују његову енергију могу бити корисне. На пример, мреже које усмеравају ветар стварају зоне са смањеним интензитетом. Турбуленција ветра, која настаје при контакту ветра са површином земљишта и ствара вртложење које подиже честице, представља кључни проблем у контроли еолске ерозије. Да би се смањио овај ефекат, примењују се различите већ набројане мере кроз претходне принципе контроле.

Ефикасне мере контроле еолске ерозије се базирају на главним принципима контроле еолске ерозије. Прилагођавањем ових мера локалним условима (клими, типу земљишта и интензитету ветрова) представља суштину за успешну заштиту од ерозије.

4. ЕРОЗИЈА ВОДОМ

Водна ерозија представља процес уклањања и транспорта честица земљишта под дејством воде, што је природна појава, али се њен интензитет знатно повећава услед

људских активности као што су крчење шума, прекомерна обрада земљишта и неконтролисана урбанизација.

Генетска класификација водне ерозије темељи се на анализи еволуције и динамике ерозионих процеса, који се развијају кроз различите фазе и облике. Ерозија структуре земљишта започиње разарањем веза између земљишних агрегата, које настаје под утицајем тока воде. У овом почетном стадијуму, земљишни агрегати се премештају, долази до **колмације*** и стварања покорице након што се површински слој земљишта осуши. Овај процес, који није у великој мери повезан с транспортом честица, назива се ерозија земљишне структуре. Поред разарања, присутан је и процес акумулације, који се огледа у таложењу честица или колмацији. Ови процеси разарања и акумулације смењују се у простору и времену, при чему се могу разликовати зоне у којима доминира одношење (спирање) или акумулација. Разарање честица, њихов пренос и акумулација чине повезани ланац процеса.

***Колмација** је процес таложења честица у слоју земљишта, који доводи до његовог збијања и смањене пропусности за воду. Она настаје када вода носи честице и таложи их у горњем слоју, што може створити покорицу – танак, збијен и слабо пропусан слој. Узроци укључују **удар кишних капи и површинско струјање воде**. Последице су отежан продор воде у дубље слојеве, задржавање воде на површини, поплаве, деградација структуре земљишта и смањена плодност, што негативно утиче на пољопривреду.

Процес ерозије водом односно ерозије структуре земљишта започиње ударом кишних капи, нарочито током олујних падавина, које поседују значајну енергију којом разбијају агрегате и збијају површински слој земљишта, узрокујући почетну дестабилизацију. На тај начин нарушавају се везе између земљишних агрегата деловањем микроструја воде и кишних капи, одвајајући фине честице и стварајући услове за њихово преношење. Када интензитет падавина пређе инфилтрацију, вишак воде почиње да се слива низ падине, носећи честице земљишта са собом. На стрмијим теренима, ток воде се усмерава у мале усеке у земљишту, који се временом продубљују и формирају јаруге, а у екстремним случајевима могу довести до дубинског оштећења терена.

Даље одвијање водне ерозије укључује пренос честица низ падину, што чини основу површинске ерозије. Почетни стадијуми овог процеса обухватају ерозију распршивања, при којој кишне капи изазивају одношење честица без формирања токова, и површинско спирање, које настаје успостављањем плитког површинског тока. Ови процеси често имају ламинарни режим тока, док вртлози, изазвани кишним капима, значајно повећавају транспортну способност воде. Како концентрација тока расте, долази до развоја линијске ерозије, где се токови усмеравају према правцу максималног

пада, формирајући дубље и интензивније процесе спирања земљишта. На стрмим падинама, концентрисано струјање може довести до формирања јаруга и вододерина, што означава прелазак у јаружасту ерозију.

Јаружаста ерозија карактерише се образовањем каскада, плићака и усека у земљишту, а њена интензивна манифестација је степенаста јаружаста ерозија. Овај процес често доводи до презасићења наноса, што узрокује промене пада корита и смањење транспортне способности воде. У екстремним случајевима, јаружаста ерозија се трансформише у флувијалну ерозију, која се одвија у већ формираним речним коритима и зависи од интеракције тока и наноса. Бујична ерозија, као посебан облик, обухвата кретање великих количина наноса и воде, при чему може допринети развоју других облика ерозије.

Поред површинских и линијских процеса, водна ерозија укључује и подземну ерозију, која обухвата размекшавање и суфозију земљишта. Овај облик ерозије узрокује стварање пукотина и раседања, чиме додатно дестабилизује земљиште. Важно је напоменути да се различити облици ерозије често преклапају и прелазе један у други, што зависи од интензитета падавина, карактеристика терена и вегетацијског покривача. Ова просторно-временска променљивост кључна је за разумевање целокупног процеса, који се може класификовати као равнотежни, нарушени или неравнотежни, у зависности од усклађености транспортних и ерозионих капацитета тока.

Водна ерозија је нарочито изражена на обрадивим површинама без вегетационог покривача, где је земљиште директно изложено удару кише, као и на стрмим теренима где брзина отицања воде додатно појачава њено разорно деловање. Сушна подручја су посебно осетљива, јер ретке, али интензивне кише изазивају нагли површински ток, док обале река и језера трпе сталан притисак водених токова који подривају земљиште. Последице водне ерозије су бројне и дубоке. Губитак горњег, плодног слоја земљишта озбиљно угрожава пољопривредну производњу и доводи до пада продуктивности, док се честице које вода односи таложе у рекама, акумулацијама и језерима, изазивајући њихово загађење, замућивање и смањење капацитета. Поред тога, водна ерозија доприноси појави поплава, јер онемогућава ефикасан рад система за одводњавање, а деградација земљишта доводи и до губитка станишта многих биљних и животињских врста.

4.1. Класификација водне ерозије

Водна ерозије обухвата различите облике који се разликују по начину настанка, интензитету и утицају на земљиште. Главне категорије водне ерозије укључују **плувијалну, флувијалну, бујичну и потповршинску ерозију**, које се даље деле на специфичне облике. Свака од њих има карактеристичне процесе и ефекте на земљиште и пејзаж. Анализирани облици водне ерозије могу се класификовати као равнотежни,

нарушени или неравнотежни. Равнотежни процес настаје када постоји динамичка равнотежа између потенцијалних могућности спирања земљишта и транспорта наноса, док нарушени режим настаје када се у кориту налазе велике стене које ометају нормалну динамику водене ерозије.

4.1.1. Плувијална ерозија

Плувијална ерозија је облик водне ерозије који настаје као резултат деловања падавина на површину земљишта. Овај процес је усмерен на разбијање земљишних агрегата, померање честица и стварање ерозионих путева воде због пада кишних капи, које имају велику кинетичку енергију. Кишне капи директно утичу на површину земљишта, стварајући микроскопске поремећаје у структури земљишта и доводећи до померања честица, што може изазвати дугорочне последице на квалитет земљишта. Плувијална ерозија је често почетни стадијум водне ерозије, који се касније може развити у озбиљније облике.

Плувијална ерозија може да се подели на неколико основних облика, који се разликују према интензитету падавина, површинској структури земљишта, и његовој реакцији на ерозивне силе:

Површинска ерозија

Површинска ерозија почиње када кишне капи ударе о земљиште. Кишне капи са пречником од 7-9 мм, имају велику кинетичку енергију и могу значајно оштетити земљишну структуру. Разбијајући земљишне агрегате, ове капи делују као "бомбе", узрокујући распад агрегата у концентричне кругове. Ово доводи до уништавања структуре земљишта, што директно утиче на његову плодност, која зависи управо од чврстоће и повезаности земљишних агрегата. Као резултат овог процеса, на површини земљишта се ствара покорица, која затвара земљишне поре, ограничавајући инфилтрацију воде и чиме се додатно отежава раст биљака. Ова ерозија може се приметити кроз појаву малих ерозионих браздица, као и уочавањем губитка квалитетног слоја земљишта.

Браздаста ерозија

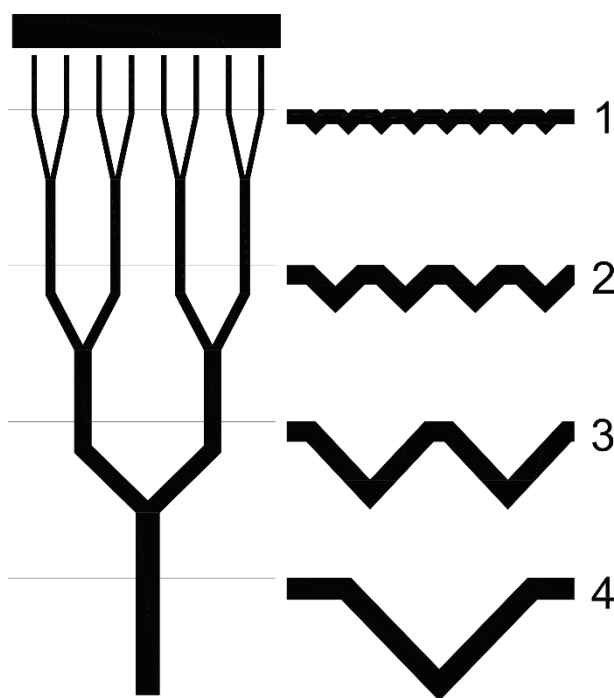
Браздаста ерозија настаје када на површини земљишта дође до задржавања воде због интензивних падавина које премашују инфилтрацију (капацитет земљишта да упије воду). На нагнутим површинама вода почиње да се усмерено креће низ терен, што доводи до стварања малих канала или бразди у облику слова "В". Овај процес се интензивира под утицајем земљине теже, која повећава дубину и ширину бразде, док вода наставља да носи честице земљишта на ниже делове терена.

Када вода почне да се слива низ нагнуту површину земљишта, често у пољопривредним областима где земљиште није заштићено биљним покровом, мала углавном неугледна упоришта могу брзо постати дубоке бразде. Ово је посебно изражено у песковитим земљиштима која су подложна овом процесу, док су глиновита земљишта отпорнија на развој браздасте ерозије.

Дубинска - Јаружаста ерозија

Јаружаста ерозија настаје када дубина канала (јаруге) пређе његову ширину, што доводи до формирања дубоких и широких ерозионих појава. Ова врста ерозије се најчешће јавља на већим нагибима терена, где вода добија довољно енергије да се концентрише у одређеном правцу и продубљује земљиште. Погодно је за ову врсту ерозије када падавине буду веће од инфилтрације односно капацитета земљишта да апсорбује воду, што доводи до стварања ерозионих рова и канала.

У овом процесу, вода која се креће низ падину носи честице земљишта, те долази до дубљих канала, који временом добијају све веће размере. Од мањих бразди (браздастих облика) до већих, дубоких јаруга и урвина, дубина ових канала може достићи и неколико метара као што је то приказано на слици 6. Са временом, овај процес може довести до значајног губитка плодног земљишта и појаве других геоморфолошких промена, попут поплава и клизишта, а јаруге могу постати озбиљан проблем јер смањују стабилност земљишта и могу имати дугорочне последице на плодност и равнотежу екосистема у тој области.



Слика 6. Развој бразди код дубинске ерозије на падини

Клизишта

Клизања, као један од процеса водене ерозије, представљају механизам у коме се велики делови земљишта или стена померају низ падину под утицајем тежине, воде или других фактора који утичу на стабилност терена. Ова појава је често праћена другим ерозивним процесима, као што су површинска или браздаста ерозија, који могу да доведу до повећане осетљивости земљишта на клизање.

Процес клизања се обично дешава на теренима са великим нагибима, где вода (падавине или подземне воде) игра кључну улогу у смањењу коезивности земљишних честица, чиме се олакшава њихово померање. У овом контексту, клизања се могу посматрати као крајњи резултат дуготрајног деловања ерозије, која постепено разара стабилност терена.

Такође, клизања су чест проблем у подручјима која су подложна интензивним падавинама, јер велика количина воде која се акумулира у земљишту може да изазове рушење стабилних слојева и померање већих количина земљишта. Као последица, ова ерозија може изазвати дубоке урвине и штету на инфраструктури, али и значајно угрозити животну средину, пољопривредне површине и водне токове.

Фактори који утичу на плувијалну ерозију

Различити фактори могу имати значајан утицај на развој и интензитет плувијалне ерозије, а то су:

Интензитет падавина: Јаки плјускови са великим капима имају већу кинетичку енергију и изазивају бржу ерозију.

Врста земљишта: Порозна земљишта су склонија ерозији, док је иловасто земљиште мање подложно разарању.

Нагиб терена: Стрме падине омогућавају лакше кретање воде низ падину, што убрзава ерозију.

Вегетација: Недостатак вегетације на површини земљишта чини га посебно подложним плувијалној ерозији, јер коренов систем не може да стабилизује земљиште.

4.1.2. Флувијална ерозија

Флувијална ерозија је процес обликовања земљишта под утицајем текуће воде, као што су реке, потоци и гранични случај ове врсте ерозије - бујице. Овај природни процес игра значајну улогу у геоморфологији, јер обликује рељефне облике. Флувијална ерозија се кроз водотокове одвија у три основне фазе: **Одношење материјала** када вода тече преко површине земљишта, односећи честице земљишта или седимента. Овај процес је најинтензивнији током великих падавина или код нагиба са слабом вегетацијом. **Транспорт еродираниог материјала** где се материјал који вода однесе креће низводно у облику суспензије (ситне честице), вучења (крупнији делови) или

котрљања (камење и шљунак). И последња фаза је **таложeње или седиментација** - када вода изгуби енергију (на пример, уласком у равницу или у део тока где је пад дна доста блажи), еродирани материјал се таложи, стварајући наносе попут алувијалних равница, делти и тераса. Флувијална ерозија може да се подели према деловању у водотоку на:

Базисна или вертикална ерозија

Водоток (поток, речица или река) копа дубоко у своје корито, продубљујући га. То је чест случај у планинским пределима, где реке имају велику кинетичку енергију.

Латерална ерозија

Односи се на бочно ширење речног корита, при чему река еродира своје обале, што је типично за равничарске реке и меандре.

Регресивна ерозија

Настаје када се извор реке или потока помера уназад, најчешће због стрмих падова или слабе отпорности земљишта.

Ерозиони облици флувијалне ерозије су **жљебови и јаруге** који се формирају на падинама услед површинског отицања воде и дубинске ерозије. **Ерозивни прагови и водопади** који се формирају на местима где река наилази на тврђе стене које се спорије еродирају. **Меандри** који представљају завојити ток реке на равницама и настају као резултат латералне (бочне) ерозије. **В-облици долине** – ово је најчешћи облик долине у младим речним системима, формирају се због вертикалне ерозије и падавина. **Кањони и клисуре** представљају скоро коначне ерозионе облике јер се стварају у стеновитим областима где река дубоко усеца своје корито кроз вертикалну ерозију.

Акумулативни облици флувијалне ерозије су **алувијалне равни** које представљају широка, равна подручја наслага у речним коритима и дуж обала. **Алувијалне лепезе** које се обликују у подножју планина, где се река излаже из уске долине и губи на снази, таложећи материјал у облику лепезе. **Речна острва** која се формирају се акумулацијом седимената у средини или дужином речног тока. **Плавне терасе** које се стварају постепеним спуштањем корита реке и поновним таложењем наслага током поплава. **Оксбоу језера** која настају на месту старих меандера који су одсечени од главног речног тока.

Фактори који утичу на флувијалну ерозију

Различити фактори могу имати значајан утицај на развој и интензитет флувијалне ерозије, а то су:

Брзина и количина воде – Већа количина воде и бржи ток повећавају интензитет ерозије.

Тип земљишта – Мекше и мање везано земљиште подложно је јачој ерозији.

Нагиб терена – Стрмији нагиб омогућава већу брзину кретања воде и, самим тим, интензивнију ерозију.

Вегетација – Биљке смањују интензитет ерозије, јер стабилизују земљиште својим корењем и успоравају површинско отицање воде.

Флувијална ерозија утиче на формирање кањона, долина и клисура, промене у речном кориту и потенцијалне поплаве. Поплаве се могу јавити услед латералне ерозије могу бити угрожена чак и насеља, пољопривредне површине и друго, јер на пример на конкавној стани водотока водоток може толико да еродира обалу да је потпуно „исече“ односно уништи.

Флувијална ерозија је природан процес, али људске активности, попут крчења шума, неадекватне пољопривредне праксе и урбанизације, могу значајно повећати њен интензитет и негативне последице. За контролу овог процеса користе се мере заштите земљишта, регулације водотокова и пошумљавања, како у самом кориту тако и у целом сливу.

4.1.3. Бујична ерозија

Бујична ерозија представља специфичан облик ерозије који се јавља као резултат интензивних и краткотрајних кишних падавина које доводе до изненадног пораста водотока у планинским и брдским подручјима, где су падине нагнуте, а земљиште није довољно стабилизовано. Она подразумева брзо и снажно разарање површине земљишта, као и пренос великих количина наноса односно чврстог материјала низ падине и долине. Бујична ерозија је један од најагресивнијих и најбржих облика ерозије. Бујичну ерозију можемо поделити према много различитих основа тако на пример можемо је поделити према **врсти ерозионих процеса у сливу и просечној годишњој запремини бујичног наноса** на бујичну ерозију спирњачког типа, подривачког типа, мешовитог типа или карстог типа. Затим можемо је поделити према **типу наноса бујичног тока** на: блатни тип, блатно-каменити тип и само водно-каменити тип. Такође једна од подела према проф. С. Росићу је и **према врсти наноса**: земљасте (подриваче), земљасто-камените (спирњаче) и камените бујице. На подручју Србије најчешће се користе **квантитативни приступ** категоризацији бујичних токова који подразумева коришћење података као што су хидрографске класе, коефицијенти ерозије и категорија

разнородности. У овом смислу токови се деле на: бујичне реке, бујичне речице, бујичне потоке, суводолине и мањи бујични потоке, урвинске токове и јаруге и вододерине. Бујичну ерозију можемо поделити, према њиховом **саставу и интеракцији воде и честица које се транспортују**, на: невезан бујични ток где вода садржи велике чврсте честице које нису молекуларно повезане са водом. Ове честице се само физички преносе и померају кроз воду; и на везан бујични ток где садржи више чврстих честица које су повезане молекуларним силама са водом, што ствара густу, вискозну смешу која омогућава пренос чак и тежих честица унутар течности.

Ерозиони облици бујичне ерозије су **жлебови и канали** који се формирају као резултат брзе ерозије и велике количине воде која се спушта низ падину. Затим, **наноси** који се формирају на нижим теренима, где се вода успорава, долази до таложења ношеног материјала, често у облику алувијалних равни или малих делти. И **поплавне долине** које се стварају у долинама услед таложења великих количина седимената који стварају широке и ниске поплавне равнице.

Бујична ерозија представља природан процес, али антропогени фактор има значајан утицај на саму појаву и њено интензивирање. Мере заштите од бујичне ерозије обично се деле на две категорије. **Мере у сливу** се фокусирају на контролу и смањење количине воде која ће доћи до тока, док **мере у самом току** преузимају непосредну одговорност за контролу ерозије у тренутном току воде.

Свака од ових врста водне ерозије изазива значајне промене у структури земљишта, утичући на плодност, стабилност и квалитет земљишта. Разумевање и препознавање ових облика ерозије од кључне је важности за правовремену заштиту земљишта и превентивне мере.

4.1.4. Потповршинска ерозија

Потповршинска ерозија представља процес у којем се честице земљишта уклањају испод површине, често услед продора воде која се инфилтрира у земљиште. За разлику од површинске ерозије, која уклања материјал са површине, потповршинска ерозија утиче на дубље слојеве земљишта, нарушавајући његову стабилност. Овај тип ерозије се најчешће дешава у подручјима са порозним земљиштем, где вода може лако да продре и покрене померање честица испод површине. Потповршинска ерозија посебно прави проблеме у пољопривредним подручјима, где може угрозити стабилност и квалитет земљишта.

Суфозија је специфичан облик потповршинске ерозије који се јавља када вода помера честице у влажним слојевима земљишта, изазивајући њихов транспорт без видљивог површинског утицаја. Овај процес је најчешће изазван падавинама које инфилтрирају у земљиште и стварају подземне токове воде, који померају fine честице песка, иловаче и глине. Суфозија може довести до стварања шупљина и подземних канала, а у екстремним случајевима може довести до урушавања земљишта или појаве клизишта.

Оба процеса, потповршинска ерозија и суфозија, представљају озбиљан проблем за очување квалитета земљишта, јер често доводе до смањења плодности, а у неким случајевима и до озбиљних последица по инфраструктуру и екологију. Због тога је важно правилно управљати водним ресурсима и користити одговарајуће технике заштите земљишта како би се минимизовао њихов утицај.

4.2. Фактори настанка ерозије водом

Ерозиони процеси настају као резултат узајамног деловања различитих физичко-географских фактора који одређују иницирање, развој и интензитет ерозије. Основни фактори приказани су на графику 1 и укључују климатске услове (падавине, температуре, ветрови), педолошке карактеристике (еродибилност земљишта), рељеф (нагиб) и биљни покривач (начин коришћења земљишта). Поред ових, важно је узети у обзир утицај температуре и људских активности.

Климатски фактор

Основи агенс водне ерозије су падавине. Потенцијална могућности ерозионог деловања падавина је у функцији интензитета, суме падавина и енергије. То значи да све падавине нису штетне по земљиште, већ да њихову способност еродирања земљишта одређује њихове енергетски потенцијал и интензитет. Карактеристика падавина да еродирају земљиште назива се ерозивност. Ерозивност* не треба мешати са термином еродибилности* који означава лакоћу еродирања земљишта деловањем водне ерозије.

* **Еродибилност** је способност земљишта да се одупре ерозији, односно његова подложност испирању и ношењу честица услед деловања спољашњих фактора. Зависи од својстава земљишта, као што су текстура, структура и садржај органских материја.

* **Ерозивност** је способност агенса ерозије (нпр. кише, ветра или воде) да изазове ерозију. Одређује се интензитетом, јачином и учесталошћу деловања тих агенаса.



График 1. Приказ кароеа који утичу на појаву водне ерозије

Падавине су климатски чинилац које утичу на настанак и развој водне ерозије. Иако годишња количина падавина пружа општу слику климатских услова, она није довољан индикатор интензитета ерозионих процеса. Значајнији утицај имају количине и распоред падавина током године као и њихов интензитет.

Када у кратком временском периоду падне велика количина падавина високог интензитета, долази до интензивног површинског отицања, што убрзава ерозију. Овај ефекат је нарочито изражен након дугих сушних периода, када је земљиште исушено, а вегетациони покривач слабо развијен. У таквим условима киша не само да се не упија у земљиште, већ изазива интензивно испирање и откидање и транспорт честица земљишта.

У пољопривредним подручјима, критични периоди су они када земљиште није заштићено усевима или када се усеви налазе у раним фазама развоја. Интензивне кише у тим периодима могу значајно оштетити структуру земљишта и изазвати губитак плодног слоја.

Бујичне кише, које дају више од 30 мм падавина у једном дану, представљају највећу претњу. Међутим, истраживања показују да и кише мање количине, зависно од локалних услова, могу изазвати снажно отицање и допринети ерозионим процесима. С друге стране, кише испод 15 мм дневно обично немају значајан утицај на ерозију.

Најинтензивнији ефекти настају услед "бомбардовања" земљишта крупним кишним капима. Капи већег пречника (више од 1,5 mm) и брзине пада веће од 4 m/s могу изазвати озбиљна оштећења површинског слоја земљишта, чиме започиње процес водне ерозије (Табела 9).

Табела 9. Зависност брзине пада и тежине кишних капи од њиховог пречника

Пречник кишних капи d (mm)	Брзина слободног пада v (cm/s)	Тежина кишних капи G (10г)
0.1	27	0.5
0.5	206	65.5
1.0	403	520
1.5	540	1770
2.0	649	4190
3.0	806	141000

Пљускови обично захватају мање површине, док се обичне кише простиру на већем подручју. Ова зависност је приказана у табели 10.

Табела 10. Средњи интензитет пљуска у односу на захваћену површину

Средњи интензитет пљуска (mm/min)	2,2-2,0	2,0-1,0	1,0-0,9	0,9-0,8	0,8-0,5
Захваћена површина (km ²)	4-8	8-25	25-50	50-65	65-350

Све ово указује на неопходност праћења бујичних киша у угроженим сливним подручјима како би се проценио њихов утицај и предузеле мере заштите земљишта.

Температура ваздуха и земљишта игра значајну улогу у покретању и развоју ерозионих процеса. Промене температуре током дана и године делују као агресиван фактор који утиче на структуру земљишта и ерозионе процесе. Према истраживањима различитим истраживањима, повећана ерозија је често повезана са порастом средњих годишњих температура у одређеним подручјима, при чему други фактори, попут падавина, типа земљишта, рељефа и вегетације, остају слични. Средње годишње температуре, због тога, могу послужити као индикатор за процену степена ерозије у датој области.

Температурне промене директно утичу и на процесе распадања стена, посебно на падинама и планинским теренима. Ширење материјала услед загревања и скупљање током хлађења изазивају напоне који доводе до механичког распадања стена. Значајан

утицај има и смрзавање воде у пукотинама стена. Како се вода замрзава, њен волумен се повећава 11 пута, стварајући притисак до 2.100 бара, што узрокује дробљење стена.

У подручјима где се јавља криогена ерозија (која настаје услед процеса смрзавања и отапања воде у земљишту и стенама), температура има пресудну улогу у покретању снежних слојева низ нагибе услед силе Земљине теже. Ови процеси, заједно са температурама које утичу на испаравање и сушење земљишта, чине температуру једним од кључних климатских фактора у развоју водне ерозије.

Топографски фактор

Када се говори о ерозији водом, рељеф често има важну улогу. Квантитативно деловање рељефа на ерозију одређује се мерењем локалног базиса ерозије, који представља висинску разлику између највише и најниже тачке анализираниог сливног подручја. Према различитим ауторима може се сматрати да висинске разлике од 100 до 200 метара, нарочито на мањим сливовима, имају снажан утицај на активирање ерозионих процеса.

Нагиб падине представља веома значајан чинилац ерозионих процеса. Са повећањем нагиба, брзина отицања воде расте, што доводи до веће ерозивне моћи. Истраживања показују да са дуплирањем нагиба кинетичка енергија воде се удвостручава, док транспортни капацитет отицања расте 32 пута. Ово значајно повећава способност воде да транспортује наносе и убрзава процесе ерозије.

Дужа падина омогућава већу акумулацију воде, што повећава њену ерозивну моћ. Дужина падине одређује трајање и интензитет дејства отицања, па се са порастом дужине често повећава и укупна количина ерозивног наноса.

Облик падине значајно утиче на ток воде и ерозионе процесе. Падине се могу груписати на

- Испупчен подужни профил,
- Удубљен подужни профил,
- Правoliniјски подужни профил,
- Удубљено-испупчен подужни профил,
- Испупчено-удубљен подужни профил,
- Степенасти подужни профил.

Конкавне падине често успоравају отицање воде, док конвексне убрзавају проток, што повећава интензитет ерозије.

Експозиција падине одређује количину сунчевог зрачења, температуру и влажност, што индиректно утиче на тип и развој вегетације. На северној Земљиној хемисфери, истраживања показују да су падине са јужном и западном експозицијом подложније ерозији због виших температура и мање влажности, што доводи до слабијег вегетационог покривача.

Облик слива има значајан утицај на развој водне ерозије, јер одређује начин на који се вода и нанос крећу. Два главна типа слива су лепезасти и дугачки сливови, а

њихова разлика у распореду рачвања водотока и геометрији може значајно утицати на интензитет ерозије. У лепезастим сливовима, који имају рачвање ближе ушћу, вода има тенденцију да се концентрише у мањим, краћим токовима. Ова концентрација воде може довести до већег ерозивног капацитета у самом сливу. С друге стране, дугачки сливови са равномерним рачвањем могу имати мањи интензитет ерозије, јер се вода распоређује на већем простору, смањујући своју енергију и способност транспорта наноса. Присутност различитих типова слива може такође утицати на ток кишних облака. Истраживања су показала да су различите конфигурације сливова подложне различитим образцима кишних падавина и њиховом ефекту на ерозију, где облаци који се крећу низводно могу имати другачији утицај од оних који се крећу узводно, зависно од топографских и климатских услова у сливу. Осим тога, различити облици слива, попут лепезастог, где су рачвања ближе ушћу, или дугачког слива са равномерним рачвањем, имају различите ефекте на ерозивне процесе. На пример, у сливовима са краћим токовима и већом концентрацијом воде, као што су лепезасти сливови, ерозија ће често бити интензивнија, посебно током јаких и краткотрајних кишних падавина. Дугачки сливови са равномерним распоредом рачвања, с друге стране, обично имају више простора за дистрибуцију воде, што може умањити њену ерозивну способност. Ово утиче на обрасце ерозије у зависности од правца и интензитета кретања кишних облака, као и од особина терена који облаци пређу.

Утицај топографских фактора на интензитет и карактер ерозије често је директно повезан са интеракцијом других фактора, као што су климатски услови, тип земљишта и вегетациони покривач.

Геолошки фактор

Геолошки фактор је један од кључних елемената који утиче на појаву и развој ерозионих процеса. Он обухвата састав земљишта и стена, као и њихове физичке и хемијске карактеристике, које директно утичу на степен и начин ерозије.

Састав стена и земљишта: Типови стена који чине подлогу одређују како ће се земљиште понашати под утицајем ерозивних агенаса као што су вода, ветар и температурна колебања. Стене попут **шкриљаца** и **песковитих** земљишта, као и слојевита земљишта, често су подложнији ерозији, јер се лако распадају под утицајем кише, мраза и температурних промена. На пример, **шкриљци** садрже глинене честице које се лако усмеравају у урвинске процесе, док **пешчари** стварају земљишта крупнијих зрна, што омогућава брже отицање воде и повећава ризик од ерозије. С друге стране, **чврсте стене** као што су **гранит** или **базалт** имају већу отпорност на ерозију, јер се тешко распадају под утицајем спољашњих фактора. У подручјима где доминирају ове чврсте стене, процес ерозије је спорији, јер су ове стене мање подложне распадању и механичком оштећењу. На геолошким подручјима са овим врстама стена, ерозионих процеси обично се манифестују у споријем временском оквиру, док у подручјима са слабијим стенама и меканијим земљиштима, ерозија може бити бржа и интензивнија.

Порозност и водопропусност: Стене и земљишта различите порозности такође утичу на то како ће се вода понашати на терену. Висока водопропусност омогућава дубље продирање воде у земљиште, што може умањити ерозију, док земљишта са нижом водопропусношћу могу довести до нагомилавања воде на површини, што убрзава процес површинске ерозије.

Старост и стабилност стена: Стене које су старије и које су подложније физичким и хемијским изменама (попут пуцања због замрзавања воде у њима) могу бити подложније ерозији. Примери су стари терени који су под утицајем процеса као што су тектонски покрети, земљотреси или замрзавање и одмрзавање воде.

Тектонски покрети и деформације: Геолошки процеси који се односе на покретање тектонских плоча и формирање планинских ланаца имају дугорочан утицај на ерозију. Када се терен нагло подиже или спушта, то може повећати брзину ерозије, јер се мења нагиб терена, а вода добија већу енергију за транспорт материјала.

Типови земљишта: Типови земљишта имају значајну улогу у ерозији. Песковита земљишта, имају тенденцију да буду подложнија ерозији од глиовитих, јер не задржавају воду добро, а кише могу лако изазвати ерозивне процесе на површини.

Геолошки фактор је због наведеног важан у одређивању како и где ће се ерозија манифестовати, јер одређени геолошки услови могу значајно убрзати или успорити процес.

Педолошки фактор

Физичке и хемијске особине земљишта, као што су текстура, структура, стабилност агрегата, отпорност на смицање, хидрауличке карактеристике и садржај органских материја, кључни су фактори у процесима ерозије. Ови параметри одређују еродибилност земљишта, односно његову склоност ка одвајању и транспорту честица под утицајем ерозивних сила.

Текстура земљишта: Пропорција песка, иловаче и глине одређује колико ће земљиште бити склоно ерозији. Песковита земљишта су еродибилнија, јер не задржавају воду, чиме повећавају површинско отицање. Иловаста и глиновита земљишта, иако боље задржавају воду, могу бити подложна збијању, што повећава отицање.

Структура земљишта: Добра структура омогућава да се честице повежу у стабилне агрегате, чиме се повећава инфилтрација воде и смањује ризик од ерозије. Лоша структура, попут збијених земљишта, доприноси већем површинском отицању и ерозији.

Стабилност структурних агрегата: Стабилни агрегати боље подnose спољне утицаје, попут кише и ветра. Ако агрегати нису стабилни, лако се распадају, што повећава ризик од ерозије. Стабилност агрегата побољшава се повећањем садржаја органских материја.

Отпорност на смицање: Земљишта богата глином имају већу отпорност на смицање, јер су чвршћа, док песковита земљишта лако подлегну овој врсти ерозије.

Водне особине земљишта: Инфилтрација и капацитет за задржавање воде директно утичу на ерозију. Земљишта која брзо упијају воду имају мањи ризик од површинске ерозије, док глиновита земљишта која споро упијају воду повећавају површинско отицање.

Садржај органских материја (хумус): Виши садржај хумуса чини земљиште стабилнијим и отпорнијим на ерозију. Органске материје побољшавају структуру земљишта и способност задржавања воде.

Земљишта са стабилном структуром, која садрже крупне агрегате, су ефикаснија у супротстављању ерозији. Ова земљишта смањују накупљање воде на површини, чиме смањују ризик од ерозије. С друге стране, екстремне промене у влажности земљишта, било да је превише суво или превише влажно, могу допринети његовој крхкости или збијању, што повећава отицање и погоршава ерозију. Комбинација свих ових фактора утиче на динамику ерозије и начин на који се земљиште носи са ерозивним процесима. Имплементација одговарајућих пољопривредних пракси и правилна обрада земљишта су кључни за смањење ерозије.

Вегетација као фактор

Вегетација има улогу у спречавању и контроли ерозије, јер биљке својим корењем стабилизују земљиште, док лишће, стабљике и зељасте делови умањују утицај падавина и ветра. Ефекат вегетације на ерозију зависи од више фактора, укључујући врсту и густину биљног покривача, дубину и распоред кореновог система, као и климатске услове.

Корење биљака - доприноси механичкој стабилности земљишта повећавајући његову отпорност на смицање, чиме се спречава распадање и одвајање честица. Осим тога, корење апсорбује воду, смањујући количину површинског отицања које би могло изазвати ерозију. Дубоко корење вишегодишњих биљака продубљује земљиште и побољшава његову структуру, док плитко корење, попут оног код травњака, има мањи ефекат у спречавању ерозије.

Густина вегетације - густ и непрекидан покривач земљишта је најбољи за спречавање ерозије. Биљке које брзо расту и имају велики број листова и стабљика стварају баријеру која смањује директан удар кишних капи на земљиште, а тиме смањује и ерозију. Вегетација такође делимично смањује брзину воде која тече, чиме смањује њену способност да носи честице земљишта.

Тип вегетације - различите врсте биљака имају различите способности у спречавању ерозије. Дрвеће и жбуње, са дубоким и густим кореновим системима, нуде јачу заштиту од ерозије у поређењу са травама, које имају плиће корење. Међутим, трава може бити врло ефикасна у спречавању површинске ерозије, посебно на плодним земљиштима.

Вегетација и вода - биљке помажу у регулисању водног циклуса у земљишту. Велика већина биљака апсорбује воду из земљишта и тако смањује количину воде која остаје на површини и која може да изазове ерозију. Поред тога, биљке повећавају порозност земљишта, што олакшава упијање воде у земљиште и смањује површинско отицање.

Добро развијен вегетациони покривач може компензовати утицаје климе, топографије и врсте земљишта на дистрибуцију, раст и интензитет ерозије, а у одређеним условима може је и потпуно зауставити, па се управо избор и одржавање биљака на терену често користе као део стратегија за контролу водне ерозије. Нарочито је интересантан податак једног истраживања да је од јаких киша палих у јулу одређене године (580 mm) са шумских површина отекло само 2,5 mm, уз напомену да губитака земљишта није било. Истраживања спроведена у Србији показују да вишегодишње биљне заједнице (као што су шуме и ливаде) имају повољан утицај на смањење површинског отицања, чији коефицијент се креће у распону од 0,0–0,02, док спирање износи 6,2–126,2 t/km² у поређењу са огољеним и деградираним површинама, са коефицијентом отицања од 0,02–0,09 и спирање од 400 t/km² годишње. Круне дрвећа задрже скоро 1/4 кишне воде. Такође истраживања указују да у старој шуми са стељом вода понире 130 пута брже него на угаженом пашњаку. Стуб воде висок 100 mm инфилтрира се у старој шуми за 1-2 минута, док на угаженом пашњаку то траје 1-5 часова.

Неконтролисано уништавање сталног вегетационог покривача у виду сече шума и неконтролисане испаше стоке најчешће наноси велике штете. Нестанком вегетације, земљиште постаје незаштићено и ерозионим процесима неповратно изгубљено.

На пољопривредном земљишту је неопходно применити мере које ће умањити или потпуно отклонити ерозију подручја. Критичан период настаје када је земљиште огољено, између обраде (орања) и ницања усева. Најсврсисходније решење је обрада по изохипсама – контурно орање, контурисање. Такође, густина склопа биљака је кључни елемент у борби против ерозије, те је препоручљиво користити што већи број биљака по јединици површине. Окопавине гајене у монокултури изазивају највеће губитке земљишта услед ерозије, па је најсврсисходније решење примена плодореда.

4.3. Главни принципи контроле водне ерозије

Контрола водне ерозије и спречавање губитка земљишта могу се постићи комбиновањем техничких и биолошких мера. Ове мере могу се имплементирати на различите начине, како у сливу тако и у самом водотоку.

Мере у водотоку

Ове мере су усмерене на смањење интензитета ерозивних процеса и заустављање наноса у самим речним токовима. Ове мере су фокусиране на смањење брзине и снаге воде, те на заустављање или смањење губитка материјала. Оне укључују хидротехничке и техничке мере.

Хидротехничке мере обухватају изградњу попречних и паралелних објеката у речним коритима, које имају за циљ смањење брзине воде и заустављање транспорта великих наноса. Такође, седиментни базени или таложнице се користе као простори у речним коритима у којима се таложи нанос пре него што дође до већих водотокова. Регулација речних токова подразумева продубљивање и уређивање речних корита како би се обезбедила стабилност и смањила ерозија.

Техничке мере укључују изградњу обалоутврда које спречавају ерозију обала реке и заштиту мостова и других инфраструктурних објеката од ерозије изградњом бетонских баријера или камених заштита.

Мере у сливу

Са друге стране мере у сливу, имају за циљ смањење ерозионих процеса на извору, односно у подручјима где долази до покретања воде и наноса. Ове мере укључују агротехничке, хидротехничке и биолошке активности.

Агротехничке мере подразумевају промену начина коришћења земљишта, као што је избегавање прекомерне обраде и деградације земљишта, садњу биљака са дубоким корењем које стабилизују земљиште, као што су трава, жбунови и шуме, и терасирање стрмих падина како би се смањила брзина отицања воде.

Хидротехничке мере обухватају изградњу уппојних и одушних канала за одвођење сувишне воде са површина које су подложне ерозији, као и конструисање преграда или брана које успоравају проток воде и спречавају наношење еродираних честица.

Биолошке мере укључују пошумљавање деградираних подручја која спречавају отицање воде и стабилизују земљиште, као и сетву трава на голим површинама ради успостављања вегетационог покривача.

5. БУЈИЧНИ ТОКОВИ

Бујична ерозија представља најтежу, завршну или крајњу фазу развоја ерозивних процеса у једном сливу, чији је резултат формирање бујичних водотокова различитих димензија. Такви водотокови имају своје сливно подручје, корито и хидрографску мрежу, али и специфичне хидрографске карактеристике. Ове карактеристике се

одликују повременим и наглим концентрацијама воде и наноса који поседују изузетну разорну снагу.

Сам појам бујичног слива, бујичног корита и бујичне поплавне воде обухвата велики број дефиниција. Међутим, објашњење које је дао Гавриловић (1972) често се сматра најприхватљивијим. Према њему, **бујични слив представља природни слив у коме се јављају и развијају ерозивни процеси изазвани деловањем воде.**

Дефиниције бујичних водотокова или бујица (на енглеском torrent, француском torrent, немачком wildbach, шпанском i италијанском torrente и руском селј) су бројне и разноврсне, што указује на сложеност и разноликост овог хидролошког феномена. Према хронологији у наставку су дате неке од њих:

- Бујице су вододерине и дивљи планински потоци, који спирањем и одроњавањем или наносом (каменом, шљунком, песком) причињавају штете јавним или приватним интересима (Закон о уређењу бујица Краљевине Југославије из 1930);
- По Малетићу (1932) бујица је “.. нагло надолажење воде која је обично измешана са камењем, шљунком, муљем и другим материјалом. Вода обично не тече већ се ваља као водени талас а чим сиђе у долину разлије се и заспе је наносом у коме има свега онога што је на путу закачила и понела (камена, муља, дрвећа и другог). Бујица увек тече са јаким шумом, она бучи и тутњи ломећи предмете на које наилази, отуда је и народни назив бучњак”.
- Под појмом бујице морамо схватити појаву стварања нарочито блатњаве масе која се одваја од једног места, под утицајем теже помера од места таложења и на тачно одређено место наталожена остаје, ако не дођу текуће воде даје разнесу (Росић, 1948);
- Бујице су водотоци, који за време киша нагло набујају и носе огромне количине наноса, који се састоји из разноврсног матријала (Ванчетовић, 1951);
- Бујице су вододерине и дивљи планински потоци, формирани под утицајем комплекса различитих фактора у брдским пределима, који спирањем, одроњавањем, преношењем и одлагањем наносног материјала (камена, шљунка, песка и земље) причињавају штете (Лазарев, 1951);
- Под бујицама, у смислу овог Закона, подразумевају се водотоци који спирањем, одроњавањем, преношењем наноса и засипањем (каменом, песком, земљом и др.) чине штету државним или приватним добрима (Закон о заштити земљишта од ерозије и уредјењу бујица СР Србије из 1954.);
- Бујице су повремени или стални водотоци (вододерине, јаруге, суводолине, потоци и речице) код којих су поплаве нагле и краткотрајне, а одликују се разорном снагом и великим изливима штетних наноса (Савезни закон о водама из 1954.);
- Бујични слив представља геоморфолошко - хидрографску јединицу која има своје сливно подручје, своје корито и хидрографску мрежу и бујични режим протицања воде, без обзира на величину подручја (Беннет, 1955).
- Богољубова (1957) и Чеботарјов (1964) дају најконкретнију и најпотпунију дефиницију термина бујица "Бујица - снажан, краткотрајан, блатнокамени или

блатни поток који тече под утицајем силе теже у отвореном кориту, са различитом (до 70% запремине укупне масе) количином чврстих материјала различитих фракција, и који настаје као резултат интензивних плъускова, наглог топлъења снега, обрушавања превлажених земљишних маса, провале моренских језера и језера формираних одроном, глечерских шупљина и других водних капацитета или сеизмичког деловања, под условом да у ерозионим усецима, на падинама и у коритима мреже талвега (линије тачака дуж корита водотока) у сливу постоје растресите стене које лако подлежу ерозији, или нагомилавању великих количина продуката еолске ерозије, при постојању нагиба падина и корита довољних за струјање бујичне масе одређене висине и концентрације".

- Бујица је водени ток чије су поплаве изненадне и нагле, падови превелики и неједнаки, а који најчешће преноси материјал отргнут из планинских страна или отиснут са њихових гребена и таложи у равницама када се воде почну разливати (Тјери, 1960)
- Валовити потоци - кратки, врло великог пада, праве бујице при поводњима и они тада развијају знатну транспортну снагу (Цвијић, 1960);
- Бујице су валовити потоци на којима се најасније може пратити развитак речног корита (Едм. де Мартон, 1960);
- Бујице су појава у којој је откидање и кретање масе због своје нестабилности удружено са ерозијом...После јаких и бујних киша које расквасе дробину, настаје одваљивање и срозавање обала, потпомогнуто и појачано поткопавањем (ерозијом) бокова, и долином потече читава река од каше, састављене од воде, земље, песка, комада и читавих блокова стена, а у пошумљеном земљишту и од комада и читавих стабала дрвета. Сав овај лом иде неодрживом снагом низ долину и зауставља се тек на врло благим нагибима (Луковић, 1960);
- Бујица је брзи ток воде која нередовно тече и набуја после великих киша (Бакотић, 1960);
- Бујични токови су јаруге, суводолине, потоци и речице којима вода стално или повремено тече. Њихова сливна подручја су захваћена процесима ерозије земљишта, а њихове поплавне воде се јављају нагло, после јаких киша или када се снег брзо топи и одликују се великом разорном снагом и великим количинама наноса (Гавриловић, 1966);
- Бујица је водоток, врло неправилан и брз, способан да продукује бујичне лаве или бујичне поплаве, у чији састав улази исто тако, па чак и више чврстог материјала (блата, песка, шљунка, отпадака стена, чак и крупнијих стеновитих блокова) него воде, захваљујући чему се знатно смањује брзина кретања бујичне масе, вишеструко повећава протицајни течни квантум и нагло расте брзина водостаја (Јанковић 1972);
- Бујица је водени ток чији су нагиби слива и корита велики, поплаве изненадне и нагле, а који преноси нанос отргнут са падина и таложи га у равницама (Тијери 1975);

- Бујице су природни токови са поплавним водама које носе велике количине наноса (Соколовски, према Лазаревић, 1975);
- Бујице су крајњи и видни одраз већ развијених ерозионих процеса (Рајнер, према Лазаревић, 1975);
- Под бујичним током подразумевамо двофазни ток, ток састављен од течне и чврсте фазе, нагле појаве снажног и краткотрајног деловања, водо-каменог, блатно каменог или блатног карактера, који тече под дејством силе теже у отвореном кориту са великим (до 60% запремине опште масе) садржајем тврдих материјала различитог састава и крупноће, а који настаје као последица интензивних киша; снажног топљења снега; рушењем језерских и моренских наслага; сеизмичког деловања, у условима постојања лако подривних или растреситих маса на падинама или у кориту речне мреже, басена или услед покретања велике количине сакупљених продуката ерозије, при таквом нагибу корита и падина који је довољан за течење бујичне масе, одређене висине и концентрације (Јевтић, 1978);
- Бујица је поплавна вода настала од јаких киша или наглог топљења снега, која се јавља нагло и одликује се великим количинама наноса (Коновалов, 1972);
- Бујица је она природна појава при којој се створи покретни кашасти млаз (ток) растворене земље и друге дробине и спусти неком удољницом из висија у ниже положаје (Росић, 1960);
- Бујица је карактеристика режима сталних и повремених водотока различитих димензија, које се манифестује у честој, наглој и изузетно великој концентрацији воде и наноса, после чега је корито суво или се брзо успоставља предходни проток (Лазаревић, 1967, 1971, 1975);
- Бујице су валовити потоци (Џвијић, према Лазаревић, 1975);
- Бујични ток представља геоморфолошко-хидрографску јединицу која има своје сливно подручје, своје корито и хидрографску мрежу и бујични режим протицања воде, без обзира на величину подручја (Гавриловић, 1972);
- Бујице су брзи токови велике рушилачке снаге, који се састоје из смесе воде и стена различите крупноће; оне се појављују у сливовима мањих планинских река под утицајем интензивних падавина или наглог отапања снежног покривача, као и наглог пражњења глацијалних језера при провлама морена (Дукић, 1982).
- Бујице су повремени или сезонски водотокови који се активирају интензивним падавинама у ерозивним сливовима (ФАО, 1990).
- Бујичне поплаве представљају повремене, али изузетно снажне поплаве које се јављају у сливовима са стрмим тереном и високим ерозивним потенцијалом. Ове поплаве карактеришу велике брзине тока и обиман транспорт наносног материјала (ЕУ Директиве 2000/60/ЕЦ естаблишмент а фрејмворк фор тхе Цоммунити актион ин тхе фиелд оф ватер полицу).
- Хидролошки процес са наглим порастом протока воде и наноса, који укључује снажну ерозију, транспорт и таложење материјала. Бујице често имају катастрофалне последице по људе, инфраструктуру и животну средину, нарочито у

сливовима са високим ерозивним потенцијалом (Интернатионал Асоциатион фор Енџинееринг Геологу анд тхе Енвиронмент, 2020).

Узроци настанка бујичних поплава могу бити значајно различити у зависности од региона и специфичних локалних услова. Међутим, генерално је прихваћено да су најчешћи узроци повезани са интензивним кишама и пљусковима, а остали фактори укључују топљење снега, провале природних баријера попут глечерских језера, као и људске активности које доприносе убрзаном отицању. Главни узроци настанка бујичних поплава и бујичних токова су:

1. **Кише и пљускови** су доминантни узрок бујичних поплава, одговорни за преко 90% свих догађаја у неким студијама. Интензивне кише доводе до наглог повећања отицања воде и мобилизације седимената у бујичним сливовима.
2. **Отапање снега** доприноси отицању у подручјима са високим снежним падавинама, посебно у пролећном периоду. Процес се може појачати наглим порастом температуре или кишом на снежним покривачима, што доводи до значајног дела поплава у северним и планинским регионима.
3. **Провале глечерских акумулација** (познате као ГЛОФ - Glacial Lake Outburst Floods), иако мање чести, имају велики разоран потенцијал. Ови догађаји настају када се лед или седиментна брана глечерског језера изненада уруши, испуштајући велике количине воде низводно.
4. **Провале привремених преграда** изазване одронима, лавинама или блокадама токова такође узрокују мањи проценат бујичних поплава, али могу имати озбиљне локалне последице.

Уопштено, процене из различитих студија показују да бујичне поплаве узроковане падавинама и топљењем снега чине око 95% свих догађаја, док провале глечерских акумулација и привремених преграда чине преосталих 5%. Ови проценти могу варирати у зависности од специфичних географских и климатских услова и зато појаву бујице у целини треба разматрати као сложен, вишефакторни, случајни, динамички процес.

5.1. Класификација бујичне ерозије

Бујична ерозија представља екстремне ерозионе процесе у сливу који доводе до формирања бујичних токова. **Бујична корита одликују се великим варијацијама у нагибу дуж свог тока, са наглим прелазима између стрмих и блажих деоница. Ова корита су подложна изненадним и великим осцилацијама у количини и брзини протока воде.** Појава бујичног тока у сливу представља основни облик ерозије који доводи до развоја бујичних процеса, а такав слив назива се бујични слив. У ширем смислу, под бујичном ерозијом подразумева се стање у сливу које погодује формирању бујичних водотока.

У ужем смислу, бујична ерозија означава ерозију коју бујични ток ствара у свом кориту. Ова ерозија је узрокована силовитим током воде и огромном количином наноса коју бујица транспортује. На тај начин можемо издвојити два аспекта бујичне ерозије:

бујичну ерозију у сливу као резултат најтежих ерозионих процеса и **бујичну ерозију у самом кориту**, која је резултат динамике бујичног тока.

Ова два облика ерозије су међусобно повезани узрочно-последичном везом и чине јединствену целину. Такав слив назива се бујични слив, док се сам ток назива бујични ток или бујица.

Ерозивни процеси у сливним подручјима природних водотокова постепено нарушавају водни режим. Последица ових процеса је смањење количина такозваних малих и средњих корисних вода, уз истовремено повећање великих и штетних поплавних вода.

Стање ерозије у сливном подручју природних водотокова може се делимично квантитативно оценити односом између корисних (малих и средњих) и штетних (поплавних) вода. У сливовима без ерозивних процеса, мале и средње корисне воде су доминантне, док су поплавне воде мањег обима.

За **мале** сливове, однос је око **1:4:20** (мале : средње : велике воде).

За **велике** сливове, однос је око **1:3:6**.

Када се овај однос значајно поремети у корист великих вода, то указује на присуство убрзаних ерозивних процеса у сливу. Већина речних сливова у Србији су под утицајем неповољног режима ерозије, што резултира честим катастрофалним поплавама (табела 11). Ове поплаве не само да носе велике количине воде, већ и огромне количине ерозивног наноса. То изазива додатне штете по привреду, индустрију, инфраструктуру и становништво.

Табела 11. Процена бујичности неких српских река

Река	Површина слива (km ²)	Q _m : Q _s : Q _v
Сава	95.551	1:4,7:75
Дрина	19.570	1:7,5:85
Јужна Морава	15.489	1:6,5:110
Тимок	4.630	1:13:96

Класификација бујичне ерозије у сливу може се вршити према различитим факторима, као што су врста ерозионих процеса, јачина ерозије, распрострањеност ерозионих феномена у сливу, као и просечна годишња запремина бујичног наноса. Овај приступ омогућава детаљно теренско истраживање и оцену стања ерозије у одређеном сливу. Подела бујичне ерозије према врсти ерозионих процеса обухвата следеће основне типове:

Спиринчачки тип – Овај тип ерозије карактеришу доминантни процеси регионалне површинске ерозије. То значи да се ерозија шири преко великих површина слива, претежно делујући на горње слојеве земљишта. Овакав процес се обично јавља у подручјима са благим нагибом и са великим падавинама које могу изазвати повремене поплаве и ерозивне таласе.

Подривачки тип – Овај тип ерозије карактеришу дубински процеси ерозије који делују на дубље слојеве земљишта и корита водотокова. Подривачка ерозија често настаје у регионима са стрмим падинама где бујични токови еродирају дно и бочне стране корита, чиме доводе до ерозије темеља. Овај процес обично има велики утицај на стабилност земљишта и водотокова.

Мешовити тип – Овај тип ерозије обухвата комбинацију површинских и дубинских ерозионих процеса који се манифестују у широком спектру простора слива. Услови за овакав тип ерозије обично постоје у регионима са различитим географским карактеристикама, попут комбинације стрмих падина и равнијих подручја. Овакви процеси могу изазвати брзу деградацију земљишта и повећање ризика од поплава.

Карстни тип – Овај тип ерозије доминантно је везан за карстне процесе ерозије, где вода делује на растворљиве стене као што су кречњаци. Карстне бујичне поплаве су специфичне по томе што вода ствара подземне токове и ерозивне јаме, што може довести до изненадних поплава које имају велики утицај на околину.

Ова детаљна класификација помаже у разумевању специфичних узрока и последица бујичне ерозије, што омогућава ефикасније планирање мера заштите, управљања водним ресурсима и очувања земљишта у сливу.

Класификација бујичне ерозије у водотоку и процена њиховог развоја и постојања може се вршити различитим методама. Један од приступа је употреба аналитичких израза за утврђивање приближних граница између обичних и бујичних водотока, што омогућава идентификацију присуства бујичних токова. Овај поступак је посебно важан у контексту планирања антиерозионих мера, јер тачно утврђивање врсте и интензитета бујичне ерозије омогућава усмеравање ресурса на критична подручја.

Познате класификације бујичних токова могу се поделити у четири основне групе:

Према типу и развијености хидрографске мреже: Бујични токови могу се класификовати према различитим облицима хидрографске мреже, као што су бујичне реке, потоци, вододерине (уске долине са стрмим падинама) и јаруге (мање ерозијске депресије). Свака од ових врста има специфичан карактер у погледу динамике токова и ерозионих процеса.

Према врсти ерозионих процеса: Бујична ерозија се може поделити на неколико типова према доминантним ерозионим процесима. Ови процеси могу бити површински (спирњак) или дубински (подривачи), а често се јавља и комбинација оба, што чини мешовите типове ерозије. Разумевање ових процеса помаже у тачнијем дефинисању узрока бујичних поплава.

Према типу наноса: Бујични токови разликују се и по врсти наноса које транспортују. Неки од најчешћих типова су блатни, блатно-камени и камени нанос. Свака врста наноса има специфичне карактеристике у погледу транспорта, распореда и

ефеката на околину, чинећи ово важним критеријумом за предвиђање потенцијалних оштећења.

Према јачини и распрострањености ерозије: Овај приступ користи квантитативну анализу која се темељи на просечној годишњој запремини бујичног наноса. Такође се процењује распрострањеност ерозионих процеса у сливу и кориту, што омогућава детаљно мапирање подручја која су највише угрожена ерозијом и потенцијалним поплавама.

Овај свеобухватан приступ класификацији бујичних токова омогућава ефикасно планирање заштите земљишта, спречавање ерозије и смањење ризика од поплава.

За класификацију бујичних сливова постоји међународна потреба те је радна група за бујичне токове ерозију и лавине ФАО организације радила на овом проблему. ФАО (Организација за храну и пољопривреду Уједињених нација) користи различите приступе за класификацију сливова и речних система, укључујући бујичне сливове. Ови приступи обухватају анализу хидрографских карактеристика, ерозионих процеса, и утицаја људских активности на сливове. Кључни елементи укључују:

Тип хидрографске мреже: Класификација се базира на величини и облику речне мреже у сливу, као и на нивоу интеракције између главног тока и његових притока.

Интензитет и обим ерозионих процеса: Процена степена деградације земљишта и доприноса седимента који потиче из бујичних процеса. Ово је посебно корисно за планирање заштитних мера попут пошумљавања или изградње брана.

Еколошка динамика слива: ФАО се фокусира на разумевање интеракција између земљишта, вегетације, и воде, укључујући сезонске промене у протоку и биолошкој активности унутар сливног подручја.

Примена ових приступа помаже у доношењу одлука о заштити и управљању сливовима како би се смањили ефекти бујичних токова, као што су ерозија и поплаве, те обезбедио одрживи развој пољопривреде и очување екосистема.

ФАО је предложио формулу за процену бујичности слива која се односи на могућност и вероватноћу формирања бујичних токова у одређеном сливу. Формула се користи за квантитативну анализу хидролошких и геоморфолошких карактеристика бујичних сливова. Основни параметри који се обично користе у оваквим формулама су: Падавине (интензитет и укупна количина); Степен нагиба терена; Коефицијент водопропустљивости земљишта; вегетациони покривач. Једна од формула која се често наводи у литератури повезана са ФАО-овим приступом гласи:

$$T = \frac{P \cdot S}{K \cdot V}$$

T – Индекс бујичности: Вредност која указује на ризик формирања бујичних токова. Већа вредност означава већи ризик.

P – Падавине: Утичу на количину воде која доспева у слив. Интензивне падавине доводе до већег ризика.

S – Степен нагиба: Стрмија подручја имају већу вероватноћу формирања бујица због бржег отицања.

K – Водопропустљивост: Земљишта с мањом водопропустљивошћу (нпр. глиновита) доприносе бржем настанку површинског отицања.

V – Вегетациони покривач: Густа вегетација смањује ризик, јер успорава воду и повећава инфилтрацију.

Формула је погодна за упоредну анализу различитих сливова и за идентификацију приоритетних подручја за спровођење мера заштите, као што су пошумљавање, изградња акумулација или регулација корита. ФАО је ову формулу предложио као део алата за интегрисано управљање водним ресурсима и заштиту од ерозије.

Граничне вредности индекса бујичности (**T**) варирају у зависности од метода анализе, локалних услова, и конкретних студија које се користе за процену. Међутим, према општим хидролошким и ерозивним моделима, могу се дефинисати приближне категорије:

$T < 1$: Низак ризик од бујичних токова. Ово указује на стабилан слив са добром регулацијом отицања, често због густог вегетационог покривача и ниског нагиба терена.

$1 \leq T < 5$: Умерен ризик. Овакви сливови могу показивати почетне знаке деградације, нарочито ако дође до повећаних падавина или смањења вегетационог покривача.

$T \geq 5$: Висок ризик. Ови сливови су изразито осетљиви на бујичне токове, често због високог нагиба, слабог водопропустљивог земљишта, и недостатка вегетације. Овај ризик се драматично повећава током интензивних падавина.

Фактори који утичу на граничне вредности су: **Климатске зоне** - У сушним и полусушним регионима, чак и нижи индекс бујичности може бити индикативан за високе ризике због мале инфилтрације и ретке вегетације. **Тип земљишта** - Земљишта са високом процентом глиненних минерала или већом ерозивношћу могу генерисати високе вредности **T** чак и при умереним нагибима. **Антропогене активности** - Дефорестација, урбанизација или лоше пољопривредне праксе могу повећати вредност индекса у кратком временском периоду.

5.2. Системи уређења бујичних токова

Уређење бујичних токова, по својој суштини, обухвата скуп заштитних мера и метода које се примењују ради регулисања површинског отицања воде у сливу, заштите земљишта од спирања на падинама, успостављања и повећања плодности ерозионих земљишта, као и њиховог рационалнијег коришћења. Циљ ових активности је отклањање узрока који доводе до ерозије на падинама слива, спречавање дубинске

ерозије, смањење транспорта наноса, и заштита од бујичних поплава у хидрографској мрежи водотока. Све ове активности заједно дефинишу се као **уређење бујичних сливова**.

Пројектовању антиерозионих радова у сливу могуће је приступити након рекогносцирања терена, детаљне анализе хидрографске мреже подручја, рељефа, геолошко-топографских услова, вегетационог покривача, режима падавина и отицања са слива. Ове активности су неопходне јер ерозија земљишта не само да смањује плодност и продуктивност земљишта већ доприноси и деградацији хидрографске мреже, повећању седиментације у акумулацијама, угрожавању инфраструктуре и повећаном ризику од бујичних поплава.

Против ерозије земљишта и бујичних поплава користе се различити системи – комбинација **противерозионих мера и радова** прилагођених специфичностима ерозионог подручја. Ове мере и радови се могу поделити у неколико категорија, при чему је свака важна за очување природних ресурса и унапређење квалитета живота локалног становништва.

Противерозионе мере обухватају свеобухватне активности, од техничких и биолошких интервенција до едукативних и економских приступа, које су усмерене на смањење ерозије земљишта, контролу отицања воде и очување природних ресурса кроз рационално коришћење територије и активну сарадњу заједнице. Ове мере су:

Грађевинско-техничке мере које подразумевају изградњу: **акумулација и ретензија** - Акумулације помажу у прикупљању воде која би иначе еродирала земљиште, док ретензије смањују брзину и енергију бујичних токова. Ови објекти омогућавају контролисано отицање воде, смањујући опасност од поплава; **Консолидационих појасева и канала** - Формирањем консолидационих појасева и канала усмерава се отицање воде, чиме се смањује ерозивна снага воде на падинама и дну долина.

Ретенционо-техничке мере подразумевају изградњу: **Малих акумулације и преграде** - Ове структуре имају улогу да привремено задрже воду и седименте, чиме се смањује оптерећење на главне водотокове и повећава инфилтрација воде у земљиште; **Ретардационих канала** - Канали се пројектују тако да успоравају ток воде, омогућавајући таложње честица и смањење ерозије дуж токова.

Шумско-техничке активности које се састоје од: **Примене биљног материјала** - Вегетација има значајну улогу у примени објеката од природног материјала, као што су плетери, фашине, биоматови или друга врста објеката која се прави од приручног биљног материјала. **Пошумљавање** - Садња дрвећа на деградираним подручјима значајно смањује ерозију, повећава апсорпцију воде и побољшава микроклиматске услове. Коренов систем биљака учвршћује земљиште, док крошње смањују удар кишних капи. **Формирања контурних ровова** - Ове технике омогућавају контролисано усмеравање воде и задржавање земљишта на стрмим падинама.

Агро-техничке мере обухватају примену мелиорационих активности у најширем смислу, а све у циљу побољшања квалитета земљишта и спречавања деградације земљишта и омогућавајући његову одрживу употребу. Ове мере се подразумевају: **контурно орање** - орање по изохипсама, **сетву у појасевима** („strip cropping“) подела земљишта на наизменичне траке са различитим усевима (нпр. трака са кукурузом између трака са травом), **малчирање** – покривање земљишта жетвеним остацима или другим органским материјалима како би се спречило испаравање воде, смањено удар кише и успорило површинско отицање, **избегавање прекомерне испаше** које спречава прекомерно збијање и уништавање травнатог покривача, што доприноси очувању структуре земљишта.

Економско-газдинске мере које укључују планирање, организацију и уређење коришћења територије, начин коришћења шума, ливада и ловишта што доприноси оптималном искоришћавању природних ресурса уз њихово очување квалитета и квантитета. Неке од мера које се користе су: расподела земљишта по категоријама, планирање одрживих система коришћења, рационално газдовање шумама (контролисана сеча и подмлађивање шума), коришћење пашњака и спречавање прекомерне испаше, развој алтернативних привредних активности у оквиру туризма, ловства и пчеларства, економско вредновање заштите земљишта (кроз примену субвенција, подстицаја и подршке), организација ловишта и шумских подручја, интеграција агрошумарства, као и образовање локалног становништва и увођење одрживих пракси.

Просветно-васпитне мере су усмерене на подизање свести, едукацију и мотивисање појединаца, заједница и институција да активно учествују у заштити земљишта од ерозије. Ове мере комбинују просветне активности и организационе приступе како би се обезбедила дугорочна одрживост природних ресурса. Њихов успех зависи од укључивања свих друштвених структура, од појединаца до институција, и њиховог активног ангажовања у борби против ерозије.

Противерозиони радови подразумевају:

Очување земљишта које има за циљ очување текстуре, структуре и плодности земљишта, чиме се спречава деградација и омогућава одрживо коришћење ресурса за пољопривреду и друге сврхе. Мере очувања доприносе смањењу ерозије на микро и макро нивоу, посебно у подручјима са интензивном пољопривредом.

Оплемењивање воде које подразумева да се врше анализе временске и просторне расподеле воде, и да се бујичне воде се прихватају и складиште у одговарајућим структурама. Ове воде се касније могу користити током безводних периода, чиме се повећава ефикасност управљања водним ресурсима.

Организација одбране од поплава обухвата техничке мере које се спроводе у сарадњи са стручним службама, попут Центра за ванредне ситуације, како би се осигурало благовремено и ефикасно деловање у случају високих вода.

Развој локалних активности укључује унапређење сточарства, ловства и туризма доприносећи социо-економском развоју заједнице, чиме се смањује притисак на природне ресурсе и повећава одрживост подручја.

Ширење свести и едукација обухватају примену иновација у газдовању водним и земљишним ресурсима тако да омогућавају боље разумевање потреба за заштитом и управљањем природним ресурсима, уједно мотивишући кроз едукацију локално становништво да активно учествује у заштити околине.

Примена холистичког приступа осигурава ефикасно управљање сливним подручјем, очување бодиверзитета и смањење негативних утицаја ерозионих процеса. С обзиром на комплексност процеса уређења бујичних сливова захтева интердисциплинарни приступ, који укључује различите привредне делатности – хидротехнику, шумарство, пољопривреду и друге секторе – у склопу општих друштвених и економских смерница развоја одређеног краја или области. Решења треба прилагодити локалним условима и потребама становништва које живи у ерозионим подручјима, уз решавање кључних привредних проблема попут заштите инфраструктуре, повећања пољопривредне производње и очувања природних ресурса.-

У складу с различитим природним, друштвеним и технолошким условима, развијени су специфични системи за уређење бујичних сливова и борбу против ерозије земљишта, који се базирају на комбинацији техничких и биолошких мера. У оквиру борбе против ерозије земљишта и уређења бујичних сливова развијени су следећи системи:

1. Класични европски систем,
2. Француски систем,
3. Немачки систем,
4. Совјетски систем (систем организације територије),
5. Италијански систем (систем брдских бонификација),
6. Амерички систем (систем интегралних мелиорација),
7. Систем уређења бујица професора Сретена Росића и
8. Ретардациони систем уређења.

5.2.1. Класичан европски систем

Овај систем примењује се од давнина, а нова археолошка ископавања доказују да су га примењивали мада не у сасвим потпуном облику чак и Грци, Римљани и Персијанци. Систем се састоји у подизању одговарајућих попречних грађевина обично преграда од камена у кориту бујичног тока и по јаругама. Поред тога подиже се и заштитни вегетациони покривач на свим деловима бујичног слива и ерозионог подручја где је наступила јака ерозија и где није погодно за пољопривредну обраду земљишта. На осталим деловима брског земљишта у бујичном сливу или ерозионом подручју уколико није било под шумом или пашњацима голетима или камењарима вршена је

обично терасаста обрада земљишта, подизани су воћњаци или сличне вишегодишње пољопривредне културе или су засниване шуме.

Систем је усавршен у другој половини 19. и почетком 20. века радом многих европских стручњака научника и практичара за потпуну афирмацију радова за борбу са дубинским процесима ерозије и задржавање наноса у кориту бујичних токова изграђена је теорија о паду изједначења и његовој идеалној вредности која је познат под називом пад равнотеже, нормалан пад, пројектовани пад или пад изједначења.

Пад изједначења представља нагиб корита бујичног тока при којем бујична вода, у односу на састав обала и дна корита, не изазива значајније промене у њиховој структури. Овај пад није стална величина; он се мења у зависности од мутноће бујичне воде и отпорности дна и обала корита.

Опажањима је утврђено да је основни облик линије пада изједначења параболоидна крива. Њен параметар, тангенс угла нагиба, расте од ушћа према изворишту, што је повезано са повећањем бујичне воде на тој деоници. Остваривање правилне линије пада изједначења у коритима бујичних токова није могуће за дужи временски период, чак ни на релативно кратким деоницама бујичног корита. Идеалан пад изједначења, односно нагиб при којем на целој дужини бујичног тока не би било ерозије дна и обала корита нити би вода носила нанос, назива се нормалан пад. То је идеализована математичка величина која се, према теорији, за сваку величину бујичног наноса може израчунати применом одређеног обрасца који је предложио Тијери.

$$I_{izj} = \frac{(d - y) \cdot f \cdot b}{0,03 \cdot y \cdot K^2 \cdot C^2 \cdot R}$$

Где су:

d – запреминска тежина бујичних наноса у kg/m^3 ,

y – запреминска тежина бујичне воде у kg/m^3 ,

f – коефицијент трења,

b – најдужа димнезија комада наноса за који се рачуна пад изједначења у m ,

C – коефицијент брзине по обрасцу Шезија,

R – хидраулички радијус у m ,

K – коефицијент бујичности воде, који се рачуна према следећем обрасцу:

$$K = \frac{1}{1 + n \cdot (y - 1)}$$

Где су:

y – запреминска тежина бујичне воде у kg/m^3 ,

n – запремински однос бујичног наноса и исталоженог наноса у јединици бујичне воде у току 24 часа.

Италијански истраживач Валентини утврдио је на основу 74 бујична водотока, да се приближни пад изједначења може израчунати на основу примене обрасца:

$$I_{izj} = 0,093 \cdot \frac{b}{R}$$

Где су:

b – најдужа димнезија комада наноса за који се рачуна пад изједначења у m ,

R – хидраулички радијус у m , за профил за који се рачуна пад изједначења.

Још један научник је предложио емпиријски образац за израчунавање пада изједначења према коме се рачуна.

$$I_{izj} = \frac{16 \cdot b}{K^2 \cdot C^2 \cdot R}$$

Где су:

b – најдужа димнезија комада наноса за који се рачуна пад изједначења у m ,

C , R и K – исте димензије као и у претходном обрасцу према Тијерију.

Одређивање пада изједначења представља главну карактеристику класичног европског система за борбу против ерозије бујичних токова, посебно при изградњи попречних грађевина у бујичном кориту. Након што се пад изједначења израчуна или усвоји за одређене деонице бујичног корита, приступа се пројектовању попречних објеката у бујичном кориту. У том процесу одређују се укупан број попречних објеката и њихова корисна висина које је потребно изградити за сваку појединачну деоницу бујичног корита.

Укупна корисна висина објеката у бујичном кориту добија се из обрасца:

$$H_{uk} = L \cdot (I_0 - I_{izj})$$

Где су:

H_{uk} – Укупна корисна висина пројектованих попречних објеката,

L – Дужина деонице бујичног корита за коју се врши уређење бујичног корита,

I_0 – Просечан природни пад на одређеној деоници,

I_{izj} – Пад изједначења.

Попречни објекти се код класичног европског система уређења бујичних токова граде од нижих делова корита бујичног тока и постепено напредују ка узводним

деловима. На тај начин се чини најмања штета због промене режима протицања и наноса.

У пракси се пад изједначења одређује за поједине деонице. Одређена истраживања бавила су се утврђивањем идеалног пада изједначења, иако је постизање такве вредности могуће само у случају када је нанос у бујичном кориту истих димензија.

Недостатак у одређивању пада изједначења је што се он утврђује за природно корито, док се режим отицања у кориту мења изградњом објеката. Због тога је често неопходно подизати секундарне објекте. У супротном, долази до подлокавања темеља попречних грађевина и њиховог рушења.

Класичан европски систем даје одличне резултате након добро пројектованих и изведених објеката у кориту, као и правилно спроведених биолошких радова у сливу. Бујичне поплаве се у тим случајевима изостављају, а количина наноса се значајно смањује. Међутим, важно је нагласити да је овај систем прилично скуп, што у савременим условима може имати пресудан утицај приликом избора система.

5.2.2. Француски систем

Француски систем уређења бујичних токова заснива се на истраживањима П. Демонцеа и разликује се од класичног европског система како по приступу регулисању корита, тако и по примени пратећих мера. Уместо пада изједначења, у француском систему примењује се **пад пројектовања**, који за сваку деоницу бујичног корита износи од трећине до половине природног пада. Овај приступ омогућава изградњу ниских преградних објеката као што су камени прагови, плетери, камени сандуци и слично. Попречни профили ових објеката и њихови преливи често имају благо конкавне облике, што доприноси ефикаснијем усмеравању и успоравању тока воде.

Једна од главних предности овог система је релативно брзо и једноставно грађење ниских преградних објеката, као и њихово лако одржавање. Ови објекти су углавном **типизирани**, што омогућава њихову брзу обнову у случају рушења услед бујичних поплава, уз минималне трошкове. Често се граде од локално доступних материјала, попут камена и дрвета, или њихових комбинација (нпр. двоструки плетери).

Регулација бујичних корита по француском систему обично почиње изградњом попречних објеката без корисне висине, познатих као **консолидациони појасеви**. Ови појасеви се постављају на најнизводнијим деоницама како би се омогућило прилагођавање пројектованих решења локалним условима терена. Радови се изводе истовремено на више различитих деоница, с тим што се најпре изграђују најниже лежећи објекти у кориту, након чега се напредује узводно, у складу са техничким могућностима и расположивим финансијским средствима.

Попречни објекти по овом систему обично имају **висину од 1 до 2 метра**, а ретко прелазе максималну висину од 3 до 4 метра. Посебна пажња посвећује се стабилизацији **одрона и клизишта**, где се примењују специјални системи за одводњавање.

Поред техничких мера, француски систем укључује и **биолошко-техничке мере**, као што су пошумљавање, затрављивање и примена различитих шумско-пољопривредних мелиорација. Ове мере имају за циљ стабилизацију бујичних токова, побољшање квалитета земљишта и смањење ризика од ерозије и наноса.

Француски систем је познат по **прилагодљивости и економичности**, јер објекти мањих димензија не захтевају сложене статичко-динамичке прорачуне. У случају рушења, штете су минималне, а објекти се могу брзо обновити. Комбинација ниских преградних објеката, пратећих канала и кинета са каскадама, уз биолошко-техничке мере, чини овај систем ефикасним за управљање бујичним поплавама и смањење ерозивних процеса.

5.2.3. Немачки систем

Немачки систем уређења бујичних токова произашао је из класичног европског система, али се од њега разликује по примени релативно високих попречних објеката. Изградњом ових објеката постиже се уравнотежен пад корита и задржава значајна количина наноса, што представља главну разлику у односу на француски систем.

Пројектовање радова по овом систему захтева прецизно одређивање локација за изградњу преграда, јер њихова висина може изазвати подлокавање низводних делова корита. Ово подлокавање често доводи до потребе за изградњом секундарних објеката, попут прагова, како би се стабилизовало корито. У случају рушења примарних великих објеката могу настати значајне штете, што захтева спровођење опсежних превентивних мера. Још један недостатак овог система је његова крута примена у вези са падом изједначења, што ограничава флексибилност пројектовања.

У сливу се истовремено спроводе и биолошке и техничке мере. Оне укључују пошумљавање деградираних површина, уређење шумског и пољопривредног земљишта које је изгубило плодност, затрављивање косина, усека и насипа, као и спречавање браздасте и јаружасте ерозије, уз ублажавање других облика ерозивних процеса.

Немачки систем је успешно примењен у Аустрији, Немачкој, Швајцарској, северној Италији и Словенији. Примарни објекти се граде од квалитетних материјала, попут бетона и камена, што обезбеђује њихову дуготрајност. Секундарни објекти, с друге стране, често се граде од расположивих, једноставних материјала, као што су балвани, плетери и рустикални елементи, што омогућава њихову брзу обнову у случају оштећења.

5.2.4. Совјетски систем

Совјетски систем уређења бујичних токова се често назива и **систем организације територије**. Овај систем се заснива на начелу да ерозија и борба против ње нису искључиво привредно-технички проблеми, већ комплекс социјално-економских

и друштвено-васпитних питања дубоко повезаних са сваком ерозионом територијом и људима који на њој живе.

Суштина борбе против ерозије у овом систему огледа се у примени система мера који обухватају агротехничке, шумско-мелиоративне, хидротехничке, привредно-организационе и васпитно-образовне активности. Основни принцип антирезионе организације територије јесте да се сва земљишта у бујичном сливу користе у привредне сврхе, уз извођење радова који омогућавају ефикасну борбу против бујичних поплава и ерозије, чиме се обезбеђује одрживо коришћење таквих земљишта.

Антирезионом организацијом територије слив се дели на три основне зоне:

Хидрографска зона – обухвата део слива уз корито са нагибом падина већим од 15% и подручја угрожена дубинским ерозивним процесима, укључујући и само корито. У овој зони изводи се изградња објеката од расположивих материјала, а све чешће и од префабрикованих елемената*.

* **Префабриковани елементи** су делови конструкције који се производе унапред, обично у фабрици или на другом месту ван градилишта, а затим се транспортују на локацију где се монтирају у финалну структуру. Они могу бити израђени од различитих материјала, као што су бетон, челик, дрво или пластика, и обично су дизајнирани тако да олакшају и убрзају изградњу објеката.

Током 20. века интензивно се радило на развоју специфичних префабрикованих, монтажних елемената за брзу и лаку изградњу, чак и високих преграда филтрирајућег типа. Ови елементи, израђени од армираног бетона, обично су имали облик троуглова, квадрата, трапеза и других геометријских тела, са шупљинама у унутрашњости. После монтаже, шупљине су се делимично, а временом и у потпуности, испуњавале бујичним наносом. Највећа предност ових објеката остварује се у бујичним токовима где нанос садржи мало глинених материјала, што им омогућава релативно дуг век трајања у смислу филтрирајућег деловања и задржавања наноса. Прве основе и идеје за такозване филтрирајуће попречне објекте дао је још 30-их година 20. века познати совјетски научник Михаил Срибниј, а 70-их година овакви објекти су грађени као решеткасте преграде или наносни уловљивачи по препорукама совјетског научника Хергеулидзеа које су приказане на сликама 7а и 7б



Слика 7 а и б. Решеткасте преграде Херхеулидзеа (фото: проф. Иван Блинков)

Дохидрографска зона – представља падине уз корито са нагибом мањим од 15% које показују знаке видљивих ерозивних процеса. У овој зони примењују се вишегодишње пољопривредне културе и засади.

Вододелничка зона – обухвата остале површине слива, које се углавном користе за пашњаке или ратарске културе.

Посебан значај у овом систему имају објекти од префабрикованих елемената, попут решеткастих преграда, познатих и као "уловљивачи наноса". Ови објекти доприносе смањењу ерозионих процеса и задржавању наноса у сливу.

Совјетски приступ борби против ерозије указује на значајан допринос ове науке и праксе у решавању проблема бујичних токова и ерозије. Описани приступ укључује техничке мере, као и одрживе социјално-економске и образовне активности, са циљем унапређења услова живота у ерозивним подручјима и очувања природних ресурса.

5.2.5. Италијански систем

Италијански систем уређења бујичних токова или систем брдских бонификација полази од тога да је правилна организација сточарства уједно и најрентабилније искоришћавање ерозионих подручја. Смтра се да је номадски начин сточарства у Италији допринео уништењу последњих остатака шума и интензивирању ерозионих процеса, што је довело до претварања ливада у пашњаке и примене принципа „покоси траву па носи пред стоку“. У складу са тим, у Италији је предузет низ мера и формиран је низ институција са следећим задацима:

- створити научне подлоге и израдити привредне основе за излаз из заосталости ерозијом захваћених подручја,
- наћи техничка, економска и привредна решења за владајуће услове,
- омогућити финансирање локалних антиерозионих радова,
- формирати специјализоване стручне и управне организације за борбу са ерозијом.

У изради решења за уређење ерозионих подручја обавезно учествују екипе стручњака које се састоје од агронома, агротехничара, шумара, економиста и других. Предложена решења претварају бујичне сливове у специфична брдска газдинства — бонифике. Приходи од овако уређених подручја усмерени су на даљи развој борбе против ерозионих процеса.

5.2.6. Амерички систем

Амерички систем уређења бујичних токова или систем интегралних мелиорација и управљања ерозивним подручјима развио се као одговор на велике проблеме које су привредницима истовремено доносили ерозија, бујичне поплаве и суша. Ови проблеми довели су до преокрета у схватању потребе за свеобухватним

уређењем бујичних сливова и ерозивних подручја, где тимови стручњака разних специјалности заједно раде на њиховом решавању, уз координирано газдовање и одрживо коришћење природних ресурса.

У Америци је 1935. године, у оквиру националног закона о заштити земљишта од ерозије, истакнуто начело да је неопходно да се у циљу заштите земљишта од ерозије и сачувају природни извори воде, затим израде вештачке водне акумулације и да се кроз спровођење директних антиерозивних мера и радова паралелно води борба против ерозије поплава и суша.

Истовремено се инсистирало на томе да се све активности у борби против ерозије, поплава и суша, буде централизовано и усмеравамо из одређених стручних центара. Као резултат оваквих прописа и концепта, формиране су јаке службе и специјализована удружења за конзервацију земљишта и вода.

Проглашен је и принцип да земљишни фонд, који је у Америци био озбиљно угрожен ерозијом, мора бити спасен и сачуван за будућа поколења. У том контексту се посебно истиче да ниједна кап кише, која падне из облака на земљу, не сме отићи у океан пре него што буде искоришћена у привредне сврхе или за одмор и рекреацију.

Тако је створен концепт **интегралног уређења бујичног слива и ерозивног подручја**, чији је главни задатак примена комплетних мера за борбу против ерозије, управљање водама и спречавање поплава и суша. Систем је одмах почео са радом 1935. године, кроз пошумљавање јаруга и најшире мелиорације, решавајући и у то време актуелни проблем незапослености.

Интензивна примена овог система започета је 1950. године, изградњом акумулација за снабдевање водом, наводњавање, гајење риба, што је допринело повећању броја стоке, већим и стабилнијим приносима пољопривредних култура и укупном привредном напретку.

5.2.7. Систем проф. Сретена Росића

Систем уређења бујица проф. Сретена Росића развијен је након дугогодишњег истраживачког рада на процесима спирања земљишта и утицају јаких киша или наглог топљења снега, посебно на стриним брдским падинама. Проф. Росић предлаже изграђивање **хоризонталних ниских зидова** на угроженим падинама у правцу изохипси. Ови зидови би се радили од монтажних бетонских елемената, који би на својој узводној страни прихватили спрани материјал, чиме би се омогућила организација биљне производње.

Основни допринос овог система је што издавањем воде из бујичних наноса омогућава напредовање засипања у узводном правцу, до највиших делова бујичног тока. Осим тога, решавање проблема изградње специјалних објеката захтева да њихова примена буде примарна на местима где је потребно хитно заштитити различите објекте од бујичних наноса.

Поред тога, проф. Росић се бавио и одвајањем наноса из бујичне воде помоћу специјалних објеката као што су процедница, таложница и помоћних таложница.

Процедница представља специјалну врсту консолидионе преграде намењену заштити од притиска земљаних маса. У средини процеднице остају три отвора који су намењени прихватању вода из узводних затворених дренажних канала.

Таложница је процедница са уређајем за раздвајање бујичне воде од бујичног наноса. Разликују се таложнице са делимичном филтрацијом и таложнице са тоталном филтрацијом (**помоћна таложница**).

Улога ових објеката је да: заустављају вученог наноса, повећавају филтрацију воде из наноса и подземних вода, брзо евакуишу подповршинску прспелу воду и, приликом надоласка бујичне воде, евакуишу значајну количину површинског тока.

Ови објекти, према проф. Росићу, имају важну улогу у заштити земљишта и водних ресурса од ефеката ерозије, поплава и других природних непогода.

5.2.8. Ретардациони систем

Ретардациони систем уређења бујичних корита и ерозивних подручја користи преграде у бујичном кориту како би успорио концентрисано сливање бујичних поплавних вода кроз корито или низ падине. Овај систем има две основне врсте објеката: ретардационе канале и ретардационе преграде.

Ретардационе преграде су попречни масивни објекти у бујичном кориту са отворима, тзв. барбоканама, кроз које протичу делови бујичне воде. Остатак воде, са наносом, прелива се преко преходног дела - уста преграде. Овим се вода дели у неколико група са различитим брзинама отицања, што смањује количину бујичне воде низводно од преграде. Величина отвора барбокана мора бити таква да се не затрпа при првим надоласцима бујичне воде. Ретардациона преграда је попречни објекат који не утиче на смањење пада корита, што није случај са другим системима. Због повећане брзине воде, низводно од преграде потребно је поставити консолидационе појасеве. Најважнији део је тачан прорачун величине отвора који омогућава довољан проток воде и простор за депоновање бујичног наноса. Ретардационе преграде смањују проток воде на низводној деоници и, иако се не разликују значајно по изгледу од обичних преграда, имају два или три реда већих барбокана.

Ретардациони канали у сливу сакупљају значајну количину воде која отиче са површине и воде је до главног корита, чиме успоравају поплавни талас. На тај начин се избегава појава наглих пикова поплавних бујичних вода. Канал је обложен калдрмом или је формиран набијањем слоја земље. Трасирање канала је такво да два суседна канала имају супротан пад корита. С обзиром да мрежа ретардационих канала значајно смањује проток у главном кориту, број попречних објеката у бујичном кориту се значајно смањује. Повољан утицај канала повећавају засади шибља и ниског дрвећа на узводној страни. При димензионисању ретардационих канала важно је узети у обзир

брзину отицања воде од јаких киша низ падине, реалну количину воде коју канал може да прихвати, најпогодније време за ретардацију и најекономичније димензије канала.

Након приказаних система антиерозионих радова у бујичном сливу или кориту, може да се, у зависности од услова у сливу и кориту, доступних средстава и других фактора, изабере одговарајући систем који ће се применити за уређење подручја. На основу тих принципа, или њихових комбинација, биће спроведене мере уређења ерозионих подручја или сливова.

5.3. Пројектовање радова у бујичном кориту

Пројектовање радова у бујичном кориту захтева детаљну **анализу природних услова**, као што су клима, врсте падавина, геолошке карактеристике и висинска представа терена, како би се разумела динамика воде и наноса у посматраном подручју. Ово се пре свега односи на **одређивање максималног протицаја** бујичних токова. Први корак је **димензионисање преливних органа**, при чему је неопходно познавати проток бујичне воде и количину наноса како би се прецизно димензионисали и делови објеката попут барбокана и таложница. Затим се приступа **пројектовању трасе** регулисаног корита, где је потребно одредити његов правац и пад, како би се омогућио одговарајући проток воде. Следећи корак је **пројектовање објеката** у кориту, уз прецизно хидрауличко и статичко димензионисање. Локација објеката је посебно важна, јер треба обезбедити сигурност и ефикасност у случајевима екстремних поплава. Такође, потребно је пројектовати системе за контролу седиментације, као што су таложнице, како би се смањила количина наноса низводно. Контрола еколошких фактора је кључна за минимизацију утицаја на околину, а пројекат мора обухватити и дугорочно одржавање објеката, уз успостављање система за њихово праћење. Ови кораци омогућавају ефикасно пројектовање радова у бујичним коритима, са циљем смањења ризика од поплава, ерозије и других неповољних последица.

5.4. Одређивање максималних протицаја бујичних вода

Одређивање максималних протицаја бујичних вода је од изузетне важности не само у пројектовању антиерозивних радова у сливу, већ и у пројектовању путева, железница, мелиорационих радова, регулације водотока и других хидротехничких објеката. Грешке проузроковане нетачно одређеним или процењеним максималним протицајем могу довести до великих штета, укључујући и рушење објеката, што ову фазу пројектовања чини једном од најзначајнијих.

У теорији и пракси, уређење водотока је одувек било од суштинског значаја за одређивање протицаја воде, посебно великих вода. Ови подаци представљају основу за

утврђивање хидрауличких и статичких димензија објеката значајних за енергетику, саобраћај, индустрију, пловидбу, одбрану и друге привредне гране. Стога је у сваком пројекту уређења бујичних токова неопходно на прецизан начин одредити максимални протицај воде за одређену вероватноћу појаве, односно повратни период.

Максимални протицај воде је везан за вероватноћу појаве: што је већа вероватноћа појаве или дужи повратни период, то је већи максимални протицај. При одређивању ових вредности, мора се тачно знати за коју вероватноћу појаве се врши прорачун, јер поједини објекти захтевају различите протицаје воде у зависности од свог значаја и функције. На пример:

- Високе бране за акумулације различите намене димензионишу се за протицаје вероватноће $p=0,01\%$ (повратни период 10.000 година),
- Регулација река кроз градове димензионише се за протицаје вероватноће $p=0,1\%$ (повратни период 1.000 година),
- Бујичарске преграде се пројектују за протицаје вероватноће $p=1\%$ (повратни период 100 година),
- Регулација водотока кроз пољопривредне регионе обично се димензионише за протицаје који се јављају једном у 50 до 20 година односно вероватноћом $p=2\%$ и $p=5\%$, у зависности од економског значаја заштићеног подручја.

Категорија вероватноће појаве протицаја воде директно је повезана са економским значајем објекта који се штити грађевинама, мерама или радовима. С обзиром на потенцијалне ризике и трошкове, одређивање максималног протицаја представља један од најкритичнијих корака у пројектовању и извођењу хидротехничких радова.

За одређивање максималних протицаја на бујичним токовима користе се три групе метода:

- анализа измерених података,
- примена емпиријских формула,
- процена протицаја на основу трагова у бујичном кориту.

5.4.1. Анализа измерених података

Примена ове групе метода је у великом броју случајева отежана или чак немогућа, иако би резултати били најтачнији. Разлог за то је последица режима бујичног тока који карактерише мала количина воде или потпуно суво корито током већег дела године. После јаче кише или наглог топљења снега, водоток поприма бујични карактер, са израженим и краткотрајним вршним протицајима који односе све пред собом. Због тога је постављање водомерних летви и лимнографа веома отежано, јер бујични нанос брзо уништи хидрометријску опрему. Ови разлози, као и потреба за дуготрајним осматрањем, представљају главно ограничење за примену ове методе и углавном је искључују у одређивању максималних протицаја бујичних вода.

Максимална количина воде уопште зависи од величине и облика слива, интензитета падавина, коефицијента заштите од појаве велике воде, коефицијента отицања и висине бујичне кише. Значење овог проблема подстакло је рад великог броја аутора који су се бавили његовим разјашњавањем. Истраживања, како у почетку, тако и данас, често имају локални карактер, јер се проблем обично поједностављује, тако што се зависност појаве одређених количина воде своди на величину слива, различите интензитета падавина, дужину слива, као и на рељефне облике и квалитет вегетације у сливу.

Методе засноване на анализи измерених података и историјским догађајима, као што су статистичке и хидрауличке методе, користе податке из стварних осматрања водотока и климатских услова. **Статистичке методе** анализирају историјске податке о протицајима ради одређивања вероватноће појаве екстремних водених догађаја, као што је метода вероватноће која одређује протицај за одређени повратни период (нпр. 10, 50, 100 година) и метода кумулативне дистрибуције, као што су Gumbel-ова или Log-Pearson-ова дистрибуција. **Хидрауличке методе**, с друге стране, користе физичке принципе и примењују се када су доступни подаци о водотоцима, као што је примена Manning-ове једначине за процену протицаја у каналима и метода преливања воде преко прагова и брана за процену вршних протицаја у водотоковима с препрекама.

5.4.2. Примена емпиријских формула

Методе друге групе, које обухватају примену емпиријских образаца, користе статистичке формуле засноване на искуствима у регионалној или глобалној анализи података и познатим хидролошким принципима. Ови обрасци имају шире подручје примене, јер обухватају низ чинилаца који дефинишу стање слива и значајно утичу на формирање бујичне поплавне воде. Посебно су корисни у областима где недостају детаљни подаци о водотоцима.

Почетак оваквог начина рада везан је за **образец Костлин-а** настао средином XIX века, по коме је највећи очекиван протицај великих вода дат обрасцем:

$$Q_{\max} = K \cdot a \cdot \alpha \cdot F$$

Где су:

$Q_{\max}$ – највећи очекивани протицај великих вода m^3/s ,

K – коефицијент корелације једнак је 16,67,

a – интензитет кише mm/min ,

α – коефицијент отицања чија се вредност читава из табеле 12

F – површина слива km^2

Табела 12. Вредност коефицијента α према Костлин-у

Дужина слива (km)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вредност коефицијента отицања α	0,90	0,72	0,60	0,47	0,37	0,30	0,26	0,24	0,22	0,20

Образас Костлин-а је послужио многим ауторима као основа за формирање нових емпиријских образаца. Тако је често у нашој земљи коришћен **образац према Долгов-у**:

$$Q_{\max} = K \cdot a \cdot \alpha \cdot (1 + L) \cdot (1 - m) \cdot (1 + n) \cdot F$$

Где су:

$Q_{\max}$, K , a , α као и код Костлин-а,

L – коефицијент топографије и иде од 0,1 за равне до 1,0 за врло бреговите сливове,

m – коефицијент педолошких услова, за тешка глиновита земљишта $m=0$, а за растресита и јако песковита земљишта од 0,7 до 1,0,

n – коефицијент вегетације чије су вредности од 0,1 до 0,8.

Образац Кресник-а и данас се користи у пракси за мале сливовове испод 1 km², и гласи:

$$Q_{\max} = 20 \cdot \alpha \cdot F$$

Где су:

$Q_{\max}$ – највећи очекивани протицај великих вода m³/s,

α – коефицијент рапавости и креће се од 0,4 за сливов малог нагиба, до 1,5 за сливове алпске конфигурације,

F – површина слива km².

Према истраживањима које је спровео Форхајмер, истиче се да су поменути образци превисоки за земље северне Европе, а ниски за области уз непосредну обалу Средоземног мора. Ово је још један доказ да се емпиријске формуле могу користити на релативно уском подручју.

Образац Ишковског у својој основи има два коефицијент акојима се врши редукација годишње суме воденог талога. Образац гласи:

$$Q_{\max} = C_k \cdot m \cdot H_{\text{god}} \cdot F$$

Где су:

$Q_{\max}$ – највећи очекивани протицај великих вода m^3/s ,

C_k – коефицијент отицања велике воде и има вредности дате у табели 13

m – коефицијент који зависи од површине и вредности су дате у табели 14

H_{god} – средње годишње падавине изражене у m

F – површина слива изражена у km^2

Табела 13. Редукциони коефицијент C_k

Категорија по водопропустљивост и врсти вегетације	Равнице и долине	Брежуљи и увале	Брда	Планине	Високе планине
Јако пропустљиво земљиште са нормалном вегетацијом	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08
Земљиште разне водопропустљивост и нормалне вегетације	0,055	0,082	0,16	0,185	0,21
Непропустљиво шумовито земљиште	-	0,155	0,36	0,46	0,60
Непропустљиво оголено земљиште	-	0,400	0,60	0,70	0,80

Табела 14. Редукциони коефицијент m

$F (km^2)$	M	$F (km^2)$	m	$F (km^2)$	m
1	10,00	60	7,75	250	6,00
10	9,50	70	7,60	300	6,5
20	9,00	80	7,50	400	6,22
30	8,50	90	7,43	500	5,90
40	8,23	100	7,40	600	5,60
50	7,95	150	7,10	1000	4,70

У светској литератури се доста често користи **рационална метода** и предложени образац се односи на прорачун за мале сливове:

$$Q_{\max} = C \cdot I \cdot F$$

Где су:

$Q_{\max}$ – највећи очекивани протицај великих вода m^3/s ,

C – вредност коефицијента отицања креће се од 0,1 до 0,82 у зависности од топографских услова и врсте вегетације,

I – интензитет кише mm/min,

F – површина слива ha.

Иако постоји мишљење да се појаве попут одређивања максималних вода не могу уопштити математичким формулама, велики број истраживача радио је на развоју ове групе образаца. Резултат њиховог рада су формуле које се користе и данас, као што су се користиле у прошлости. Иако добијени резултати нису увек најпрецизнији, они представљају вредности настале коинциденцијом свих најнеповољнијих услова који доводе до таквих појава. Ове формуле свакако треба примењивати на малим сливовима нарочито у случајевима када за конкретан проблем не постоје поузданије методе, него вршити субјективне и грубе процене.

Друга група образаца одређује максималне протицаје сложеним повезивањем различитих параметара бујичног слива. Карактеристични примери ове групе су обрасци Д. Сребреновића, Giandotti-Visentini-а и истраживачке групе која је након 1950. године радила на бујичним сливовима Велике Мораве. Ови обрасци имају значајну практичну примену, јер пројектанти немају недоумице приликом одређивања појединачних параметара, што је често био проблем код претходне групе образаца.

Образац који су предложили **Ђиандоти и Висентини** гласи:

$$Q_{\max(100)} = \frac{n \cdot S \cdot p \cdot \sqrt{h}}{4 \cdot \sqrt{S} + 1,5 \cdot L}$$

Где су:

$Q_{\max}$ – највећи очекивани протицај великих вода m³/s,

n – коефицијент развијености слива, просечна висина кише изражена у m,

S – површина слива изражена у km²,

p – средња висина бујичне кише чије је трајање дуже од времена концентрације T_c ,

$$T_c = \frac{4 \cdot \sqrt{S} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{h}}$$

h – средња висина бујичне кише за стогодишњу воду, а то је углавном просечна висина бујичне кише односно аритметичка средина свих падавина изнад 30 mm у вишегодишњем периоду изражена у m,

L – дужина слива у km.

Обрасци које је **Сребреновић** предложио групу образаца за прорачунавање протицаја великих вода у природним сливовима:

За воду 5-годишње учесталости појаве:

$$Q_{\max(5)} = 0,1960 \cdot F^{0,9065} \cdot I^{0,2183} \cdot K^{1,2977}$$

За воду 10-годишње учесталости појаве:

$$Q_{\max(10)} = 0,2446 \cdot F^{0,1359} \cdot I^{0,2334} \cdot K^{1,3183}$$

За воду 25-годишње учесталости појаве:

$$Q_{\max(25)} = 0,2976 \cdot F^{0,8937} \cdot I^{0,2541} \cdot K^{1,3384}$$

За воду 50-годишње учесталости појаве:

$$Q_{\max(50)} = 0,3457 \cdot F^{0,8910} \cdot I^{0,2543} \cdot K^{1,3468}$$

За воду 100-годишње учесталости појаве:

$$Q_{\max(100)} = 0,3967 \cdot F^{0,8992} \cdot I^{0,2585} \cdot K^{1,3525}$$

Где су:

$Q_{\max}$ – највећи очекивани протицај великих вода,

F – површина слива у km^2 ,

I – просечан пад слива у %,

K – чинилац падавина и износи $K = 0,00111 \cdot H_{\text{god}}$

H_{god} – средња годишња сума падавина изражена у mm.

Гавриловић је после вишегодишњег мерења на 20 огледних сливова бујичног подручја Јужне Мораве предложио следећи образац:

$$Q_{\max(5-1500)} = A \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot W \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot D \cdot F}$$

Где су:

$Q_{\max}$ – највећи очекивани протицај великих вода m^3/s ,

A - Коефицијент облика слива $A = 0,195 (O/L)$,

O - Дужина вододелнице (km),

L - Дужина бујичног слива по матици главног тока (km),

S_1 - Коефицијент водопропустљивости подручја,

$$S_1 = 0,4 \cdot f_p + 0,7 \cdot f_{pp} + 1,0 \cdot f_{np}$$

f_p - % јако пропустљиве површине слива,

f_{pp} - % средње пропустљиве површине слива,

f_{np} - % слабо пропустљиве површине слива,

S_2 - Коефицијент вегетационог покривача,

$$S_2 = 0,6 \cdot f_s + 0,8 \cdot f_t + 1,0 \cdot f_g$$

f_s - % површине слива под шумом или шикаром,
 f_t - % површине слива под травнатим покривачем,
 f_g - % површине слива под голетима и ораницама,
 W - Ретенција дотицаја од јаких киша,

$$W_{(5-1500)} = y \left(\frac{h^2}{L} \right) \cong h \cdot (15 - 22 \cdot h - 0,3 \cdot \sqrt{L})$$

y - Корелациони коефицијент ретенције,
 h - Висина бујичне кише (m),
 L - Дужина слива (km).
 D - Средња висинска разлика слива,

$$D = N_{sr} - N_u$$

N_{sr} - средња надморска висина слива,
 N_u - надморска висина ушћа или профила за који се рачуна Q_{max} ,
 F - површина слива.

Поређење са измереним протицајима бујичних вода показало је да овај образац Гавриловића пружа задовољавајуће резултате. Применом овог обрасца могуће је предвидети протицаје ако је позната количина падавина изазваних јаким кишама.

Представник групе образаца који у фокусу има јединични хидрограм је образац који је предложио Херхеулидзе.

$$Q_{max} = \left[\frac{(H_{sr} - H_0) \cdot \eta \cdot r_0 \cdot \lambda_L \cdot \lambda_{ak}}{T_p} + 0,001 \cdot M_0 \right] \cdot F$$

Где су:

Q_{max} – највећи очекивани протицај великих вода m^3/s ,
 H_{sr} – Просечна висина падавина бујичне кише одговарајуће учесталости појаве (mm),
 H_0 – Губитак падавина изазван закашњењем почетка отицања (mm),
 η – Коефицијент протицаја,
 r_0 – Коефицијент облика хидрограма,
 λ_L – Коефицијент пошумљености слива,
 λ_{ak} – Коефицијент ретенције воде,
 T_p – Време успона хидрограма (sat),
 M_0 – Модул просечног годишњег отицања ($l/s/km^2$),
 F – Површина слива (km^2).

Метода Херхеулидзеа је погодна за примену на свим речним сливовима, без обзира на њихову величину, под условом да је доступан израђен хидрограм, што представља њену значајну предност. Ипак, као и код других метода за прорачун максималних бујичних вода, тачност резултата зависиће од искуства пројектанта у процени одређених параметара.

Још једна од хидролошких метода за одређивање максималног протока у бујичним токовима је и **SCS метода** (Soil Conservation Service), развијена од стране америчке службе за очување земљишта. Ова метода представља једну од најчешће коришћених емпиријских метода за одређивање максималних протока, посебно у бујичним сливовима. Заснива се на анализи одговора слива на падавине, узимајући у обзир карактеристике земљишта, покривеност вегетацијом, употребу земљишта и тип слива. Кључни елемент методе је вредност криве броја отицања (Curve Number, CN), која одражава капацитет слива да задржи воду. CN вредности се одређују на основу типа земљишта, стања покрова, степена засићености земљишта и предуслова падавина. Метод користи податке о киши одређене вероватноће појаве, односно очекиваном интензитету и трајању падавина за одређени повратни период. На основу ових података и CN вредности прорачунава се ефективна падавина, која представља део воде што доприноси отицању, а затим се јединичним хидрограмом одређује вршни проток и облик хидрограма. Предности методе укључују применљивост на сливовима различитих величина, укључујући бујична корита, као и брзину прорачуна чак и са ограниченим подацима. Међутим, метода захтева тачне улазне податке, попут карактеристика земљишта и интензитета падавина, а резултати могу бити мање прецизни у сложеним условима слива, попут наглих терена или изражене ерозије. Иако је SCS метода једноставна за примену и веома флексибилна, резултати добијени њеном применом често се верификују додатним анализама ради повећања поузданости.

Емпиријске методе имају своја ограничења. Оне могу бити погодне за неке регије, али дају приближне резултате који се не могу увек примењивати на сваки слив. Такође, недостаје им могућност потпуне прецизности у одређивању максималних протицаја за све врсте бујица.

5.4.3. Процена протицаја на основу трагова у бујичном кориту

Трећа група метода ослања се на директне физичке трагове и обраду теренских података. Постоје случајеви када се у бујичном кориту могу уочити јасно видљиви трагови висине поплавне воде, нарочито на местима где постоје правилно формиране високе обале и где је уздужни пад корита уједначен. Попречне профиле на тим местима треба што прецизније снимити и измерити уздужни пад корита. Уз нацрт снимљеног профила, треба забележити податке о датумима поплава, висини поплавне воде и њеним евентуалним штетама, ако се такви подаци могу прибавити од локалног становништва.

Помоћу ових хидрауличких метода треба одредити хидраулички радијус, површину попречног профила, оквашени обим профила, уздужни пад корита, коефицијент бујичности воде, брзину протицања велике воде, да ви се на крају могао одредити максимални протицај на бујичним токовима.

Поред хидрауличких метода постоје и симулационе методе за предвиђање протицаја где се користе физички модели и симулације. Постоје хидродинамички модели који симулирају кретање воде у сливу и помоћу њих се процењују максимални протицаји. Такође, могу да се користе ГИС модели и примена даљинске детекције за анализу слива и идентификацију критичних зона за поплаве. Ограничења ових модела и симулација се огледају у захтеву за прецизно дефинисаним профилима и детаљним подацима о поплавним зонама, што представља значајан изазов у подручјима са ограниченим могућностима осматрања и прикупљања података.

5.5. Пројектовање трасе регулације за уређење бујичног тока

Пројектовање радова у бујичном кориту започиње правилним постављањем трасе регулације. Траса регулације је кључни елемент јер одређује ток, облик и функционалност корита, као и његову способност да управља протицајем бујичне воде.

Постављање трасе регулације је основни корак у пројектовању бујичних токова и мора бити усклађено са природним карактеристикама терена и хидрауличким параметрима. У правилно пројектованој траси уздужни пад нивелете (нагиб корита у уздужном смислу) и попречни пресек корита морају бити компатибилни. То омогућава оптималан проток воде, смањује ризик од ерозије и седиментације и побољшава стабилност корита.

Ушће бујичног корита у реципијент треба пројектовати под углом не већим од 60° у односу на правац тока реципијента, како би се смањила турбуленција и ризик од убрзане ерозије.

Праволинијске трасе регулације треба избегавати јер доводе до повећања брзине протока воде, што изазива интензивну ерозију дна и обала корита. Уместо тога, траса регулације треба да прати природне меандре бујичног тока. Овакав приступ омогућава смањење брзине воде и бољу контролу седиментације, чиме се унапређује ефикасност регулације и смањује ризик од оштећења корита.

Ход бујичног тока представља дужину пута између два карактеристична елемента у кориту: плићака и вира. Плићак се налази у инфлексионој тачки, где се смер кривине тока мења, док је вир смештен на конкавној страни кривине и представља подручје максималне дубине, која расте са оштрином кривине. За сваку деоницу корита утврђује се просечна дужина између плићака и вира, која се користи као репрезентативна вредност за пројектовање и представља важан параметар за дефинисање трасе и стабилност корита.

Када се пројектују две или више узастопних кривина истог смера, али различитих полупречника, није неопходно уводити међуправце. Непрекидан ток воде у таквим условима омогућава смањење ризика од нежељене турбуленције и осигурава природнији и функционалнији проток. Оваква решења су посебно значајна у сложеним топографским условима.

Пројектовање регулације бујичних токова подразумева пажљив избор техничких -препука. Нагиб уздужне нивелете треба бити довољно блажи да спречи прекомерну ерозију, али довољно стрм да онемогући таложeње седимента. Попречни профил корита мора бити пројектован тако да омогући протицај воде и у екстремним условима, попут поплавних догађаја. Радијус кривина мора бити усклађен са брзином воде како би се смањио ризик од ерозије на спољним странама кривина. Тачна примена ових препорука доприноси дугорочној стабилности и функционалности бујичног корита.

5.6. Пројектовање уздужног пада бујичног тока

Приликом пројектовања објеката у бујичном кориту неопходно је утврдити који ће систем уређења бујичног подручја бити примењен. Након доношења одлуке о систему, може се приступити одређивању неопходних елемената: меродавног максималног протока, количине наноса, трасе и уздужног пада корита (пада изједначења или пројектованог пада).

Гавриловић је на бујичним токовима у сливовима Јужне Мораве, Ибра, Тимока и Вардара проучавао формирање уздужног пада корита. Истраживања су потврдила да је уздужни пад резултат међусобног деловања више фактора, укључујући рељеф, висинску разлику, дужину корита, геолошку грађу слива и корита, крупноћу наноса, величину поплавних таласа и друге параметре. Такође, испитивања су показала да је пад корита подложен променама, не само током вршних протицаја, већ и у другим условима. Рачунска анализа истраживања дала је једначину за одређивање пројектованог пада по Француском систему:

$$I_p = Z \cdot \left(\frac{h \cdot b + 0,2}{h} \right) \cdot \left(\frac{1}{L + 1 - X_1} + \frac{1}{L + 1 - X_2} \right)$$

Где су:

I_p – Пројектовани пад између два профила у бујичном кориту (m),

Z – Висинска разлика између највише (изворишта) и најниже (ушћа) тачке дна корита (m),

h – дубина воде при 100-годишњој води (m),

b – најдужа димензија средњег комада вученог наноса између два суседна профила (m),

L – дужина корита од изворишта до ушћа (m),

X_1, X_2 – Растојање два суседна профила од ушћа (km).

У зависности од растојања на којима се одређују попречни профили за прорачун (нпр. растојања X_1 и X_2), зависи и број прелома на кривој линији уздужног профила који би био пројектован овом методом. Коришћењем овог обрасца за пад изједначења, била би избегнута шаблонска примена попречних објеката у бујичном кориту и више би се приближило начелу да сваки бујични ток има своју специфичност и да самим тим захтева тражење оригиналног решења. Овако димензионисан пад изједначења омогућава формирање благе параболоидне линије у уздужном профилу регулације, са постепеним повећањем нагиба од ушћа ка узводним деловима. У зависности од хоризонталне трасе регулације, овакав уздужни профил био би у складу са свим техничким препорукама за пројектовање.

6. ПАРАЛЕЛНИ ОБЈЕКТИ У БУЈИЧНОМ КОРИТУ

Паралелни односно уздужни објекти у бујичним токовима представљају низ хидротехничких објеката који се постављају дуж корита бујичног тока. У паралелне објекте сврставају се канали, канал-кинете и кинете. Ови објекти су део инжењерских мера заштите и управљања бујичним токовима и имају значајну улогу у смањењу ризика од поплава, заштити земљишта од одрона и очувању еколошке стабилности сливова и пројектују се и изводе са циљем да:

- стабилизују обале спречавајући ерозију дна и обала, односно онемогуће засипање наносом,
- регулишу проток и омогуће лак пронос наноса,
- спречавају нежељено таложење бујичног наноса,
- штите од поплава вода и њихово правовремено и безбедно евакуисање у реципијент.

Канали су уздужне грађевине код којих нема попречних објеката, као што су преграде, каскаде, прагови или појасеви. Уколико су присутни овакви објекти, онда се такве грађевине називају кинетама или канал-кинетама.

Канал-кинете су канали са озиданим обалама и са попречним консолидационим појасевима од каменог зида или бетона.

Кинете имају озидане обале и изграђене су са низом попречних објеката, попут каскада. Каскаде се најчешће граде од зида од камена са цементним малтером или од бетона, али могу бити направљене и од комбинација материјала као што су дрво, камен и жица.

Протицај, траса и пад представљају основне елементе за пројектовање и извођење паралелних објеката у бујичном кориту као што су канали и кинете. Такође мора да се обрати пажња и на друге елементе као што су максимална дозвољена брзина, минимални пречник кривине и размак између попречних објеката.

Траса регулације бујичног корита треба да се приближи просечном ходу бујичног тока на делу где се врши регулација. Код кривина супротног смера, потребно је оставити међуправце у дужини од најмање половине ширине пројектоване регулације бујичног корита. С друге стране, код кривина истог смера, међуправци нису неопходни. Најмањи дозвољени полупречник кривине код регулације бочног корита не сме бити мањи од 60 метара, а његова вредност се рачуна према следећем обрасцу.

$$R_{\min} = 30 \cdot \sqrt{\frac{(B_s + 5) \cdot v^2}{2 \cdot g}}$$

Где су:

$R_{\min}$ – Минимални пречник кривине,

B_s – Ширина попречног профила у нивоу максималне воде (m),

v – Брзина максималне воде (m^3/s),

g – Убрзање Земљине теже (m/s^2).

Код пројектовања регулације бујичних токова, што више треба имитирати природу. Сам избор решења зависи, пре свега, од теренских услова и економских могућности инвеститора. Уколико теренски услови дозвољавају релативно широке протицајне профиле, а да притом нису повезани са изузетно великим трошковима експропријације земљишта кроз које ће се спроводити траса регулације, треба изабрати најједноставније земљане канале. Таква решења могу бити веома економична, посебно у комбинацији са паралелним објектима као што су консолидациони појасеви. Међутим, ако се ради о градском земљишту или регулација пролази између већ изграђених објеката чије би уклањање или померање било скупо или практично неизводљиво, потребно је пројектовати канал-кинете или кинете. Ово су скупљи радови, али истовремено много сигурнији за спровођење бујичних поплавних вода без штете по околне објекте. Да би се донела правилна одлука о томе да ли пројектовати и изградити обичан канал у земљи, канал-кинету или кинету, неопходно је одредити максималну ширину протицајног профила регулације, израчунати максималну количину протицаја поплавне воде и срачунати одговарајуће параметре, попут средње брзине протицаја. Протицајни профили канала, канал-кинета и кинета треба да буду пројектовани тако да максималне брзине воде не прелазе дозвољене вредности за материјале од којих су изграђени. С друге стране, те брзине морају бити довољне да спрече таложење наноса у

подручју регулације бујичног корита. Максималне дозвољене брзине истраживао је читав низ аутора, а део добијених резултата сумиран је у табели 15.

Табела 15. Граничне брзине воде (m/s) у зависности од врсте материјала корита и дубине воде

Врста материјала	Пречник зрна (mm)	Граничне брзине (m/s) за средње дубине воде (m)			
		0,40 m	1,0 m	2,0 m	3,0 m
Песак	1 - 2,5	0,5 - 0,65	0,6 - 0,75	0,7 - 0,8	0,75 - 0,9
Камена дробина	2,5 - 10	0,65 - 1,1	0,75 - 1,2	0,8 - 1,35	0,9 - 1,5
Камен средњи	15 - 75	1,1 - 2	1,2 - 2,4	1,35-2,75	1,5 - 3,1
Камен крупнији	75 - 200	2 - 3,5	2,4 - 3,8	2,75 - 4,3	3,1 - 4,65
Самци мали	200 - 300	3,5 - 3,85	3,8 - 4,35	4,3 - 4,7	4,65 - 4,9
Самци средњи	300 - 400	-	4,35- 4,75	4,7 - 4,95	4,9 - 5,3
Самци крупни	400 - 500	-	-	4,95-5,35	5,3 - 5,5
Фашинске облице		2,5	3,0	3,5	-
Дрвена корита глатка		8,0	10,0	12,0	14,0
Набачај од крупног камена		2 - 3,2	2,4 - 3,9	2,8 - 4,5	3 - 4,9
Набачај од камених плоча		2,2 - 3,5	2,6 - 4,3	3,1 - 4,9	3,5 - 5,4
Бетонске кинете		10 - 13	12 - 16	13 - 19	20 - 25

Код кинета се путем каскадних грађевина подиже дно корита, чиме се пад смањује до жељене, односно прорачунате вредности. Укупна висина каскада у кинетама добија се применом следећег обрасца.

$$H_k = L \cdot (I_0 - I_p)$$

Где су:

H_k – Укупна висина каскада (m),

L – Дужина деонице корита која се регулише изградњом кинета,

I_0 – Пад бујичног корита,

I_p – Пројектовани пад кинете.

Стварни број каскада одређује се тако што се укупна висина подели са просечном висином каскада. Да би се одржао континуитет пројектованог пада нивелете регулације, у пракси је препоручљиво избегавати каскаде веће корисне висине од 2,5 м. У француском систему уређења бујичних токова, корисне висине каскада се углавном крећу између 1 и 2 м. Питање размака између каскада и њихове конструкције у кинетама је добро истражено и познато. Међутим, то није случај са размацима консолидационих појасева у земљаним каналима или канал-кинетама. Убацивањем консолидационих појасева, ови канали се значајно ојачавају. За одређивање размака

између консолидационих појасева, који представљају паралелне објекте без корисне висине, у пракси се веома често користи следћи емпиријски образац.

$$L = \frac{\sqrt{0,5 \cdot d + 10}}{\frac{Y}{Y_1} \cdot \sqrt{h \cdot I}}$$

Где су:

L – Растојање између два узастопна консолидациона појаса у каналу, канал-кинети и кинети (m),

d – средњи пречник вученог наноса у бујичном току на делу корита где се пројектује консолидациони појас (mm),

Y – Специфична (запреминска) тежина бујичне воде са наносом (t/m^3),

Y_1 – Запреминска тежина бујичног наноса (вучени и суспендовани) у сувом стању (t/m^3),

h – максимална дубина воде на преливу, протицајном профилу консолидационог појаса (m),

I – пад корита.

Овај образац примењује се за корита са благим кривинама. У случају да су кривине полупречника мањег од 100 m, ово растојање треба скратити за једну трећину дужине. Користећи овај образац, пројектовани су и изведени консолидациони појасеви приликом регулације Врањско-бањске реке 1954. године. До данас, током надолажења бујичних вода различитих протока, није забележено поткопавање објеката. Овај податак, који је изнео С. Гавриловић, указује на поузданост овог обрасца и препоручује његову примену.

7. ПОПРЕЧНИ ОБЈЕКТИ У БУЈИЧНОМ КОРИТУ

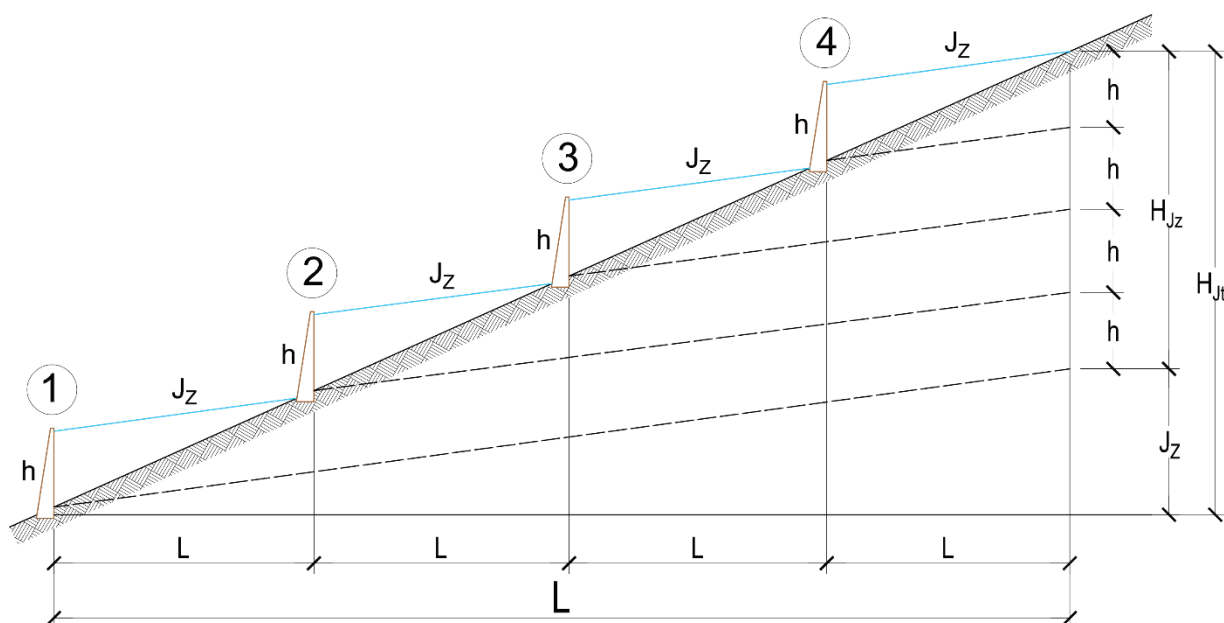
Приликом пројектовања попречних грађевина, веома је важно анализирати искуства са претходних, сличних пројеката. Уколико та могућност изостане, неопходно је обратити пажњу на следеће:

Позиционирање објеката: Попречни објекти се, по правилу, постављају у суженом делу корита са неоштећеним обалама, на местима где се пад корита нагло повећава. Оваква позиција омогућава да се уз минималну количину уграђеног материјала постигну значајни ефекти у задржавању наноса.

Одређивање висине објекта: При пројектовању висине попречних објеката потребно је имати на уму да трошкови изградње расту експоненцијално са повећањем висине објекта, исто као и капацитет за складиштење/задржавање наноса.

Оптимизација броја и висине: Број и висина попречних објеката на одређеној деоници одређују се оптимизацијом односа између количине уграђеног материјала, запремине задржаног наноса и укупних трошкова.

Основна идеја у регулисању бујичних корита и спречавању процеса дубинске ерозије састоји се у изградњи различитих типова попречних објеката дуж корита, с циљем да се обично стрмо корито бујичног тока претвори у степенасто, са ублаженим падом дна (Слика 8). У овако вештачки формираном кориту, бујични ток се креће смањеном брзином, што доводи до губитка његове разорне моћи, односно моћи поткопавања корита, као и способности за даљи транспорт материјала.



Слика 8. Преграде у систему смањују природни пад корита бујичног тока

Попречни објекти који се пројектују и изводе у бујичном кориту разликују се према **висини** и то су:

Консолидациони појасеви без корисне висине и служе за фиксирање уздужног пада корита и одређеног попречног профила,

Прагови са корисном висином до 2 метра и служе поред фиксирања попречног профила и за стабилизацију узводних покрета земљишних честица и ерозионих процеса,

Преграде, са корисном висином већом од 2 метра имају улогу заштите попречног профила од даљих ерозионих процеса, смањују уздужни пад корита бујичног тока, чиме се смањује и брзина кретања поплавних таласа. Такође, оне стварају вештачки ерозиони базис за узводне делове бујичног корита, задржавају одређену количину наноса и консолидују накнадне ерозионе процеса на узводним деловима корита и обала.

Попречни објекти који се подижу у каналима и канал-кинетама називају се униформним називом **каскаде**.

Постоје различите поделе попречних објеката. Неке од њих се односе на поделу према намени, облику, начину одупирања утицају спољних сила и према врсти материјала која се користи за њихово извођење.

Према **намени** попречни објекти могу да се разврстају на:

Консолидационе – за стабилизацију корита односно фиксирање одређеног протицајног профила и смањивање уздужног пада корита,

Депонијске – за задржавање што веће количине наноса,

Ретардационе – за ретардацију поплавног таласа, односно поделе поплавног талса на више млазева, који имају различите брзине, што доводи до наглог снижавања водостаја у низводним деловима бујичног корита, Поред тога ретардационе преграде имају променљиву „вечито живу“ депонију наноса узводно.

Према **облику** попречни објекти се деле на:

Праволинијске или равне објекте,

Делимично лучне и

Лучне попречне објекте.

Према **начину одупирања утицају спољних сила** попречни објекти се посматрају као:

Гравитациони,

Гравитационо-лучни,

Лучни и

Укљештени објекти.

Према **врсти материјала** од којих су изграђени, попречни објекти могу бити:

Бетонски објекти,

Армирано бетонски,

Од префабрикованих елемената (посебно направљени бетонски елементи који се на самој локацији слажу, формирајући један целовит попречни објекат),

Од ломљеног камена у цементном малтеру,

Камени објекти у сувозиду (рустикални објекти),

Дрвени објекти,

Метални објекти,

Габионски (објекти формиран од жичаних сандука испуњених каменом. Ови објекти имају широку примену у радовима у бујичним токовима са нестабилним обалама и дном али уз путну инфраструктуру. Нарочито се користе код бујичних токова „блатно-кашастог“ типа, где је нанос претежно од земље или ситног песка),

Плетери (попречни објекти који могу бити „мртви“ или „живи“ у зависности да ли се за изградњу користи свеже/живо или суво пруће и коље и да ли се жели да из

прућа икоља избијају живи нови изданци. Могу бти и једноструки или двоструку петери, када се међу простор испуни каменим набачајем до висине од 1 метра. Најчешће се користе за уређење јаруга).

Сви попречни објекти у бујичном кориту, осим консолидационих појасева и прагова висине испод 30 см, треба да имају, са низводне стране на удаљености најмање једну и по дужину корисне висине. Специјалан консолидациони објекат, познат као **зуб**, представља попречну консолидациони објекат без корисне висине који штити од поткопавања темеља попречног објекта са низводне стране. Изградња зуба као попречног објекта може да се изостави само ако је темељ попречног објекта утемељен на чврстој стени и ако је удаљеност од попречног профила, где је изграђен попречни објекат, бар 10 m и ако су дно и обале корита водотока стабилни.

Код класичних типова попречних преграда, као и код каскада, као саставни делови рачунају се и **плочник** и **обални зидови**. У овом контексту, плочник, обални зидови и зуб се називају једним именом – **слапиште или бучница**. Најчешће, ови делови попречног објекта у бујичном кориту изграђују се од камених зидова са цементним малтером или од бетона. Само код објеката од плетера или код габијонских преграда, ови делови могу бити изграђени каменом у сувозиду или као комбиновани са жичаним сандуцима.

7.1. Елементи попречних објеката

Попречни објекти су веома скупи, те се њиховом хидрауличком и статичком димензионисању мора посветити посебна пажња. Правилним прорачуном може се избећи рушење ових објеката, што по правилу изазива велике материјалне штете.

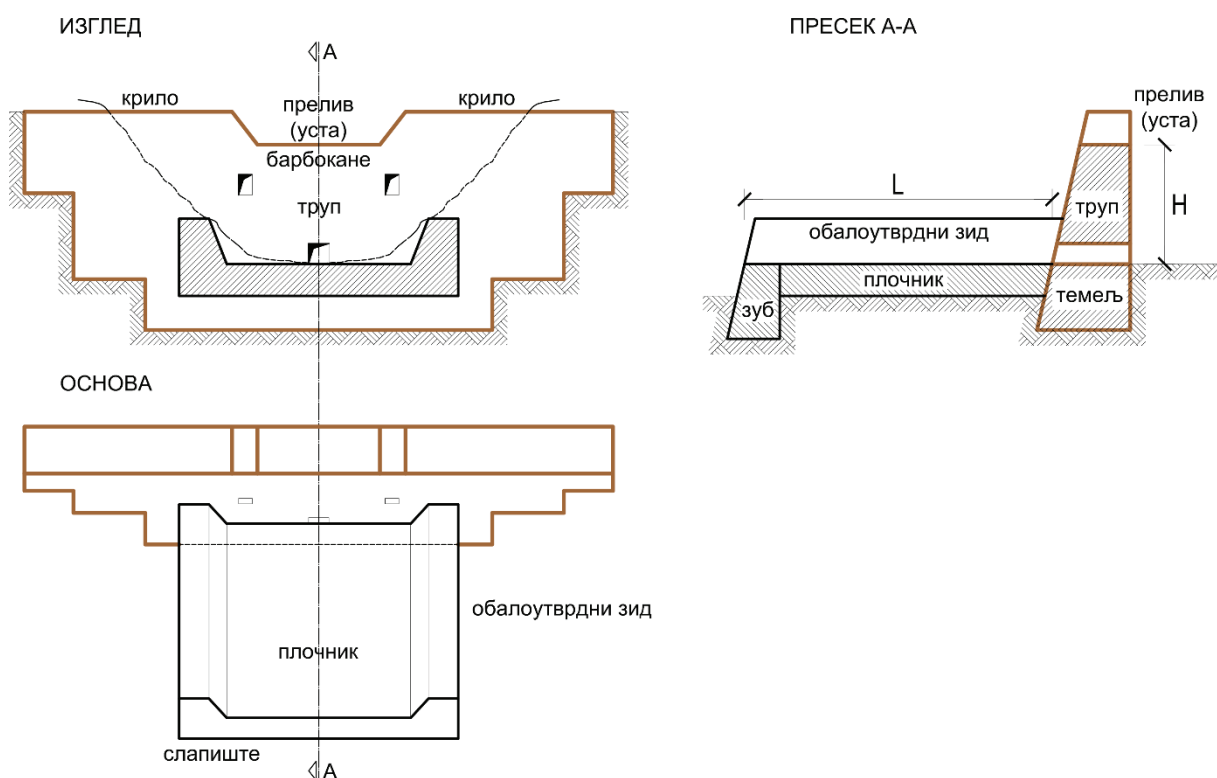
Код пројектовања и извођења уређења бујичних подручја познато је да попречни објекти чине 50% трошкова укупног уређења. Због тога је неопходно оптимизовати њихове димензије.

У Србији попречни објекти се најчешће граде од камена, који се полаже у бетон. Овај начин градње елиминише потребу за постављањем оплате. Уколико је камен тешко набавити или транспортовати на место уградње, објекти се могу градити од бетона, армираног бетона или префабрикованих елемената. Поред тога, могућа је и изградња од опеке или бетонских блокова. Попречни објекти могу да се изводе и од земљаног материјала. Изградњу сталних попречних објеката од фашина треба избегавати, док примену плетера у комбинацији са каменом увек треба размотрити.

Сваки попречни објекат са корисном висином се састоји од следећих елемената слика 9.

- Тело (труп) преграде,
- Темељ,
- Преливни орган,

- Слапиште (бучница).



Слика 9. Делови попречног објекта

Тело попречног објекта представља основни део конструкције који се супротставља спољном оптерећењу. Димензионисање се врши према различитим методама, у зависности од типа објекта. Основни задатак тела попречне грађевине је задржавање наноса, а не задржавање воде, па се приликом грађења мора о томе водити рачуна. Ради лакшег евакуисања процедних вода из узводног дела, у телу објекта се остављају отвори, тзв. барбокане, који су често правоугаоног или квадратног облика. Тело објекта се фундира у земљиште својим темељем или стопом, обично до дубине где се јавља здравица.

Попречни објекат се фиксира у обале својим **крилним зидовима**, који се степенасто укопавају у обалу, бар 1,5 m, а у дно најмање 1 m, у зависности од материјала од којег су саграђени. Преко њих објекти добијају ослонац у обалама и обезбеђују се од бочног поткопавања. Највиши део објекта се назива венац и мора бити израђен од већих комада камена или бетона јаче марке, како би се обезбедио већи степен сигурности и дуготрајност објекта.

Да би се обезбедила сигурна евакуација бујичних поплавних вода преко попречног објекта, гради се **прелив** или **уста** преграде. Овај елемент попречних објеката димензионише се за меродавну велику воду. Ако се попречни објекат гради од

бетона, прелив се обично изводи од камена у цементном малтеру, због веће отпорности на хабање. Треба поштовати услов да ширина прелива на врху објекта увек буде мања (ужа) од ширине стопе темељења, чиме се преграда штити од потпуног поткопавања.

Ради обезбеђења преграде од поткопавања темеља са низводне стране након преливања воде, гради се **слапиште или бучница**, које се састоји од плочника, обалних зидова и зуба. Ово је веома важан део попречног објекта за његову стабилност, те га треба пажљиво димензионисати и изводити. Слапиште или бучница се обично завршава консолидационим појасом ако нема корисне висине или зубом који има корисну висину, обично од 0,5 до 1 m. При изградњи зуба формира се водени јастук, односно хидраулички скок, који додатно смањује кинетичку енергију воде која се прелива преко попречног објекта. Недостатак је што се водени јастук брзо испуњава наносом.

Приликом пројектовања попречних објеката, сваки елемент објекта се приказује у све три пројекције: у основи као и у подужном и попречном пресеку.

7.2. Хидраулично димензионисање попречних објеката

Хидраулички прорачун попречних објеката представља почетну фазу у процесу димензионисања. Поступак је подељен на димензионисање главних елемената. У овом делу биће приказан хидраулички прорачун преливног дела попречне грађевине и бучнице. Приказ ће обухватити методе које се најчешће примењују у инжењерској пракси.

Преливи

Преливи су део попречног објекта, који се најчешће назива "уста преграде", се у хидрауличком погледу разматра као прелив преко широког прага. У основи хидрауличких прорачуна када су у питању преливи, могу да се деле према односу ширине преливне ивице (s) и висине преливног млаза (h). Ова подела је значајна за разумевање хидрауличких карактеристика и примену у пројектовању и подразумева да преливи могу бити: преко широког прага, практичног профила и оштроивични преливи.

Оштроивични прелив

Карактерише га однос $s < 0,67 h$, где је дебљина преливне ивице мања од 0,67 висине преливног млаза. Танка преливна ивица омогућава слободно одвајање воде, што је кључно за мерење протока. Хидраулички прорачун протока (Q) преко оштроивичног прелива се врши помоћу формуле:

$$Q = \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{1,5}$$

Где су:

μ – коефицијент контракције млаза и креће се у оквирима од 0,6 до 0,8, али вредност може варирати зависно од облика прелива и других фактора као што су ерозија или преливна динамика,

b – ширина прелива,

g – убрзање земљине теже,

h – висина воде изнад преливне ивице.

Прелив практичног профила

За овај тип прелива однос ширине круне прелива и висине преливног млаза је $0,67 < s/h < 2$. Ширина је довољна да обезбеди стабилност прелива и самог објекта, али и даље омогућава развој протока блиског оштроивичном. Проток се израчунава слично као за оштроивични прелив, али са прилагођеним коефицијентима.

Прелив преко широког прага

Одликује се односом $2 < s/h < 10$, где је ширина преливне ивице значајно већа од висине млаза. Овај тип прелива често се примењује код попречних објеката, јер омогућава стабилност и минимизује ерозију. Проток преко широког прага израчунава се формулом:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{1,5}$$

Осим ове поделе у односу на ивицу прелива, преливе можемо класификовати и према њиховом положају у односу на осовину водотока (управни, коси, бочни, лучни), према односу ширине прелива и ширине корита (без бочног сужења и са бочним сужењем) и према начину спајања преливног млаза са доњим нивоом воде (непотопљен прелив, потопљен прелив). Попречни објекти и њихов главни представник преграде у бујичним токовима најчешће припадају преливима преко практичног профила или преливима преко широког прага, управним на осовину водотока, праволинијским, са бочним сужењем млаза. Уопштено гледајући, проток на преливу зависи од ширине прелива (b), висине преливног млаза (h), брзине дотицања воде (v_0) и гравитације (g).

Наведени ообрасци се користе код димензионисања преливних органа, али се у ту сврху много чешће користе обрасци који су прилагођени практичарима када се ради о ситуацији у којој се проток воде израчунава узимајући у обзир не само висину воде h , већ и додатни чинилац који укључује брзину воде v и енергију која се ослобађа током преливања. Гранична брзина кретања воде која ће променити израз у овом облику може бити повезана са максималном брзином при којој вода више не буде у стању да одржи ову динамику прелива. Када је брзина воде v велика, ефекти кинетичке енергије (појам брзинска висина или кинетичка висина, представља висину која је еквивалентна

кинетичкој енергији воде при одређеној брзини v и дефинише се изразом: $v^2/2g$) постају доминантни, а тада се појављује **ширење протока** и може доћи до измена у начину на који се проток обрачунава. Граничну брзину можемо одредити као брзину при којој је допринос кинетичке енергије (појам v^2) довољно велики да значајно утиче на разлику између израза унутар корена. У овом случају, то значи да ће ефекат кинетичке енергије на висину воде постати веома значајан и формула ће добити "шире" изразе.

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot \left[\left(m_1 + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)^{1,5} - \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right)^{1,5} \right]$$

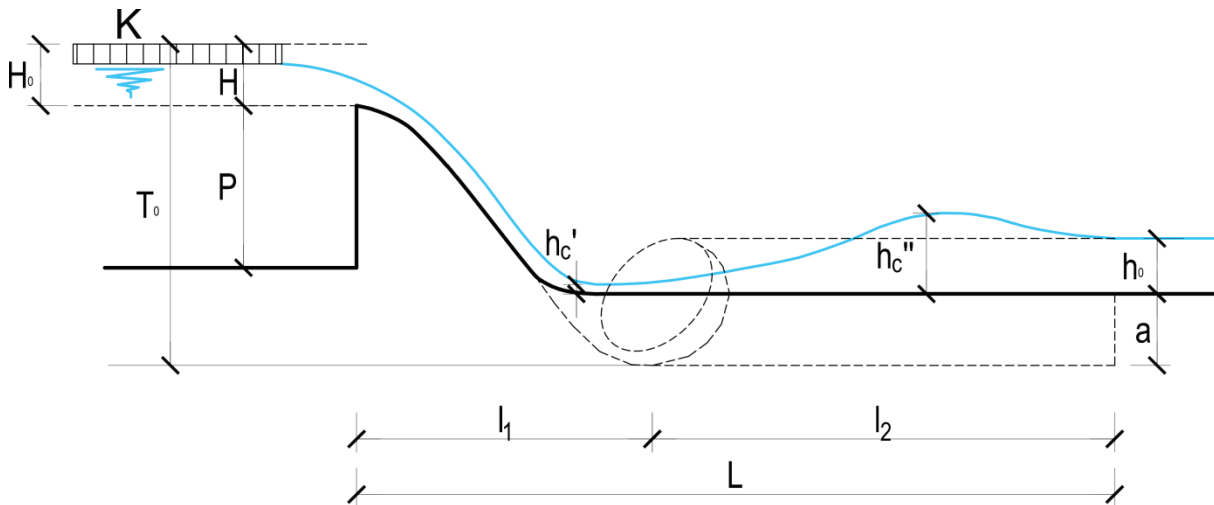
Када се при димензионисању прелива жели занемарити појам кинетичке енергије, односно када кинетичка енергија не игра значајну улогу у одређивању протока, брзина воде мора бити мала у поређењу са брзином која изазива значајан допринос кинетичке енергије у односу на потенцијалну енергију.

У овом случају, брзина кретања воде може се занемарити када је **брзина мања од око 1 m/s**. Ова вредност представља границу при којој је кинетичка енергија занемарљива у односу на потенцијалну енергију и када се претежно ослањамо на дубину воде за израчунавање протока. При овим условима, проток воде може се израчунати већином израза који зависе само од висине воде, без значајног утицаја брзине и кинетичке енергије. На овај начин, ако брзина воде не прелази 1 m/s, може се претпоставити да је кинетичка енергија занемарљива и да неће значајно утицати на димензионисање прелива. Ово такође омогућава коришћење краћег облика прелива (формула за проток преко широког прага), који ће бити ефикаснији при контролисаном преливу воде, јер ће се више ослањати на висину као основни фактор за израчунавање протока.

Бучница - Слапиште

Енергија воде која излази из преливног млаза мора се дисипирати („уништити“), јер би њено разорно дејство на низводни део корита било веома неповољно за објекат. Уобичајена пракса је изградња бучнице/слапишта, тј. облагање корита на одређеној дужини низводно од попречног објекта. Пре него што се приступи димензионисању и прорачуну бучнице, неопходно је разматрати облик и материјал од којег ће се изградити. Енергија воде се у бучници уништава спуштњем нивоа дна бучнице, изградњом одбојног прага или комбинацијом. Бучница би требала да обезбеди потопљен хидраулички скок.

Хидраулички прорачун бучнице своди се на одређивање дубине и дужине и може да се спроводи на више начина у зависности од различитих фактора и улазних параметара.



Слика 10. Димензије у бучници

Према приказаној слици 10, види се да код се преливања воде преко попречног објекта успоставља с доње стране стојећи талас, који се назива хидраулички скок. Дефинисање овог таласа своди се на утврђивање — законитости утврђивања ткз. спрегнутих дубина, односно дубине у суженом или контрахираном пресеку h_c' и њој одговарајуће дубине у коњугованом пресеку h_c'' .

У подножју попречног објекта ток има велику брзину услед мале дубине h_c' у контрахираном пресеку, која се као таква ($h_c' < h_{kr}$), поступно спаја са нормалном дубином доње воде h_0 .

Из функције скока:

$$\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot \omega} + \omega \cdot Z_0 = \theta(h)$$

Изизведене су зависности спрегнутих дубина h_c' и h_c'' .

$$h_c = \frac{h_c''}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{8 \cdot h_{kr}^3}{h_c'^3}} - 1 \right)$$

$$h_c'' = \frac{h_c'}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{8 \cdot h_{kr}^3}{h_c'^3}} - 1 \right)$$

Где су:

h_c' — прва спрегнута дубина (m),

h_c'' — друга спрегнута дубина (m),

h_k — критична дубина (m) $h_{kr} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$,

h_0 – нормална дубина (m),

q – протицај по дужном метру прелива Q/b (m^2/s),

g – убрзање Земљине теже $= 9,81 m/s^2$.

Дубина у суженом пресеку може бити одређена из израза:

$$h'_c = \frac{Q}{\varphi \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H_0 + P - h'_c)}}$$

из које се поступком приближавања утврђује вредност за h'_c

У једначини φ представља коефицијент брзине, који се одређује у зависности од висине попречног објекта (P). Ова зависност приказана је у табели 16

Табела 16. Зависност висине попречног објекта и коефицијента брзине

P (m)	1	2	3	4	5
φ	0,97–0,95	0,95–0,91	0,91–0,88	0,88–0,86	0,86–0,85

$$H_0 = H + \frac{\alpha \cdot v_0^2}{2 \cdot g}$$

H – висина преливања горње воде (m),

v_0 – долазна брзина (m/s),

α – Кориолисов коефицијент ($\alpha=1,01-1,1$),

P – Висина попречног објекта (m).

При образовању скока, настаје губитак специфичне енергије, који достиже 65 - 67% првобитне енергије. Уствари, губици енергије се односе на трансформацију дела кинетичке енергије у топлотну због појачаног трења и појачане турбуленције по образовању скока.

У зависности од односа h_0, h'_c, h''_c , скок може имати три различита облика:

1. Удаљен скок ако је дубина доње воде $h_0 < h''_c$. У овом случају, образује се крива успора од дубине h'_c до h''_c . Овај облик је најнеповољнији, јер се на дужини криве успора образују велике брзине, које проузрокују деформацију корита.
2. Нормалан скок, ако је $h''_c = h_0$ и
3. Потопљен скок, када је $h''_c < h_0$. Овај облик спајања токова се сматра најповољнијим и њему се, уствари, тежи, путем израде бучнице.

Прорачун бучнице се своди на одређивање хидрауличких димензија: дужине и дубине у циљу смештања дужине лета преливног млаза l_1 и дужине воденог ваљка l_2 , односно стварања услова за потопљени скок.

Дужина лета преливног млаза l_1 може бити одређена према једначини:

$$l_1 = \varphi \cdot \sqrt{H_0 \cdot (2 \cdot P + H) \cdot (1 - i^2)}$$

Где је i пад изводног корита, а остале ознаке у формули су већ претходно поменуте.

При овоме је рачунато да је врзина на ивици прелива:

$$v = 0,67 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0}$$

Дужина лета преливног млаза може да се одреди према једначини:

$$l_1 = 1,15 \cdot H_0 \cdot (0,33 \cdot H_0 + P + a)$$

Где је a дубина бучнице у m .

Дужина воденог ваљка или хидрауличког скока може да се дефинише према изразу који је дао Шауман:

Када постоји одбојни праг: $l_2 = 3,2 \cdot h''$

Када не постоји одбојни праг: $l_2 = 4,3 \cdot h''$

Други начин одређивања воденог ваљка је према једначинама:

$$l_{2 \min} = 4,8 (h'' - h_c)$$

$$l_{2 \max} = 6,6 (h'' - h_c)$$

На основу претходног укупна дужина бучнице може бити одређена на два начина:

$$L = l_1 + l_2$$

и према обрасцу академика М.Пећинара:

$$L = 6 \cdot (h_c'' - h_c')$$

Дубина бучница одређује се у зависности од потапања хидрауличког скока, а потапање се може извести.

1. **Спуштањем дна бучнице** (слика 11) у циљу стварања воденог јастука и тада је дубина бучнице одређена из следећег услова:

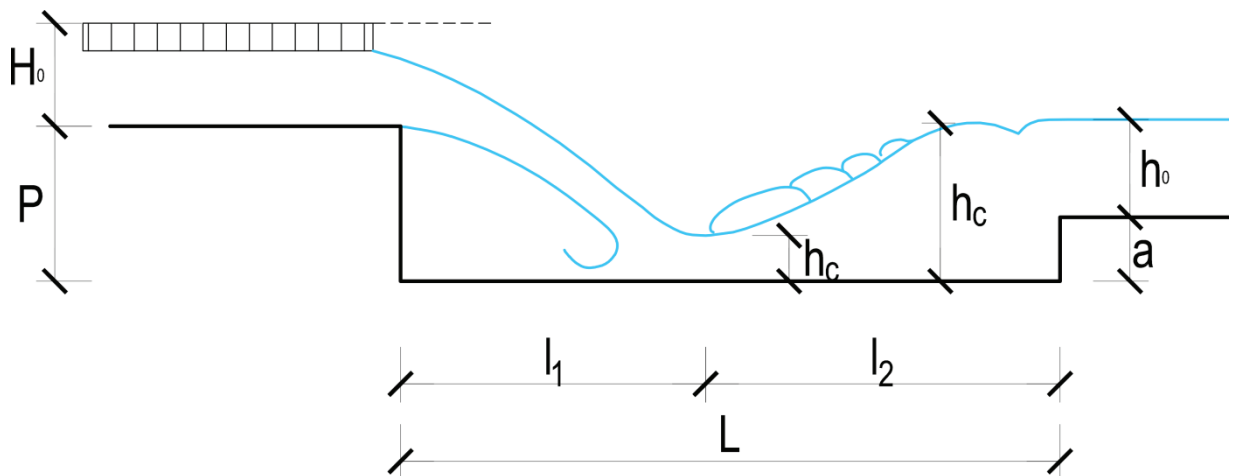
$$a = \sigma \cdot h_c'' - h_0$$

Где су:

σ – степен сигурности потопљености скока (1,05 до 1,15),

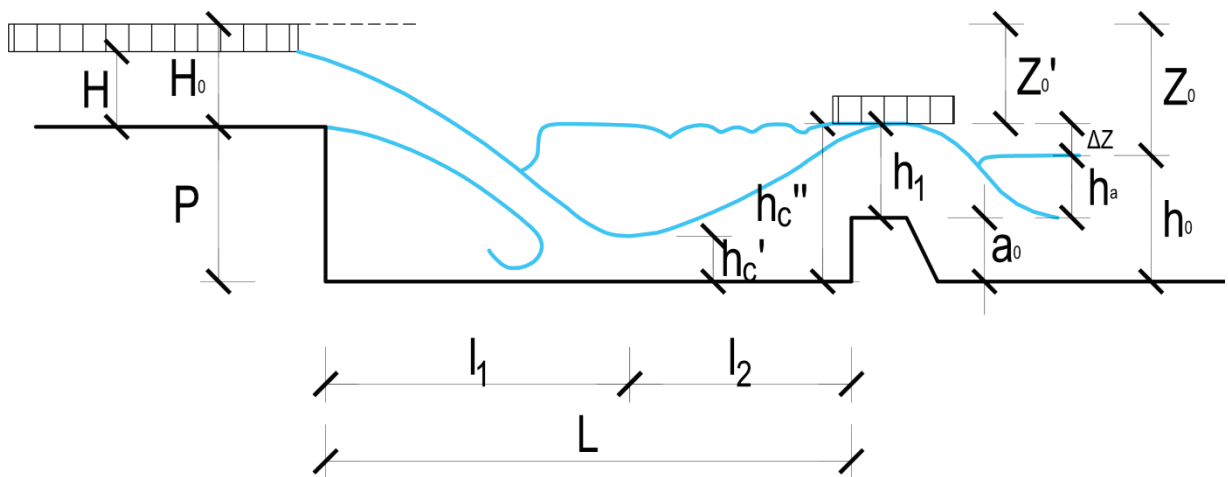
h_c'' – друга спрегнута дубина (m),

h_0 – нормална дубина воде (m).



Слика 11. Потапање хидрауличког скока спуштањем дна бучнице

2. Подизањем одбојног прага (слика 12):



Слика 12. потапање хидрауличког скока подизањем одбојног прага

Дубина бучнице односно висина одбојног прага одређена је према Шауману:

$$a = \sigma \cdot h_c'' - h_1$$

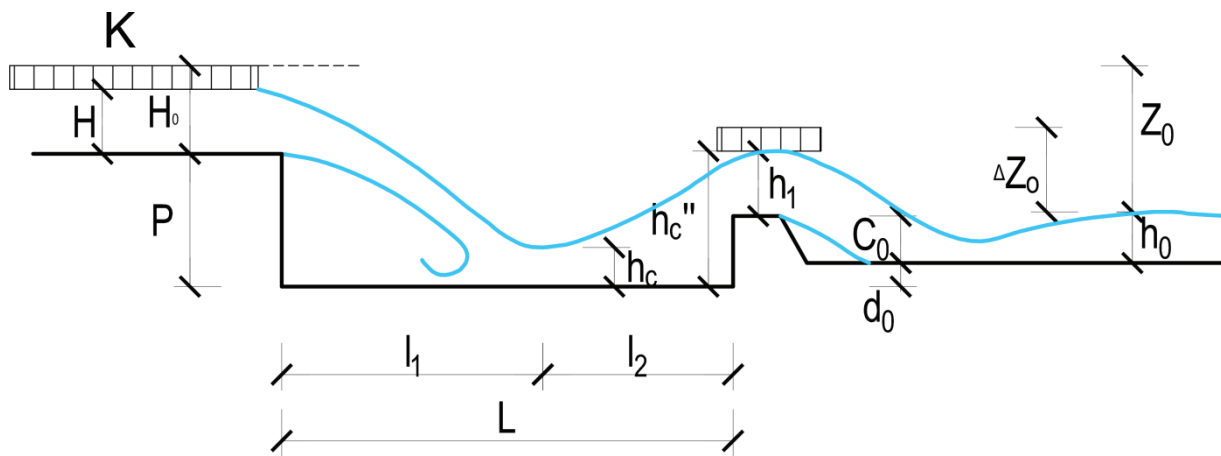
$$h_1 = \left(\frac{q}{m \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \right)^{2/3} - \frac{\alpha \cdot q^2}{2 \cdot g \cdot (\sigma \cdot h_c'')^2}$$

Где су:

h_1 – дубина воде изнад одбојног прага (m),

m – коефицијент преливања за случај слободног прага и узима се из табела зависности слободног преливања преко широког прага и облика и односа дубине бучнице и висине одбојног прага.

3. Комбиновано (слика 13)



Слика 13. Потпапање хидрауличког скока спуштањем дна бучнице и подизањем одбојног прага

Дубина бучнице у овом случају може бити одређена са слике као : $d_0 + C_0$.

Где је :

$$d_0 = \sigma \cdot h_c'' - h_n - \frac{\alpha \cdot q^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{1}{\phi_1^2 - h_n^2} - \frac{1}{(\sigma \cdot h_c'')^2} \right)$$

$$C_0 = a_0 = \sigma \cdot h_c'' - h_1, \text{ као и у ранијем случају.}$$

Са слике се види да је:

$$\Delta Z_0 = \frac{\alpha \cdot q^2}{2 \cdot g \cdot \phi_1^2 - h_n^2}$$

$\phi_1 \cong \phi$ који представља коефицијент брзине одређен према табели у којој је дата зависност висине попречног објекта и коефицијента брзине. Дубина бучнице тако треба да задовољи услов :

$$d_0 = \sigma \cdot h_c'' - h_0 - \Delta Z_0 + h_v$$

Где је:

$$h_v = k = \frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

Након хидрауличног димензионисања, важно је дефинисати још неке услове који су неопходни за неометано и безбедно функционисање попречних објеката.

При избору облика преливног дела попречне грађевине мора се обезбедити аерисан преливни млаз како би се избегло стварање вакуум зоне између преливне воде и зида попречног објекта, која својим негативним дејством може утицати на стабилност објекта. Због тога је најповољнији облик прелива трапезни или лучни прелив, иако при малим протоцима и малим висинама преливног млаза овај облик губи своје повољне особине. У том случају, преливни део се може димензионисати као комбиновани пресек (ужи део за мали проток воде) или се на преливној ивици постављају зуби који, разбијањем млаза, обезбеђују његово аерисање.

На зиду објекта треба оставити отворе (барбокане) који ће омогућити одвод воде из узводног дела и тиме елиминисати негативан утицај ниских температура на објекат, као и смањити силу хидростатичког притиска воде на 0,7 теоријске вредности.

Неопходно је при хидрауличком прорачунавању контролисати величину хидрауличног градијента. При великој вредности градијента, процедурна вода око и испод објекта може почети да испира честице подлоге (суфозиони процес), што временом доводи до стварања каверни (празнине или шупљине), које могу изазвати слагање земљишта и лом објекта. У том случају, нужно је спречити овај процес продужењем пута воде, што смањује хидраулички градијент, постављањем прибоја (инјектирањем или талпама) испод зида објекта или одбојног прага.

Низводно од одбојног прага, на месту где престаје облога дна и косина корита, често долази до деформације – подкопавања или подлокавања дна испод одбојног прага. На том месту је потребно поставити камени набачај или пројектовати неки облик консолидационог појаса како би се елиминисала ова штетна појава.

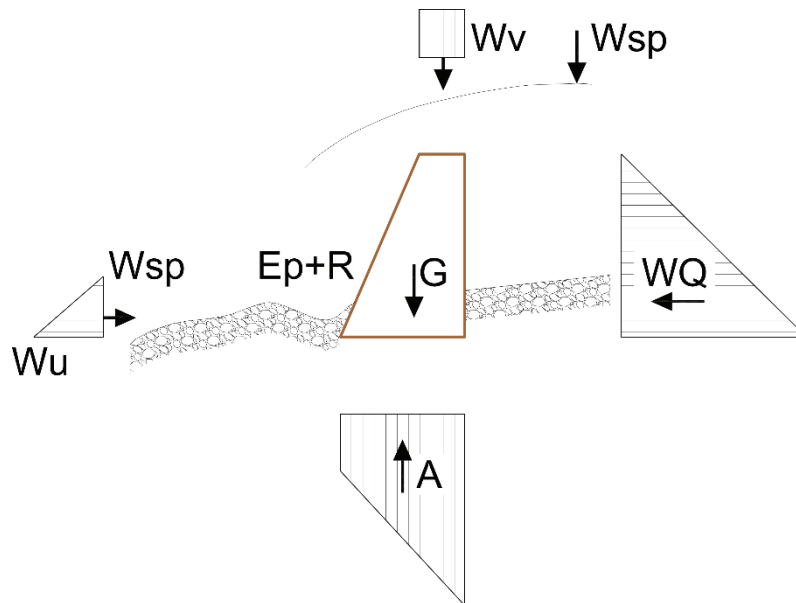
7.3. Статичко димензионисање попречних објеката

Правилно статичко димензионисање попречних објеката веома је значајан корак при пројектовању антиерозионских радова. Како је већ поменуто, на објекте одлази најмање 50% предвиђеног новчаног износа обезбеђеног за уређење ерозионог подручја. То је разлог који је велики број истраживача подстакао да пронађу одговарајући поступак за одређивање оптималних димензија сигурних попречних грађевина у бујичним токовима. Међутим, већина покушаја представља теоријски некомплетно обухваћен проблем. У пракси је, због тога, било случајева да објекти „дебелог” - масивног попречног пресека нису имали дуг век, док су, насупротив томе, у неким подручјима „елегантни и витки“ олакшани попречни пресеци низ година подносили ударе бујичних поплава. Неоправдана је, при том, и слепа примена туђих искустава. Коришћење одређеног пресека попречних објеката захтева спровођење детаљне анализе методологије димензионисања за свако подручје.

Димензионисање је данас засновано на принципима теоријске механике која се примењује за потпорне зидове. Према одређеним ауторима, сигурније је димензионисање тела објекта ако се оно врши на притисак водене струје него на притисак засићеног земљишта. У европским земљама које имају одређену традицију у антиерозионским радовима, приступ димензионисању тела објекта веома се разликује. Већина аутора из Европе, као основу узима хидростатички притисак, користећи различите методе за димензионисање. Према искуству Јефтића из 1978. године, униформно третирање стабилности објекта није исправно, јер се не може са сигурношћу утврдити природа будућих штетних утицаја на објекат. Због тога се анализа спроводи од случаја до случаја, о чему одлучује пројектант у складу са локалним условима. Ово је разлог који упућује да се размотре различита светска искуства у поступку димензионисања тела попречних објекта у бујичним токовима.

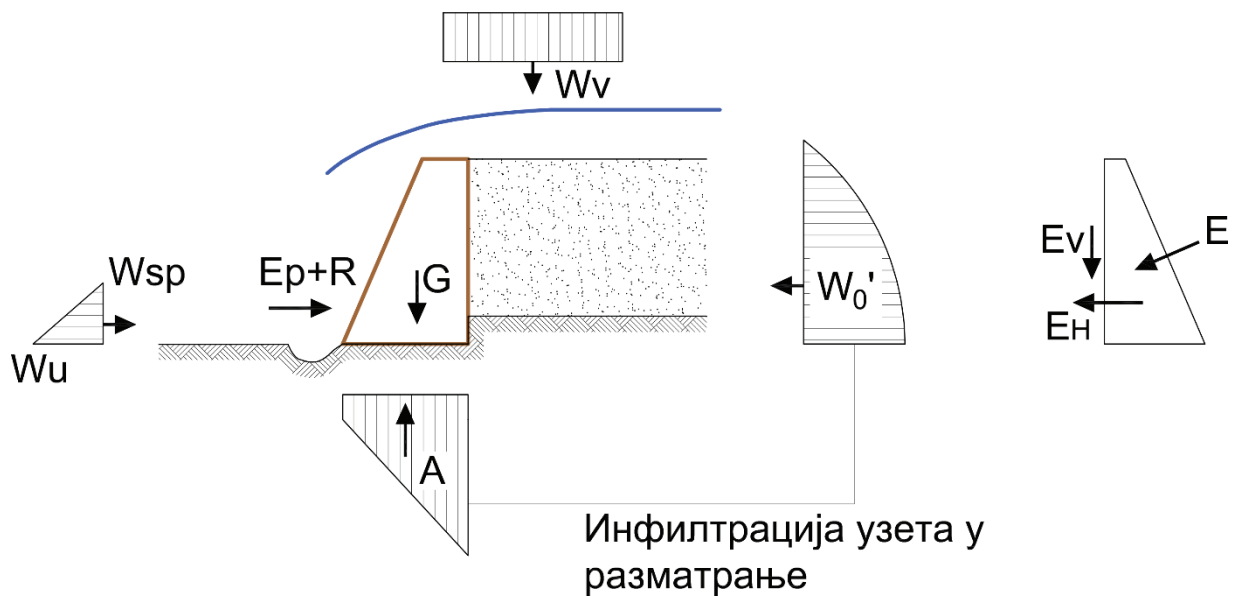
Користећи швајцарска искуства, неопходно је анализирати статичке утицаје за 5 карактеристичних стања попречне грађевине.

У првом случају (Слика 14), узводни простор још није запуњен наносом, па на преграду делује потпуни хидростатички притисак (W_o), тежина воде над круном попречне грађевине (W_v), хидростатички притисак на низводни део објекта (W_u), потисак на темељ (A), а спољним утицајима се одумира сопствена тежина објекта (G) те реакција отпора земљишта на бокове и трење (E_p+R). Осим у нетипичним случајевима, силе W_u , W_v и A се у прорачунима занемарују.



Слика 14. Први случај оптерећења попречног објекта

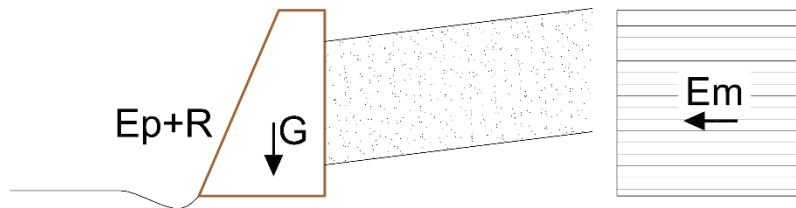
Други случај који је представљен на слици 15, оптерећења попречног објекта у бујичним токовима обухвата стање објекта после запуњавања узводног простора наносом. За разлику од претходног случаја у анализу је уз представљене утицаје увршћен хидростатички притисак који узима у обзир инфилтрацију (W_o), активни притисак земљишта ($E=E_v+E_h$). У прорачуну се занемарују W_u , W_v , E_v .



Слика 15. Други случај оптерећења попречног објекта

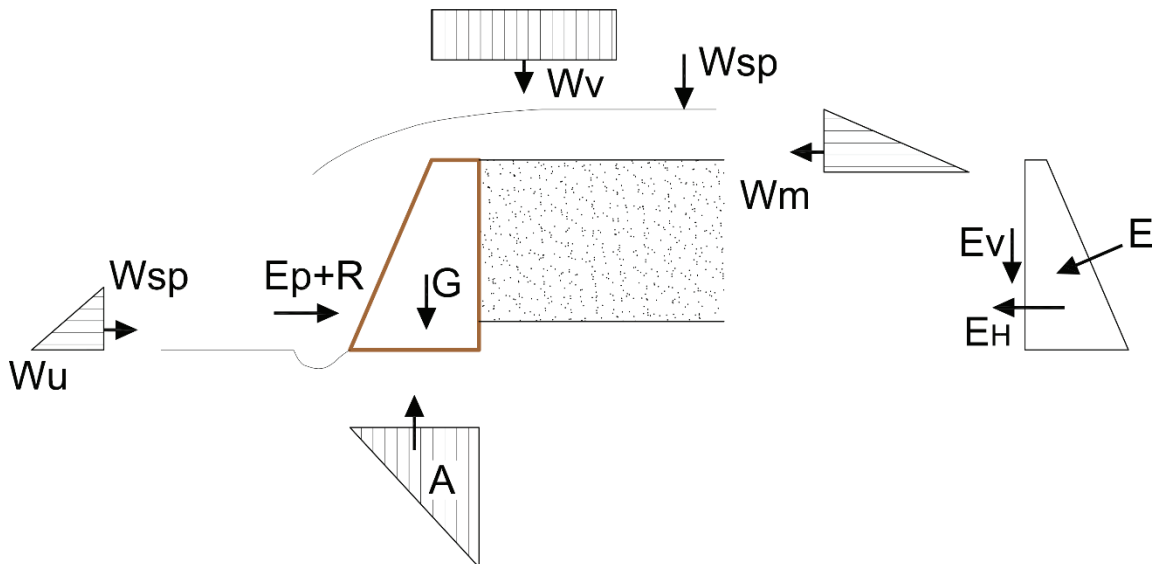
Трећи случај који је представљен на слици 16, оптерећења анализира утицаје при бујичном надоласку. У том случају, на преграду делује динамички притисак (E_m),

реакција отпора земљишта на бокове преграде и трење (E_p+R), уз сопствену тежину објекта (G). Овај случај се веома ретко узима у разматрање зато што као резултат динамичких утицаја добијамо нерационално велике димензије попречне грађевине.



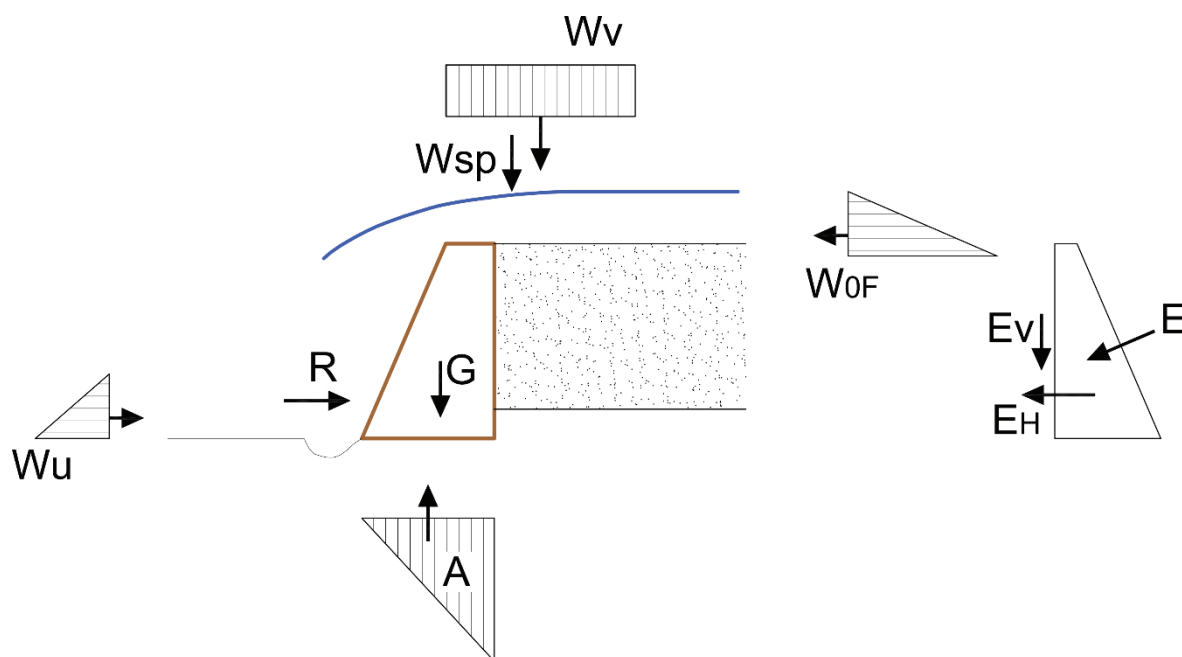
Слика 16. Трећи случај оптерећења попречног објекта

Четврти случај који је представљен на слици 17, оптерећења попречних грађевина у бујичном току обухвата утицаје које настају после потпуног запуњавања узводног простора уз нетакнуте бокове долине. У том случају на објекат, поред познатих утицаја (W_v , W_u , A , G , $E=E_v+E_h$) имамо присутно дејство динамичког притиска на крила попречне грађевине (W_m). У прорачуну се обично занемарују W_u , W_v , E_v , и A .



Слика 17. Четврти случај оптерећења попречног објекта

Пети случај који је представљен на слици 18, се бави анализом оптерећења попречног објекта после потпуног запуњавања и низводног откопавања. Тада на објекат делују G , A , W_u , W_v , E , трење између преграде и бокова долине (R) и притисак воде на крилне зидове (W_{of}). У прорачуну је уобичајено занемаривање W_u , W_v , A , и E_v .

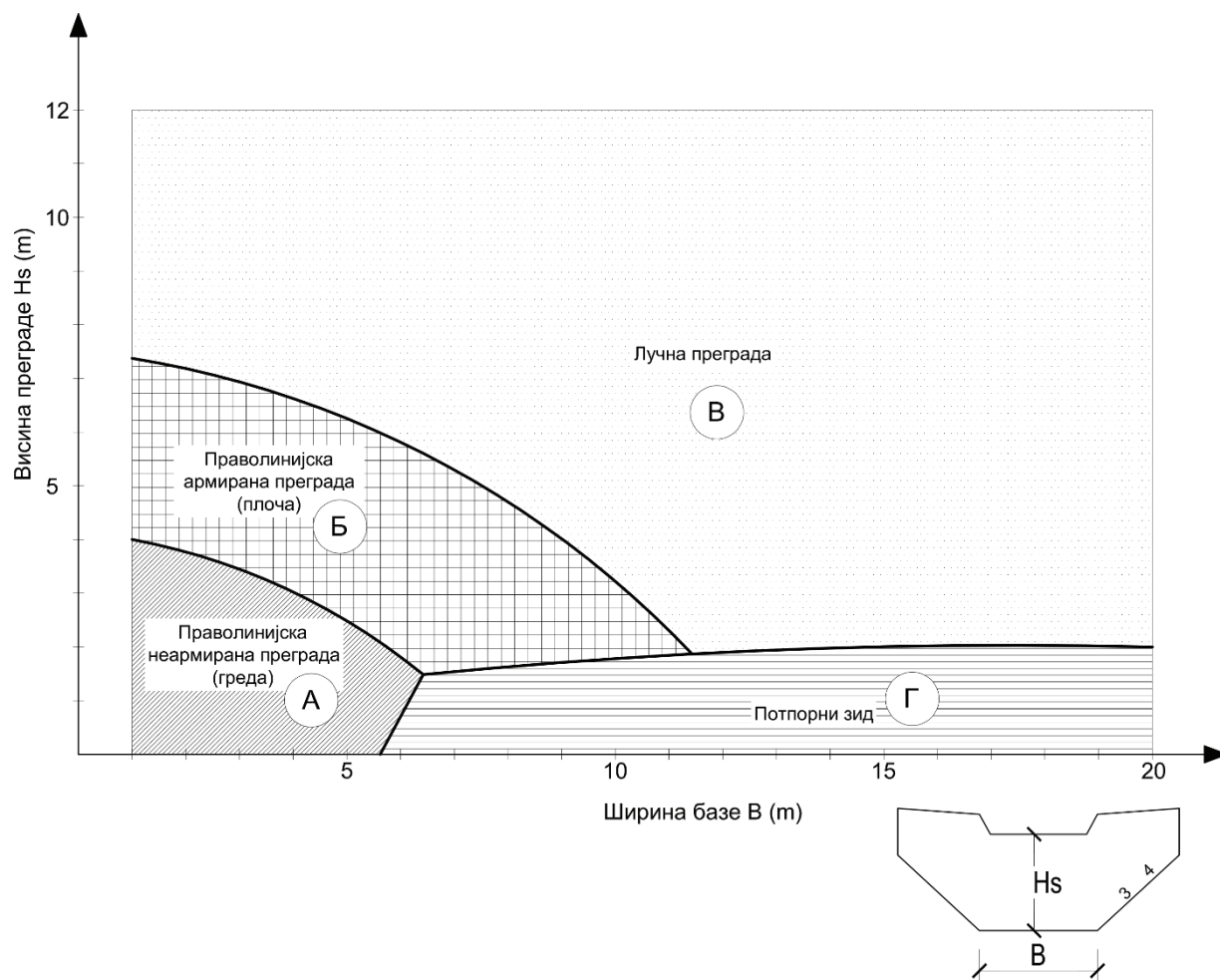


Слика 18. Пети случај оптерећења попречног објекта

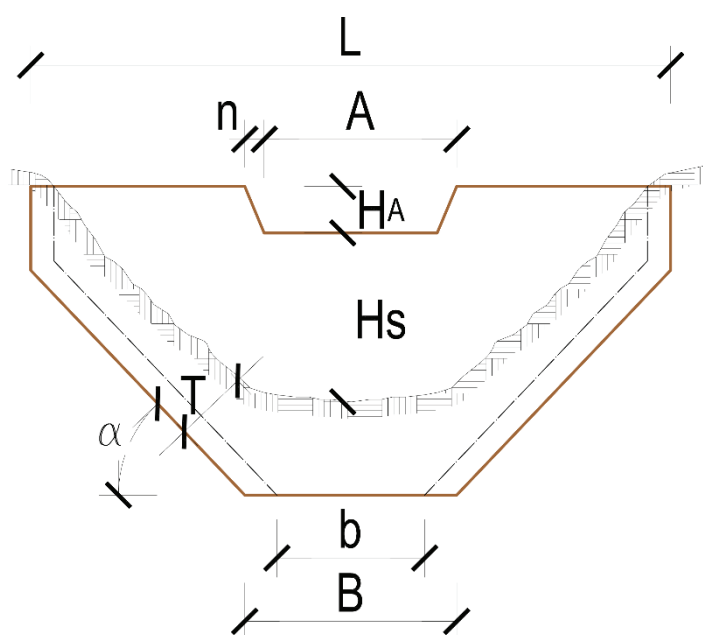
Детаљна анализа оптерећења на објекат би морала обухватити све приказане случајеве иако посебан значај имају први, други и пети случај.

Зависно од планиране висине и распона објекта, квалитета бокова врши се избор облика (праволинијски и лучни) и третмана (потпорни зид, греда, плоча).

Кад су бокови долине довољно отпорни, праволинијски неармирани попречни објекти могу се користити само за мале димензије (висина 2-4 m, дужина базе 6-10 m). Границе економичности између овог типа попречног објекта и трапезоидног гравитационог попречног објекта, која игра улогу потпорног зида дата је на слици 19. Карактеристичне величине које се користе приликом статичког прорачуна приказане су на слици 20



Слика 19. Границе економичности покретних објеката



Слика 20. Карактеристичне величине покретних објеката

Праволинијски армирани попречни објекти представљени одређеним димензијама (висина 2-7 m, дужина базе 1-11 m), израчунате су према методи греда. У овој категорији, разлика у цени у односу на лучне попречне објекте, је мала. Осим тога, они могу - прорачунати као плоча - да буду коришћени за веће димензије ако, због природе бочних страна долине не може доћи у обзир лучни попречни објекат. У категорији високих попречних објеката, неармирани лучни попречни објекти су нормално, кориснији. За дуге ниске попречне објекте (висина од око 3 m, дужина базе >6 m), гравитациони зид је због својих једноставних темеља, примењивији од осталих типова тако да не треба очекивати снажни динамички притисак на крилне зидове па према томе не захтева ни масивнију конструкцију.

Кад бокови долине нису довољно отпорни, у случају да је висина попречног објекта мала, а оптерећење изазвано динамичким притиском мање истакнуто, треба изабрати потпорни зид. У противном случају боље је прибећи избору попторног зида са армираним угловима. У широким долинама вршиће се испитивање да ли је корисније одабрати за целокупну или део попречног објекта, једну трансверзалну непробојну брану која ће гарантовати отпор против опасности од унутрашње ерозије.

7.4. Техничке препоруке за извођење и пројектовање

Земљане радове би требало изводити на боковима долина само у мери у којој то захтева ширина преграде и њен темељ. Због смањења ризика од несрећа, а последично и трошкова и повећања чврстоће и сигурности објекта препоручује се директно бетонирање површине копа. Ако је ископ шири од темеља, настала шупљина, посебно низводна, попуњава се бетоном или ископаним материјалом. Темељ на боку долине може бити у облику степеница или паралелан са боком, што је такође, препоручљиво.

Препоручује се употреба бетона високог квалитета како за армиране, тако и за неармиране преграде. Мањи запремински садржај тањих преграда омогућава континуално бетонирање са мање прекида. Латерални делови преграда могу бити у облику степеница или паралелни са боковима, у складу са методом ископа. Хоризонталне спојнице током бетонирања треба распоредити тако да различити делови преграде могу заједнички функционисати. Песак и шљунак који се користе као агрегати морају бити испитани прво на отпорност према мразу.

Према општим прописима, није препоручљиво да се бетонске преграде облажу слојем природног камена. Сви углови треба да буду засечени (5x5 cm). Оклоп лучних елемената изводи се у облику полигона на хоризонталној равни. Користи се челик високог квалитета, минималне дебљине 5 mm. Бетонске шипке могу се резати на потребну дужину директно на градилишту. За армирање преграда, ископине остају

отворене дуже време како би се поставила арматура. Монтажа армираног скелета ван бујичног корита и његово постављање дизалицом спречавају непредвиђене незгоде.

У случају потребе, крила армираних или неармираних преграда треба повезати са телом преграде како би се спречило пуцање услед наглог динамичког притиска. Ако је потребно ојачати горњи профил преграде, то се изводи на низводној страни. Правоугаоне барбоконе треба оријентисати тако да дужа страна буде хоризонтална како би се минимизовало смањење носивости објекта. Са статичке тачке гледишта, округли отвори су најпогоднији.

За преграде прорачунате као греде, плоче или лукови, могуће је изградити један широки отвор на дну за испуштање воде, јер су преграде ослоњене на бокове долине. Да би се избегло слабење објекта, треба обратити пажњу на следеће:

- Вода не сме заобићи преграду или исцурети испод њених бочних страна; крилни зидови морају бити подигнути у нагибу 1:10.
- Вода која пролази кроз барбоконе и преливни млаз не сме падати директно на бокове долине.
- Подлокавање низводно од преграде не сме изазвати клизање бокова долине. Ово се спречава ако ширина протицајног профила одговара приближно половини ширине бујичног тока или ако су бокови долине заштићени каменим набачајем од великих димензија камења или зидовима.

За преграде више од 12 m, потребан је засебан прорачун. Кључни аспекти за реализацију бујичних преграда могу се резимирати на следећи начин:

- Димензије преграда у бујичним токовима се прорачунавају на основу хидростатичког притиска. Ако је потребно, проверава се да ли је преграда отпорна на притисак сатурисаног земљишта и динамички притисак воде.
- Бујичне преграде које нису сувише дугачке углавном делују хоризонтално од једног бока долине до другог, а у мањој мери као потпорни зидови.
- Стабилност против рушења и клизања се прорачунава на основу вредности отпора бокова долине, утврђених у испитивањима.
- Економске анализе показују да праволинијске неармиране преграде нису исплативе осим за врло мале димензије корита. Праволинијске армиране преграде су корисније за веће димензије. У широким долинама, гравитационе преграде долазе у обзир за мале висине, али ако се очекује велики динамички притисак, бољи избор је лучна преграда или потпорни правоугаони зид. За велике висине, лучна преграда је најјекономичније решење ако су бокови квалитетни.
- У случајевима где избор типа преграде није јасан, препоручљиво је размотрити више опција како би се добила поуздана основа за упоређивање.

Резултати ових препорука не треба да буду третирани као крута правила, већ као смернице које не могу заменити добро разрађен пројекат искусног стручњака. Увек треба узети у обзир локалне услове, а посебно карактеристике подлоге.

8. БРЗОТОЦИ

Уређење бујичног корита често није исплативо решавати степенасто, постављањем попречних објеката. У таквим околностима, облаже се одређена деоница коју карактерише велики пад дна. Обложено корито у делу бујичног тока, где се вода креће брзином већом од критичне, назива се брзоток. Брзоток се углавном примењује у горњем делу („глава“) бујичног тока.

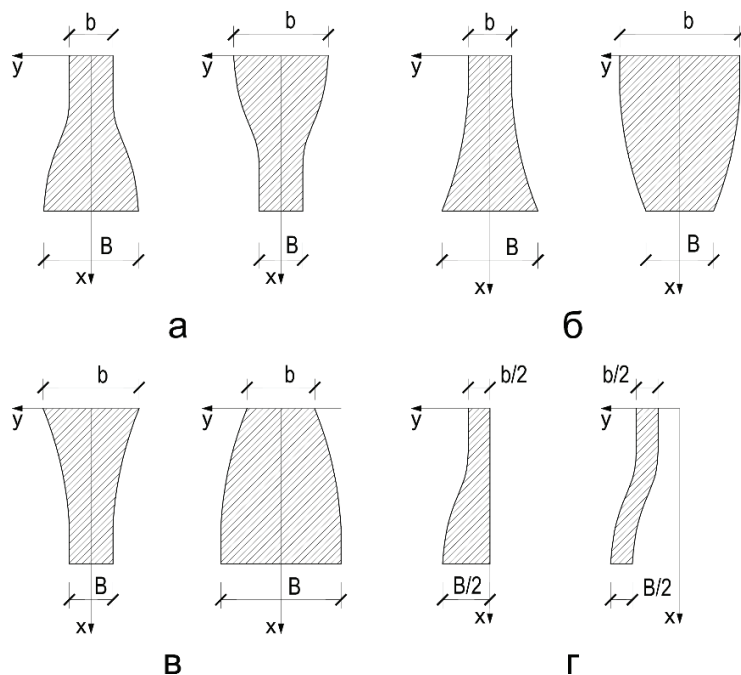
Осим тога, брзоток је објекат који се често користи и код бочних прелива на бранама. Без обзира на место примене, брзоток се састоји из три основна дела:

1. Улазни део (глава брзотока)
2. Канал (брзоток, стрми жлеб)
3. Слапиште (бучница)

Глава брзотока је део у који вода доспева преко преливног дела. У случају да је брзоток у горњем делу бујичног тока, улазни део има облик прелива преко широког прага или прелива преко практичног профила. Брзоток који служи као евакуациони орган акумулације настале изградњом бране обично има облик бочног прелива, прелива облика „пачијег кљуна“ и слично.

Брзоток или **стрми жлеб** односно спроводни канал брзотока најчешће се изводи као дубоки правоугаони или трапезни пресек са великим нагибом косина (10:1 до 5:1), у зависности од коришћеног материјала (неопходно је коришћење материјала који могу да издрже тако велике брзине воде која може бити оптерећена чврстом материјом – балванима, камењем и слично).

Слапиште или **бучница** представља завршетак објекта чији је задатак да „уништи“ енергију воде која се обруши кроз канал. Основна начела при конструисању слапишта су иста као код оних која се примењују за дисипирање енергије преливног млаза на попречним објектима. Нека решења конструктивних прелазних деоница приказана су на слици 21.



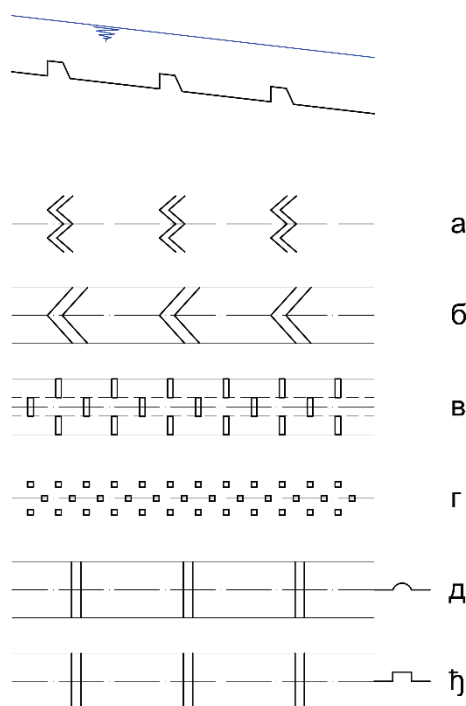
Слика 21. Конфигурација прелазних деоница из брзотока у бучницу

Приликом пројектовања брзотока, нарочито при одређивању дубине корита, неопходно је водити рачуна да је услед велике брзине кретања (и до 30 m/s) вода у себе увукла одређену количину ваздуха, чиме је повећала запремину смањењем запреминске тежине. Ова појава изазива повећање дубине воде, па је при одређивању дубине корита то неопходно узети у обзир.

Осим тога, због велике брзине, неравномерност корита брзотока изазива скакање воде из канала, те се облога мора надвисити за око 50% израчунате дубине воде. Млаз воде који услед не прављења овог надвишења може да испира земљиште око облоге, што касније изазива слегање објекта у створене каверне и као крајњи стадијум да буде лом тла и рушење објекта.

У зависности од пада канала, предвиђене брзине воде и количине воде, брзоток може да се гради од камена, камена у бетону, бетона и армираног бетона. Објекат од камена у цементном малтеру изводи се ако је предвиђена брзина мања од 5 m/s, а оптерећења краткотрајна. Брзоток од камена у бетону може се применити при дужим оптерећењима водом. Иначе, камен је материјал који канал брзотока природно орапави, тако да се у њему не постижу велике брзине, чиме се смањују димензије слапишта, а понекад се и потпуно елиминишу. Поред ове повољне особине, треба напоменути да се објекти од камена не могу применити ако ће брзине кретања воде бити веће од 5 m/s, из два основна разлога. Први разлог је што вода, због рапавости корита, запљускује облогу и, испирајући подлогу, доводи у опасност стабилност и постојаност објекта. Други, исто толико значајан разлог, је што вода, крећући се великом брзином, испира материјал у којем је камен положен (цементни малтер). Када се на тај начин одвојен камен ваља по слапишту, наставља се процес на ослабљеном месту. Даље испирање, по правилу,

доводи до оштећења или рушења објекта. Због ових појава, камен се као материјал за градњу брзотока не примењује у случајевима када је брзина воде већа од 5 m/s. За веће брзине воде углавном се користи армирани бетон. Често се јавља потреба да се бетонско корито, у циљу смањења брзине, вештачки орапави као што је то приказано на слици 22.



Слика 22. Облици вештачког орапављења у брзотоцима

Армирано-бетонски канал брзотока гради се од елемената каналног облика, жељеног попречног пресека и потребних димензија, са остављеним дилатационим фугама (спојницама). Крајеви елемената ослањају се на армирано-бетонске стопе које обухватају цело корито (У-профил). Спољашњи део лучно постављеног брзотока потребно је надвисити за одређену висину, јер услед центрифугалне силе вода добија изразито кос ниво.

Без обзира на материјал од којег ће се градити, код брзотока мора се обратити пажња на следеће елементе:

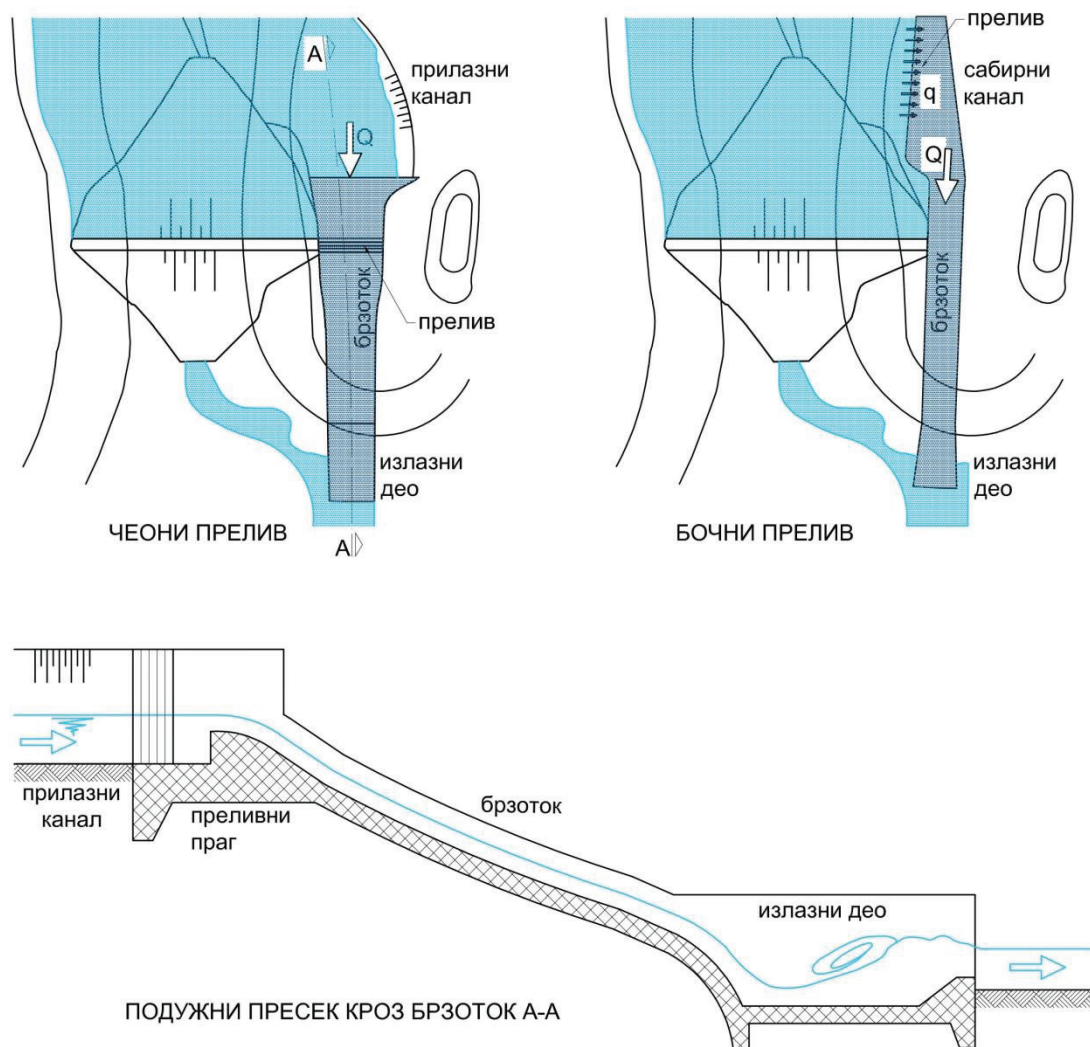
- По могућству, брзотоке треба избегавати ако је пад дна већи од 15% и растојање између ребара у кориту треба да буде минимално 8 дебљина једног ребра мерено по оси тока.
- Облогу брзотока никада не треба постављати на насипу или несигурном земљишту (клизишту).
- Облога брзотока не сме се постављати директно на земљиште, већ на контрафилтарски слој који ће спречити негативан утицај ниских температура.
- На облози брзотока морају се оставити отвори (нпр. пластичне цеви са дренажном призмом) који треба да обезбеде истицање подземне воде кроз облогу у

канал. На тај начин се спречава „испливање“ објекта или дела објекта под утицајем сила узгона.

- Треба избегавати градњу брзотока ако вода у себи носи честице наноса веће од 25 mm, које ће уништити и бетонску облогу најбољег квалитета у кратком временском периоду. Уколико се не можемо одрећи предности које брзоток пружа, неопходно је вршити облагање челичним плочама.

- Неопходно је извршити заштиту арматуре од корозије у облози брзотока.

Велику примену брзотоци имају као преливни органи на бранама. Уводе се као објекти за заштиту од преливања, најчешће на земљанима бранама, тј. за спречавање пораста нивоа воде у акумулацији изнад максимално дозвољеног. Преливни део (глава) брзотока, при том, има два основна облика: (нормални) чеони и паралелни (бочни) као што је то приказано на слици 23.



Слика 23. Изглед чеоних и бочних прелива код брзотока са његовим подужним пресеком

За обликовање преливне ивице брзотока препоручују се профили Грзуњински и Цреагер-Сцимени. Приликом преливања преко овако обликованих ивица, контракција млаза има најповољније вредности.

Код бочних прелива, он је позициониран на косинама акумулације, а потребна дужина рачуна се на основу формуле Поленија:

$$q = 0,66 \cdot \mu \cdot 2 \cdot g \cdot h^{1,5}$$

где су:

μ – коефицијент контракције млаза,

h – висина преливног млаза.

У случају да брзоток морамо изградити на терену са великим падом, који ће изазвати неприхватљиво велику брзину течења, радимо вештачко орапављење корита. Разлози за примену вештачке рапавости код брзотока су:

Брзина воде у брзотоку је већа од допуштене за материјал косине, те због тога може настати разарање корита,

Брзина није већа од допуштене, али ипак ствара тешкоће при спајању млаза са доњим нивоом,

Брзина је превелика за обављање неких радова у брзотоку (сплаварење, пропуштање рибе, итд.).

У оваквим случајевима неопходно је смањити брзину воде, што се најчешће постиже изградом ребара на дну корита. Ребра локалним отпорима изазивају губитке, а тиме и смањење брзине. Постављање ребара на бокове облоге се ретко примењује, јер таква ребра изазивају нежељено скретање тока. Карактеристика вештачке рапавости је што се она не може изразити сталним коефицијентом рапавости, већ зависи од пада дна корита и дубине воде. Облик ребара који се примењује је веома различит као што је то претходно приказано на слици слици 22.

8.1. Хидраулички прорачун брзотока

Хидраулички прорачун брзотока спроводи се за његове делове, тј. обухвата хидраулички прорачун улазног дела (главе), брзотока и бучнице.

Хидраулика улазног дела иста је као код хидрауличног прорачуна попречних грађевина. Димензионисање канала брзотока врши се на основу дозвољене брзине за материјал од којег се облога изводи (v_d).

$$v_d = C \cdot \sqrt{R \cdot I}$$

где су:

v_d – дозвољена брзина течења воде

C – Шезијев коефицијент,

R – Хидраулички радијус,

I – Пад дна брзотока.

Брзина течења у брзотоку зависи од попречног пресека и дубине воде. Услед велике брзине воде долаз до увлачења ваздуха, што доводи до повећања дубине воде. Због тога је потребно израчунати дубине воде на почетку и крају брзотока. На почетку брзотока јавља се критична дубина (h_{kr}), док се на крају јавља нормална дубина (h_0).

Пад на улазу у брзоток је већи од критичног ($I > I_{kr}$), што узрокује формирање критичне дубине (h_{kr}) на прелазу између улазног дела и канала брзотока. На споју канала брзотока и слапишта појављује нормална дубина (h_0) и контраховане (спрегнуте) дубине (h_c' и h_c'') које се јављају у бучници и одређују хидраулички скок. Прелаз из канала брзотока у бучницу треба димензионисати тако да се оствари потопљен хидраулички скок и успостави нормална дубина.

Бучница се димензионише тако да обезбеди нормалну дубину и мирно течење у хидрауличком смислу. Бучницу карактеришу дубина, дужина и ширина. Ширина бучнице се рачуна од преласка из брзотока кроз угао проширења бучнице који обухвата компоненту брзине управно на ток (v_y) и брзину тока (v_x). Осим угла проширења, ширина зависи и од дужине лета преливног млаза, висине млаза, дубине воде након проширења, као и од пада дна брзотока и саме бучнице.

Дужина бучнице зависи од дужине лета (домета) преливног млаза и обично се обележава са L_1 и дужине хидрауличног скока која се обележава са L_2 .

Дубина бучнице може да се рачуна на више различитих аналитичких начина или коришћењем номограма. Хидраулички прорачун дубине се своди на одређивање прве и друге спрегнуте дубине након чега се друга спрегнута дубина упоређује са нормалном дубином како би се утврдило да ли је течење мирно или бурно. Услов за постизање потопљеног хидрауличног скока је испуњење критеријума потопљености, што се одређује кроз коефицијент потопљености.

9. ПИТАЊА ЗА ПРОВЕРУ ЗНАЊА ИЗ ОБЛАСТИ: ОБЈЕКТИ ЗА УРЕЂЕЊЕ БУЈИЧНИХ ТОКОВА

1. Ерозија - појам и класификације
2. Ерозија ветром - постанак, заштита
3. Фактори настанка ерозије водом
4. Бујични слив, бујични ток - појам, основне карактеристике
5. Системи уређења бујичних сливова
6. Пројектовање радова у бујичном кориту
7. Методе одређивања меродавног протицаја за димензионисање објеката у бујичном кориту
8. Пројектовање паралелних грађевина - појам, материјал, основни принципи
9. Хидраулички и статички прорачун паралелених грађевина
10. Пројектовање попречних грађевина - појам, намена, материјал, класификација
11. Делови попречних грађевина и њихова функција
12. Хидраулички и статички прорачун попречних грађевина
13. Техничке препоруке за извођење радова код уређења бујица
14. Брзотоци - појам, намена, материјал
15. Хидраулички и статички прорачун брзотока

АКУМУЛАЦИОНИ БАСЕНИ У ФУНКЦИЈИ ЗАШТИТЕ ОД ЕРОЗИЈЕ

1. АКУМУЛАЦИЈЕ – ПОЈАМ, ЗНАЧАЈ И ПРИМЕНА

Акумулације и водне ретенције представљајуј вештачки створен водени резервоари (настао преграђивањем река или изградњом брана) које служе за задржавање великих количина воде и имају вишеструку примену и значај. Користе се за задржавање поплавног таласа, наводњавање, снабдевање водом, заштиту земљишта од ерозије, туризам, риболов, рекреацију и спорт. Мале акумулације граде се на токовима бујичног карактера, односно на токовима са израженим максималним протоком који може бити изазван обилним падавинама или наглим топљењем снега у сливу.

Формирањем акумулационих басена смањује се снага велике воде низводно од бране, а нанос се задржава, што доприноси стабилизацији ерозионих процеса и повећању пољопривредне производње на том подручју. **Акумулацијама се истовремено могу решити три проблема: бујичне поплаве, ерозија и несташница воде.**

Човековим деловањем често се нарушава природна равнотежа у сливним подручјима, што доводи до погоршања водног режима водотока. Последице ових активности све више компликују заштиту од поплава. Ова заштита подразумева примењивање система сложених мера којима се цео слив брани од великих вода. Ипак, акумулациони басени ретко се пројектују искључиво у сврху заштите од поплава. Непожељан део поплавног таласа може се задржати у делу акумулационог басена кроз правилно управљање евакуационим органима, док се преостали део простора користи за друге сврхе у склопу мултифункционалне употребе акумулације. Само усклађивањем, често супротстављених, захтева водопривреде, енергетике и других корисника могуће је остварити овај циљ.

Примена акумулација на бујичним токовима показује се као изузетно ефикасна, јер омогућава смањење интензитета поплавног таласа и коришћење мање штетних количина воде. Ово је од посебне важности када је у питању заштита кључних подручја, као што су насеља и индустријски центри. Ипак, изградња акумулационих басена за ублажавање поплавних таласа често не даје пуне резултате без пратећих регулационих радова у сливу.

У нашој земљи постоје значајне, али недовољно искоришћене залихе воде које неконтролисано отичу са подручја. Те залихе су од великог значаја за заштиту од поплава, снабдевање водом становништва и индустрије, резерве воде за рударске флотације, наводњавање пољопривредних површина, као и за напајање стоке и дивљачи, спорт, рекреацију и производњу електричне енергије за локалне потребе. Озелењавањем и пошумљавањем земљишта у околини малих акумулација стварају се услови за развој различитих грана мале привреде, као што су пчеларство, повртарство, сточарство, рибарство и туризам, чиме се значајно унапређују еколошки услови ширег подручја.

Искуства многих земаља са сличним природним карактеристикама, указују на важност изградње акумулација. Запажено је да изградња великог броја мањих језера у брдским пределима може успешно допринети решавању три кључна проблема: ерозије, бујичних поплава и суше. Још 1952. године у публикацији FAO организације истакнуто је: „Мале водне акумулације, брдска језерца и микроретенције отварају нове могућности за стварање плодних поља на ерозијом уништеним подручјима, унапређење животног стандарда и смањење незапослености међу становништвом брдских региона. Њиховом изградњом спречавају се штете од ерозије, поплава и суше, док се истовремено развијају пољопривреда, сточарство, рибарство, туризам и рекреација. Мале водне акумулације су нужност савременог доба.“

С краја двадесетог века, чак и земље са значајним водним богатствима приступиле су интензивној разради пројеката за уређење брдских подручја. У САД такви пројекти носе назив „Национални пројекти за брдске сливове“. Реализацијом ових пројеката настојало се унапређивање пољопривреде и националне економије брдских региона постављањем смерница: „Свака фарма треба да има своје језерце за наводњавање, рибарство, сточарство, дивљач, па чак и рекреацију.“ Већ 1960. године, у овој земљи великих река и природних и вештачких језера, обележена је изградња милионитог вештачког језерца, намењеног потребама фармера у брдским пределима. Након изградње овако великог броја малих језера за локалне потребе фармера, америчке канцеларије задужене за планирање приноса у пољопривреди и сточарству лакше су давале стабилне прогнозе. Пре ове иницијативе, и пре доношења посебног закона о изградњи малих акумулација за фармере, њихове прогнозе у вези са приносима у ратарству и сточарству ретко су се испуњавале, често са мање од 50% вероватноће, услед штета од суша, ерозије и бујичних поплава.

Слични процеси уочени су и у другим земљама које су приступиле интензивној изградњи вештачких језера ради унапређења пољопривреде и других грана. Јапан је, на

пример, у периоду после Другог светског рата до 1960. године изградио око 150.000 малих брдских језера и водних акумулација за борбу против суше, ерозије, поплава и глади у пасивним областима својих пренасељених острва.

И Француска, Португалија, Бугарска, Палестина, Тунис и друге земље уложили су значајне напоре у изградњу малих вештачких језера. Италија је такође препознала да без освајања брдских предела путем изградње микроакумулација, не може ефикасно решити питање исхране и запошљавања становништва. Крајем двадесетог века, у Италији је изграђено више хиљада малих језера, распоређених по брежуљцима од Пијемонта до Калабрије и острва. Италијански стручњаци су тада разматрали реализацију плана за изградњу преко 80.000 брдских језера широм земље.

Италијански стручњаци за конзервацију вода и заштиту земљишта од ерозије свој велики успех нису постигли без значајних тешкоћа и борбе за увођење нових схватања у стручну и политичку јавност. Тако су, на једном од стручних састанака одржаном још 1954. године у Фиренци, где је присуствовала и група стручњака из Србије, изнете следеће озбиљне примедбе:

- Подручја око Тоскане имају стрму конфигурацију, што је случај у готово целој средњој и северној Италији, па би вештачка језера имала врло малу корисну запремину. Тако мала корисна запремина значајно би повећала цену захваћене воде по јединици.
- Затрпавање наносом са стрмих и оголелих терена било би тако брзо да век експлоатације малих акумулација не би трајао ни неколико година.
- Брдска земљишта, већ осиромашена ерозијом, нису погодна за примену наводњавања.

Сличне примедбе изношене су и у нашој земљи током покушаја увођења идеја о изградњи малих акумулација. Ове примедбе, нажалост, знатно су успориле ширење ових идеја. Ипак, италијански стручњаци нису одустали од својих настојања да докажу оправданост изградње малих акумулација и система за наводњавање. Док је наша стручна служба, оптерећена наведеним примедбама, била у сталној дилеми, италијански стручњаци су практичним примерима успешно побијали једну по једну од ових критика и убедљиво доказали:

- Да је и у условима стрме конфигурације могуће успешно градити мала вештачка језера.
- Да проблем затрпавања наносом није нерешив и да су теорије о брзом затрпавању малих акумулација углавном базиране на искуствима са већим водотоцима, док се у условима мањих сливних подручја тај проблем може адекватно решити тако да век акумулације буде задовољавајући.
- Да је увек могуће, па чак и веома корисно, наводњавати брдска земљишта оштећена ерозијом, под условом да се примене одговарајуће антитерозионе и агротехничке мере, при чему је рентабилност таквих радова релативно висока.

Потврђено је да се изградњом малих вештачких језера уз помоћ насутих земљаних брана радови могу релативно брзо реализовати, углавном уз коришћење

локалне радне снаге, са минималним ангажовањем механизације и грађевинског материјала (као што су камен, цемент и гвожђе). Ово је значајна предност у односу на изградњу средњих и великих брана. Такође, припремни радови су знатно једноставнији – геодетска снимања се спроводе брзо, трошкови експропријације су минимални, а геомеханичка истраживања и припрема градилишта захтевају кратак временски период. Изграђена језера у напуштеним и ерозијом захваћеним подручјима постају центар нових активности за становнике тих крајева. Она служе као рибњаци, рекреативни и туристички пунктови, али и као основа за развој нових фармерских привреда и пољопривредних задруга. На овај начин, становници брдских подручја добијају могућност запошљавања и стабилних прихода.

У нашој земљи изградњи малих вештачких акумулација није посвећена довољна пажња. Према подацима из 1973. године (СФР Југославија), високим бранама формирано је 85 језера са укупном запремином од $95 \times 10^8 \text{ m}^3$ воде. Ова вода се углавном користи за производњу електричне енергије (47%) и за наводњавање (26%). Према подацима из Стратегије управљања водама Р Србије из 2016. године у склопу активних мера заштите од поплава, за ублажавање поплавних таласа великих вода користи се 58 постојећих акумулација и ретензија. Један број акумулација има резервисан простор за пријем таласа великих вода одређене вероватноће појаве, док се код неких акумулација учешће у одбрани од поплава постиже кроз сарадњу корисника акумулације са надлежним службама. Акумулације и ретензије данас имају секундарну улогу у одбрани од поплава.

Иако Војводина није изразито бујично подручје, изграђене су акумулације у три карактеристична региона: северна Бачка, Срем и Вршачки брег. Акумулације у северној Бачкој (Зобнатица, Сава, Таванкут и др.) служе углавном за наводњавање квалитетног пољопривредног земљишта. Сремске акумулације (Борковац, Мохарач, Кудош, Сот и др.) првенствено пружају заштиту од поплава, прихватајући поплавне таласе, а истовремено обезбеђују воду за наводњавање. На Вршачком брегу, акумулације су углавном формиране ради заштите од поплава (нпр. Месић). На свим овим акумулацијама простор се, у мањој или већој мери, користи и за риболов, спорт и рекреацију.

Са аспекта рационалног газдовања сливним подручјима у брдско-планинским крајевима, изградња малих водних акумулација је неопходна. Ови објекти, осим што служе за задржавање великих количина воде, доприносе изравнавању сезонских неравнотежа, елиминацији суша и ублажавању економске заосталости региона (кроз примену наводњавања, развоја туризма и друго). Мале акумулације су кључно средство у борби против ерозије, поплава и суше, које су међусобно повезане у јединствен процес који значајно утиче на заостале крајеве.

Привредно планирање у брдско-планинским областима захтева интервенцију у области заштите земљишта и конзервације воде, што омогућава стабилизацију природних услова и елиминацију негативних утицаја. Вода, ослобођена стхијског карактера, постаје основни елемент развоја. У том смислу, мале акумулације играју

значајну улогу не само у подмиривању потреба за водом, већ и у стабилизацији и дугорочном планирању локалне привреде.

Интеграцијом водних акумулација у систем свеобухватних мелиорација, човек добија могућност да контролише природне процесе, елиминише ризике и осигура стабилност свог окружења. Применом савремених метода у обради земљишта, уз ретенционе, биолошке и друге мере, могуће је постићи одрживу равнотежу природних сила које узрокују ерозију, суше и поплаве.

2. ПОСЛЕДИЦЕ ФОРМИРАЊА ВЕШТАЧКИХ ЈЕЗЕРА

Вештачка језера се најчешће граде с циљем решавања једног или више основних проблема, као што су потреба за водоснабдевањем, производњом електричне енергије или заштитом од поплава. Међутим, изградња ових акумулација доноси и бројне пратеће проблеме, од којих су неки веома озбиљни. Додатно, иако су неки од ових проблема били обухваћени ранијим проценама, велики број последица остао је незапажен и често игнорисан.

Основни директни трошкови који су обухваћени проценама односе се на чишћење резервоара, изградњу нових стабених јединица за расељено становништво, накнаде за губитак земљишта и зграда, као и промену саобраћајница које ће бити поплављене. Међутим, велики број секундарних проблема, које је веома тешко квантитативно одредити у терминима користи и трошкова, остао је невидљив. У ову групу спадају:

- **Економски утицај на околину:** Изградња вештачких језера често подразумева измену локалне економије, што укључује промене у пољопривреди, туризму, као и утицај на регионалну производњу и запошљавање.
- **Промене у коришћењу земљишта и воде:** Формирање језера може променити начине коришћења земљишта, посебно у погледу пољопривреде, шумарства и других индустрија.
- **Социјални ефекти пресељавања:** Пресељавање људи због поплављених подручја доводи до социјалних и економских проблема, јер се морају изградити нови домови, а људи губе своје земљиште и изворе прихода.
- **Здравствени ризици:** Промене окружења могу утицати на здравље људи и њихових домаћих животиња, укључујући нове претње здрављу, чак и ако су стамбени услови побољшани.
- **Утицај на флору и фауну:** Вештачка језера могу променити услове живота за рибу и дивљач, те довести до губитка природних станишта.

- **Промене у пољопривредним условима:** У неким случајевима, могуће је побољшати пољопривредну производњу, посебно на сезонски плавленим земљиштима, али често то није довољно искоришћено.
- **Штетне биљке:** Водени корови и друга штетна биљка могу се брзо развијати у новим условима, што додатно компликује управљање акумулацијама.
- **Геолошки ризици:** Изградња вештачких језера може повећати ризик од земљотреса и клизишта, посебно у подручјима где је стабилност подземних слојева већ угрожена.
- **Микроклима:** Велика водена тела могу променити локалну микроклиму, што утиче на температуру и влажност, као и на биљни и животињски свет.

Изградња брана и пуњење вештачких језера са свим својим сложеностима и техничким изазовима много је лакша од решавања подређених социјалних, економских и еколошких проблема који се јављају пре, за време и после изградње. Управо због тога, за успешну реализацију ових пројеката неопходне су студије које могу бити груписане у различите категорије:

- **Економске студије:** Ове студије треба да разматрају више функција вештачких језера на регионалном нивоу, укључујући утицај на локалну економију и животни стандард становништва.
- **Социолошке студије:** Треба проценити ефекте који пројекат има на друштво, као што су миграција становништва и промене у друштвеним структурама.
- **Студије коришћења земљишта:** Планирање земљишта за пољопривреду, сточарство и шумарство важно је како би се максимално искористили ресурси и минимизирали губици.
- **Студије о развоју рибарства и управљању водама:** Важно је разматрати како управљати рибарством, као и контролисати квалитет воде и обнову подземних вода.
- **Јавноздравствене студије:** Потребно је анализирати све аспекте јавног здравља који могу бити угрожени променама окружења.
- **Истраживања штетних биљака:** Проучавање и контролисање раста водених корова и других штетних биљака који могу угрожавати екосистем.

Кроз свеобухватан приступ који укључује не само техничке и инфраструктурне аспекте, већ и социјалне, економске и еколошке импликације, могу се минимизирати негативни ефекти и обезбедити одрживост пројеката вештачких језера.

2.1. Економске и социјалне последице

Инвестирање у изградњу веће бране не би требало да почне док не буде потпуно доказано да је пројекат оправдан, не само са техничке, већ и из аспеката који се односе на коришћење земљишта, социолошке и економске аспекте. Потребно је извршити

детаљну анализу утицаја на национални и регионални развој, уз обавезну израду студије о процени утицаја на животну средину.

У пракси, оправданост пројекта и економско планирање често се ослањају искључиво на примарне циљеве, као што су производња електричне енергије, одбрана од поплава или снабдевање насеља и индустрије водом. Овакав приступ, иако разумљив са финансијског или политичког становишта, омогућава брзу и поједностављену анализу засновану на конкретним и поузданим цифрама. Међутим, када се пројекат планира искључиво на основу примарних циљева, многи секундарни утицаји могу бити предвиђени или игнорисани. Целокупни економски утицај секундарних проблема на регион може надмашити примарне ефекте, било позитивно или негативно.

Економске последице

1. Позитивне економске последице:

- Енергетска производња: Хидроелектране које користе акумулационе басене доприносе стабилности снабдевања обновљивом енергијом и смањењу зависности од фосилних горива.
- Наводњавање и пољопривреда: Вода из акумулације омогућава наводњавање околног земљишта, што може значајно унапредити пољопривредну производњу.
- Рибарство: Акумулације стварају услове за развој рибарства и аквакултуре, пружајући додатне изворе прихода локалном становништву.
- Туризам и рекреација: Вештачка језера често постају туристичке атракције, подстичући развој локалних угоститељских и рекреативних делатности.

2. Негативне економске последице:

- Губитак обрадивог земљишта: Потапање плодних површина смањује могућности локалне пољопривреде.
- Високи трошкови: Изградња брана захтева велика финансијска улагања која могу оптеретити локалне и националне буџете.
- Неусаглашеност активности: Непланирани развој секундарних активности као што су пољопривреда у приобалним подручјима, рибњаци и туризам може смањити економску ефикасност управљања водним ресурсима.

Социјалне последице

1. Позитивне социјалне последице:

- Запошљавање: Пројекти оваквих размера стварају привремена и трајна радна места током изградње и одржавања.
- Стабилност снабдевања водом: Вештачке акумулације обезбеђују стабилно снабдевање водом за локално становништво.
- Развој заједница: Побољшана инфраструктура и нове могућности за развој могу подићи квалитет живота у региону.

2. Негативне социјалне последице:

- Пресељење становништва: Потапање насеља често захтева дислокацију људи, што изазива социјалне тензије и нарушавање традиционалних заједница.

- Неједнака расподела користи: Често се користи од пројекта концентришу у урбаним центрима или у рукама великих компанија, док локално становништво остаје маргинализовано.
- Промене у начину живота: Пресељење и нови услови живота могу проузроковати дугорочне стресове и губитак културног наслеђа.

Усаглашавање примарних и секундарних користи

Проблеми који произилазе из секундарних ефеката могу изазвати озбиљне тешкоће уколико се не управља њима на одговарајући начин. Такве активности, попут коришћења околног земљишта за пољопривреду, рибњаке, пловидбу, рекреацију и туризам, могу значајно допринети економији региона. Међутим, њихов неорганизован развој може смањити економску корист и довести до конфликта између различитих намена воде.

Постизање више функција акумулације захтева свеобухватно планирање и договор о циљевима пројекта, како би се усагласиле примарне и секундарне користи. Интеграцијом економских, социјалних, политичких, инжењерских, правних и институционалних аспеката могуће је осигурати одрживи развој и максимално искористити потенцијал акумулационих басена.

2.2. Планирање употребе земљишта

Формирање акумулационог басена значајно мења структуру и намену земљишта у његовом окружењу. Потапање великих површина чини претходну употребу тог земљишта недоступном, што намеће потребу за темељним и свеобухватним планирањем употребе преосталих и новонасталих површина. Овај процес је од кључног значаја за економску, социјалну и еколошку одрживост новоформираног окружења.

Основни принципи планирања употребе земљишта

Планирање употребе земљишта није само основа за економску анализу изводљивости пројекта акумулације, већ представља и водиљу за рационалан развој новонастале средине и успешно поновно насељавање људи. Овај процес укључује свеобухватан преглед расподеле земљишта у различите категорије као што су урбанизација, пољопривреда, индустрија, туризам и транспорт. Основни циљ је повећање социјалног и економског напретка региона, уз очување природних ресурса.

Постоје два основна приступа планирању:

1. **Физички приступ:** Фокусира се на природне карактеристике земљишта, укључујући климатске, топографске, хидролошке и вегетацијске услове. Овај приступ полази од идеалног начина коришћења земљишта, игноришући постојеће институционалне и социјалне препреке.

2. **Аналитички приступ:** Полази од постојећих ограничења, као што су правни оквири, социјалне структуре и технолошки ниво, како би дефинисао могуће измене у коришћењу земљишта које су усклађене са актуелним условима.

Без обзира на приступ, вредност плана биће највећа ако укључује целокупно сливно подручје акумулације, јер то омогућава интегрални развој природних ресурса речног басена.

Кључни аспекти планирања

Просторна анализа и категоризација земљишта

Планирање употребе земљишта започиње детаљном анализом постојећег стања. Ова анализа укључује физичке карактеристике (топографију, климу, земљиште), институционалне и социјалне податке (власништво над земљиштем, демографске карактеристике) и економске факторе (производност земљишта, потенцијалне накнаде од употребе). На основу ових података, земљиште се распоређује у категорије које одговарају његовом најбољем могућем коришћењу.

Усклађивање употребе земљишта са циљевима развоја

Циљ планирања је интеграција различитих активности које се могу развијати у окружењу акумулације. Пољопривреда и рибарство су традиционалне активности које треба адаптирати новим условима, док се индустрија, туризам и транспорт могу развити као нови извори прихода. Оваква интеграција доприноси дугорочној економској стабилности региона.

Решавање питања расељавања и поновног насељавања

Један од највећих изазова формирања акумулационог басена је расељавање становништва. Планирање употребе земљишта мора да укључи изградњу нових стамбених објеката, школа, здравствених центара и инфраструктуре како би се обезбедили услови за квалитетан живот расељених лица. Осим физичких ресурса, потребна је значајна социјална и психолошка подршка како би се људи прилагодили новој средини.

Заштита животне средине

Планирање употребе земљишта мора узети у обзир и очување природних ресурса. То укључује одржавање водених екосистема, очување шума и спречавање ерозије. Одрживо коришћење природних ресурса кључно је за дугорочну стабилност екосистема и квалитет живота у окружењу акумулације.

Интегрални приступ

Планирање употребе земљишта у контексту формирања акумулационог басена треба да укључи економску анализу, техничке аспекте изградње, друштвене потребе и заштиту природе. Интегрални приступ омогућава координисан развој различитих сектора, као што су пољопривреда, рибарство, туризам и индустрија. Такође, овај приступ омогућава приоритетно реализовање појединачних пројеката који доприносе општем развоју региона.

Уз одговарајућу анализу и координацију и сложен процес који захтева мултидисциплинарни приступ, могуће је осигурати одржив развој који ће максимално

искористити потенцијале новонасталог језера и његовог окружења, доприносећи социјалном и економском напретку целог региона.

2.3. Друштвено – економске последице

Формирање акумулационог басена има дубоке и дугорочне последице на живот локалног становништва, економски развој и друштвену структуру. Док позитивни аспекти укључују могућности за економски напредак и развој инфраструктуре, негативни утицаји могу довести до озбиљних изазова за заједницу, посебно у домену расељавања и адаптације.

Позитивни утицаји

1. Економски напредак
 - Пружање могућности за модернизацију пољопривреде и развој рибарства.
 - Стварање нових извора прихода кроз рекреативне и туристичке активности.
 - Повећање доступности енергије и воде за индустријски развој.
2. Унапређење инфраструктуре
 - Изградња путева, стамбених објеката и јавних услуга као што су школе, здравствени центри и рекреативни објекти.

Негативни утицаји

1. Расељавање и адаптација становништва
 - Пресељење из подручја која ће бити потопљена често узрокује губитак друштвених веза и економске несигурности.
 - Потребна је изградња нових домова и јавне инфраструктуре, што изискује значајне финансијске и временске ресурсе.
2. Психолошке и социјалне последице
 - Људи су често суочени са губитком познатог окружења које је играло важну друштвену и психолошку улогу.
 - Недовољна подршка у процесу адаптације може довести до стреса, сукоба и демотивације.
3. Еколошки утицаји
 - Потапање плодних површина и деградација природних екосистема могу негативно утицати на дугорочну одрживост локалне заједнице.

Кључне мере за ублажавање последица

- Укључивање локалног становништва у планирање и одлучивање, како би се осигурао њихов осећај припадности и одговорности за пројекат.
- Обезбеђивање одговарајуће финансијске компензације и институционалне подршке расељенима.

- Примена искустава из претходних пројеката ради смањења трошкова и унапређења ефикасности адаптације.

2.4. Институционални аспекти

Изградња бране често пружа повољну прилику за увођење неопходних економских и социјалних структура. Ове структуре могу укључивати системе власништва над земљиштем (индивидуално или заједничко), кредитне институције или поновну поделу земље како би се створиле економски одрживе јединице за обраду. Поред тога, институционални оквири, као што су законодавство, организације за управљање водним ресурсима и финансијска подршка, играју кључну улогу у обезбеђивању одрживости и успешности пројекта.

Добро осмишљени институционални и социјално-економски програми могу значајно унапредити економски развој региона. То подразумева сарадњу између државних органа, приватног сектора и локалних заједница, као и укључивање становништва у процес планирања и одлучивања. Друштвено-економске студије треба да утврде прихватљиве пројекте и динамику њихове реализације од стране локалне заједнице, уз посебну пажњу на обезбеђивање компензација и нових економских могућности за расељено становништво.

Један од најефикаснијих начина помоћи новим досељеницима у близини акумулација је пружање институционалне подршке која омогућава максимизацију производње и зараде од рибака, пољопривреде и других делатности. Ово укључује успостављање водопривредних савеза, финансијских механизма за подршку пољопривредницима, као и програма обуке и подршке за развој нових занимања.

Стварање вештачког језера такође омогућава планирани развој различитих делатности, попут рибарства, пољопривреде, транспорта и рекреације. Институције за управљање водним ресурсима играју кључну улогу у осигурању стабилног снабдевања водом за различите производне сврхе и водени транспорт. Индустијски развој и насељавање у близини језера подстичу се кроз координисане напоре локалних и националних власти, што резултира стварањем нових људских заједница и подизањем животног стандарда.

2.5. Оцена изводљивости и финансијски аспекти

Процес формирања акумулационог басена захтева детаљну студију изводљивости која обухвата разматрање техничких, еколошких, социјалних и

економских аспеката. Циљ ове студије је да обезбеди свеобухватну процену трошкова, користи и утицаја пројекта, као и његове финансијске одрживости.

Оцена изводљивости подразумева мултидисциплинарни приступ:

1. Техничка изводљивост

- Анализа геолошких, хидролошких и топографских услова.
- Процена оптималног капацитета акумулације у односу на потребе, као што су водоснабдевање, енергетика, наводњавање и контрола поплава.
- Идентификација могућих алтернатива, као што су различите локације, висине бране и величина језера.

2. Еколошки аспекти

- Процена губитака услед потапања земљишта, укључујући уништење станишта, ретких врста, минералних ресурса и туристичких локација.
- Разматрање мера за ублажавање еколошких утицаја, као што су рехабилитација околног земљишта и очување биодиверзитета.

3. Социјални аспекти

- Анализа утицаја на локално становништво, укључујући расељавање и губитак извора прихода.
- Укључивање локалне заједнице у доношење одлука како би се осигурала друштвена подршка пројекту.

4. Економска изводљивост

- Губитак постојеће производње у поплавленим областима сматра се делом трошкова пројекта.
- Секундарни трошкови и користи, као што су развој пољопривреде, рибарства или туризма, могу имати значајан утицај на економску анализу.

Финансијски аспект обухвата различите трошкове и користи:

1. Почетни трошкови

- Изградња бране, инфраструктуре и система за дистрибуцију воде.
- Расељавање становништва и санација земљишта.
- Губици од потапања културно-историјских локалитета и природних ресурса.

2. Оперативни трошкови

- Одржавање бране и акумулације.
- Управљање водним ресурсима и мониторинг квалитета воде.

3. Економска корист

- Примарне користи: производња хидроенергије, побољшање водоснабдевања и наводњавања.
- Секундарне користи: развој рибарства, туризма, локалне економије и смањење ризика од поплава.

4. Расподела трошкова

- Расподела трошкова између примарних и секундарних активности омогућава боље поређење са алтернативним инвестиционим пројектима.

Студија изводљивости треба да прикаже тренутно стање, идентификује празнине у подацима и дефинише приоритетне активности. Она такође треба да нагласи могуће алтернативе, укључујући различите сценарије развоја, као што су пољопривреда, рибарство, туризам и енергетика. Овакав приступ омогућава интегрални развој природних ресурса и дугорочну одрживост пројекта.

3. ИЗБОР ЛОКАЦИЈЕ ЗА ОБРАЗОВАЊЕ АКУМУЛАЦИЈЕ

Акумулациони базени најчешће се класификују према количини воде коју могу да акумулирају. У нашој земљи најзаступљенија је класификација коју је развила Служба за коришћење земљишта и вода FAO организације. Ова класификација дели акумулације према капацитету воде који се у њима задржава: мале водне акумулације са мање од 3 милиона м³ воде, микроретенције са капацитетом до 30 хиљада м³ воде и оне са капацитетом до 10 хиљада м³ воде.

Поред тога, акумулације се могу груписати и на основу других критеријума, као што су висина бране, материјал од којег је брана изграђена, количина уграђеног материјала и слично. Без обзира на изабрану класификацију, било да је реч о вештачким језерима или акумулационим базенима, при избору локације за изградњу бране потребно је испунити одређене услове.

Кључни фактори који се узимају у обзир приликом одабира локације укључују: карактеристике сливног подручја, климатске услове, топографске особине, хидрогеолошке факторе, анализу наноса и потребе корисника.

3.1. Карактеристике слива

Неке карактеристике сливног подручја, као што су величина, пад и облик, површинска ретенција и густина каналске мреже, могу се релативно лако представити, за разлику од типова земљишта, матичног супстрата и биљног покривача. За хидролошку анализу, најважнији су величина, облик и пад слива, па ће ови елементи бити и приказани. Остали фактори нису занемарљиви, али њихова детаљна разрада зависи од конкретног случаја, на шта ће указати подлоге.

Величина сливног подручја представља пројекцију површине узводно од мереног профила. Ово је веома важан фактор у обликовању хидролошких величина, али та зависност није линерна, нарочито када су у питању екстремно велики протоци. Величина се обично одређује на топографским картама у размерама 1:100.000 или

1:50.000, у зависности од величине површине, уз претходно повлачење граница слива. Проблем настаје када се површинска и подземна вододелница не поклапају. Површинска вододелница је једноставно приказана на топографским картама, док су за положај подземне вододелнице веома важни геолошки услови подручја и смер кретања подземне воде. Некда се полазило од претпоставке да се површинска и подземна вододелница поклапају, што може довести до значајних одступања. На крају, може се рећи да улога величине слива расте са смањењем, а опада са повећањем површине слива.

Облик слива у великој мери утиче на концентрацију површинских вода, облик хидрограма велике воде и специфични максимални доток. За разлику од величине, облик слива није лако представити једном вредношћу.

Према Сребреновићу усваја се да је коефицијент концентрације (K) за различите облике сливне површине и представља се изразом:

$$K = \frac{2 \cdot F}{U \cdot O}$$

где су:

F – Површина слива,

U – Удаљеност профила од тежишта слива,

O – Обим слива.

Облик слива се може представити и на други начин, кроз однос даљина посматране тачке - површине и надморска висина - површина. Преко ових односа директно се долази до зависности хидрограма од облика слива. Уобичајени израз за представљање пада слива је израз који представља просечан пад терена.

$$J = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \cdot e}{F}$$

где су:

n – Број изохипси,

Z_i - Укупна дужина изохипси на сливу,

e - Еквидистанца изохипси,

F - Површина слива.

Дати однос не пружа хидрауличке карактеристике слива које одређују отицање. За прецизније одређивање, погоднији је средњи пад слива, који се добија анализом хипсометријских кривих линија. Овим приступом се добија боља представа о рељефу, због чега је обликовање хипсометријских линија веома важно.

$$S = \frac{2 \cdot \Delta A}{L}$$

где су:

S – Средњи пад слива,

ΔA – Висинска разлика између средње апсолутне висине слива и апсолутне висине тачке која се посматра,

L – Дужина фиктивног правоугаоника (геометријски облик који има исту концентрацију, површину и обим као слив у природи).

Утицај биљног покривача на величину и карактер отицања воде предмет је многобројних истраживања широм света. До сада је најчешће коришћен коефицијент пошумљености слива, али његова мана је што не узима у обзир друге површине осим шума, попут оних под вишегодишњим културама (пашњаци, воћњаци, виногради, итд.). Зато је при анализи сливних површина неопходно детаљно обухватити шумске површине, вишегодишње пољопривредне културе, орање и голети. На основу тога долази се до тзв. коефицијента вегетационог покривача. Лоша страна овог приступа је што не узима у обзир квалитет биљног покривача. Међутим, сигурно је да биљни покривач, нарочито шума, има значајан утицај на величину отицања, посебно у вегетационом периоду када је потрошња воде од стране биљака велика. Овај фактор мора се узети у обзир приликом одређивања максималног интензитета кише који изазива највеће отицање и проток у водотоку. На пример, киша истог интензитета у рано пролеће и лети неће изазвати исто отицање.

Осим анализе вегетационог покривача, важно је извршити и анализу **педолошких фактора** у посматраном сливу, обухватајући величину ПВК и инфилтрацију. Вредност ПВК, заједно са укупном инфилтрацијом и њеном брзином, представља кључне особине. Анализа ових елемената нарочито је значајна на малим сливовима, где њихов утицај може бити доминантан.

Отицање је део воде који, након падавина или топљења снега, долази до посматраног профила одмах након појаве кише. Преостала количина воде, занемарујући испаравање, долази у водоток подземним путем са знатним закашњењем. Део падавина који отиче назива се ефективном или нето кишом, док разлика између нето и бруто кише представља "губитак" (део кише који не доприноси отицању, углавном због инфилтрације). Отицање је део хидролошког циклуса који повезује падавине и отицање, а представља веома комплексан процес, који варира у зависности од низа фактора, чији се утицај може значајно разликовати.

Укупан отицај се састоји од четири компоненте:

- Q_{po} – Површински отицај,
- Q_{pp} – Потповршински отицај,
- Q_{pz} – Подземни отицај,
- Q_{pr} - Kiša koja pada direktno na površinu vodotoka.

Ова подела заснива се на путу којим вода долази до водотока, почевши од места где је пала, као и на емпиријским анализама хидрограма отицања. Иако је подела јасна, мерење свих компонената осим Q_{po} је практично немогуће или веома тешко.

3.2. Климатски чиниоци

На климу подручја превасходно утиче географска ширина, али она је подложна низу промена узрокованих секундарним факторима као што су надморска висина, близина водених површина и слично. Клима се често представља основним показатељима као што су средња годишња температура, висина падавина и средња месечна температура. Међутим, за хидролошку анализу, ови показатељи не пружају праву представу о стању, те је неопходно познавати средње годишње вредности, средње месечне вредности, екстремне годишње вредности, просечна одступања од средње годишње вредности, однос средње месечне и годишње вредности, екстремне месечне вредности, као и фреквенције за годишња, месечна, дневна и краћа трајања.

Температура одређене области представља директан показатељ количине сунчеве енергије коју та област прима. Уз падавине, температура је једна од кључних вредности у анализи. Просечна температура на Земљиној површини опада како се одмиче од екватора ка половима и са порастом надморске висине. Такође, близина већих водених површина стабилизује температурне осцилације, мада водене масе више утичу на дневне и месечне температуре него на годишње. У хидротехничким анализама посебно су значајне месечне и сезонске температурне варијације. Оне су кључне у процесу пројектовања, јер омогућавају процену испаравања са водених површина акумулација, брзину топљења снега и друге релевантне аспекте.

Падавине су климатски елемент који доминантно утиче на формирање отицања и климатске карактеристике подручја. Средња годишња висина падавина не пружа довољну слику о појавама које их узрокују. Посебно је важно показати сезонски распоред падавина у сливу, уз детаљну анализу олујних пљускова (краткотрајних киша јаког интензитета). Познавање висине, трајања, распореда и учесталости пљускова је неопходно за прерачунавање величине поплавне запремине акумулације и димензионисање преливних и испусних органа. Временска расподела може се дефинисати помоћу једног или више пљуивографа. За пљускове над малим површинама, типичне су интегралне криве кише у облику слова S, које добијамо модификацијом криве вршних падавина. Такве падавине неће имати исти интензитет на површинама већим од 10 км². Код проучавања олујних падавина, Сребреновић предлаже образац за одређивање интензитета кише, под претпоставком да се годишња висина падавина и интензитет мењају приближно линеарно.

Падавине су климатски елемент који има доминантан утицај на формирање отицања и климатске карактеристике неког подручја. Средња годишња количина

падавина не даје довољно прецизну слику о њиховом пореклу и динамици. Нарочито је важно анализирати сезонску расподелу падавина у сливу, као и детаљно проучити олујне пљускове, односно краткотрајне кише јаког интензитета. Познавање висине, трајања, распореда и учесталости оваквих пљускова неопходно је за израчунавање поплавне запремине акумулације и димензионисање преливних и испусних система. Временска расподела падавина може се дефинисати коришћењем једног или више плувиографа. За пљускове који захватају мале површине, карактеристичне су интегралне криве падавина у облику слова S, које се добијају модификацијом криве вршних падавина. Важно је напоменути да овакве падавине немају исти интензитет на већим површинама, преко 10 km². Постоји више формула које повезују интензитет и трајање падавина. Међутим, њихова примена код нас није успешна, јер нису утврђене локалне константе неопходне за примену у једначинама. Величина испаравања је један од кључних параметара, а за њено одређивање доступан је велики број емпиријских формула. У нашој земљи, за израчунавање евапорације и евапотранспирације, најчешће се користи Пенманова метода. Вредност испаравања са водене површине игра значајну улогу у изради водног биланса акумулационог базена. Због тога су поуздани мерени подаци од суштинског значаја. Грешке у процени испаравања приликом пројектовања могу угрозити планирану употребу акумулисане воде и довести до проблема у реализацији пројекта.

3.3. Топографски услови

Погодност изабране локације за формирање акумулације зависи од запремине базена која се може постићи изградњом планиране бране. Идеални услови укључују теснац у долини са малим уздужним падом (до 3%) и необрађене бокове долине. Погодност локације може се изразити односом $A/B > 4$, где (A) представља запремину акумулације, а (B) запремину земљане бране. За идеалан случај овај однос треба да буде преко 20, док за вредности од 4-10 требало би детаљно испитати локалне услове.

Основу за пројектовање чине карте и планови у размери 1:1.000 до 1:2.500, са изохипсама еквидистанце $e=1,0$ метар. За сам пројекат бране потребан је план у размери 1:250 до 1:1.000, који омогућава прецизно уцртавање преливних и испусних система.

Земљиште на којем се подиже брана мора бити водонепропусно и имати довољну носивост да издржи тежину бране и притисак воде. Ове карактеристике утврђују се истражним радовима и геомеханичким елаборатом. Посебна пажња се посвећује постојању клизишта у близини, јер пуњење акумулације може изазвати њихову активацију, што угрожава стабилност бране.

Ако у близини планиране локације постоји извор квалитетног земљаног материјала, израда земљане бране биће економичнија. Материјал се лабораторијски испитује како би се одредиле његове особине, укључујући гранулометријски састав,

границе конзистенције, пластичност, запреминску тежину (у природно влажном и засићеном стању), унутрашњи угао трења, водопропусност и кохезију потопљених узорака.

Најзначајнији фактори при избору локације за акумулацију су геолошки састав, положај и напајање подземних вода. Геолошки састав се утврђује системом истражних бушотина, док осматрање бунара пружа реалну слику кретања нивоа подземних вода.

3.4. Хидрогеолошки услови

Земљиште будуће акумулације често има сложен геолошки и литолошки профил, што захтева примену мера за контролу филтрације испод и око бране. Ове мере могу укључивати изградњу бетонских завеса и глинених темељних ровова који допиру до водонепропусног слоја. Неопходно је такође утврдити вододрживост акумулације и проценити укупне губитке воде кроз одговарајућа истраживања.

Познато је да до рушења хидротехничких објеката најчешће долази услед недовољно обимних или неадекватних истраживања. Исти недостаци могу узроковати одлагања и поскупљења у изградњи, проблеме током експлоатације, прекиде у раду, као и скупе санационе радове.

Да би се стекла јасна слика о хидрогеолошким својствима терена у зони будуће акумулације и бране, потребно је:

- Спровести регионално геолошко картографисање, уз детаљну анализу терена на којем се налазе бушотине за истраживање раседних зона и непропусних слојева.
- Извршити испитивања водопропусности, деформабилности, збијености, цементације и компактности терена.
- Поставити мрежу осматрачких бунара и на основу података израдити карте хидроизохипси за периоде пре и после пуњења акумулације.
- Анализирати подземне воде и испитати могућност погоршања њиховог квалитета за потребе наводњавања и водоснабдевања.

Хидрогеолошка истраживања корита и околине вештачког језера дају информације о губицима воде кроз дно и обале акумулације, као и о величини потопљеног квалитетног пољопривредног земљишта, стабилности обала и њиховом осигурању. Посебну пажњу треба посветити слојевима карбонатних стена и тектонски поремећених структура кроз које се вода може губити. На основу резултата, неопходно је идентификовати критичне зоне са највећим очекиваним губицима воде.

Пуњењем језера може доћи до прекомерног влажења околног земљишта, чиме се ствара зона подбаривања. Ову зону треба картирати и идентификовати објекте који захтевају заштиту. Забаривању су најчешће изложени пољопривредне површине и прве речне терасе.

Хидрогеолошки елаборат омогућава процену услова који ће владати у зони акумулације, као и дефинисање ограничавајућих фактора. Ово укључује водопрпусне слојеве који могу ограничити висину воде у језеру. У случају локализованих неповољних услова, могуће је применити санационе мере, као што су инјектирање или постављање глинених слојева, водећи рачуна о економској оправданости тих активности.

3.5. Анализа наноса

Нанос може изазвати значајне проблеме приликом уређења површинских вода, због чега је неопходно да се у оквиру сваког пројекта формирања акумулације, испита утицај одношења наноса са слива, преношења кроз водоток и таложења у акумулацији. Ово представља посебан изазов, јер се задржавање наноса у акумулацији често погрешно процењује, ослањајући се углавном на непоуздане емпиријске методе.

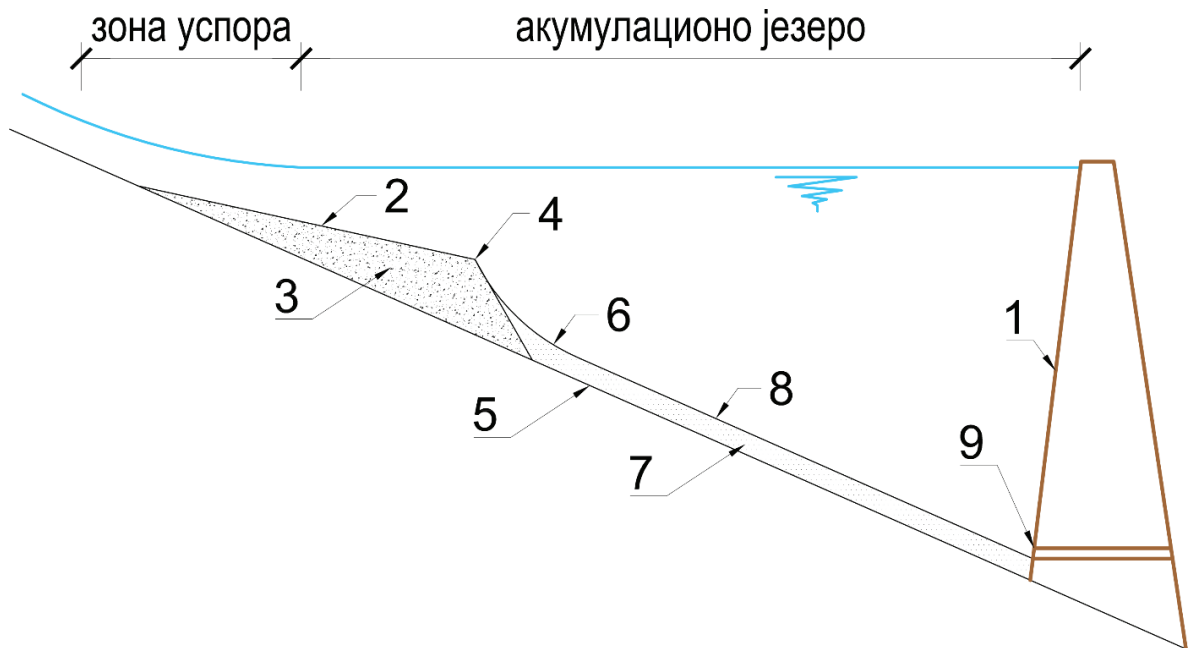
С обзиром на то да извори наноса могу бити различити (спирање, јаружна ерозија, флувијална ерозија, одрони, клизишта, јаловине из рудника, индустрија итд.), за изградњу акумулација од пресудног је значаја укупна количина наноса у посматраном профилу.

Количина наноса зависи од више фактора, укључујући:

- величину сливног подручја,
- климатске карактеристике слива,
- површинско отицање,
- еродибилност земљишта,
- степен разуђености слива,
- биљни покривач и
- начин коришћења земљишта.

Проучавајући својства наноса (облик, димензије и специфичну тежину честица) битно је испитати брзину седиментације и кретање наноса на основу чега се добија представу о количини наноса и његовим осталим битним карактеристикама. **Кретање наноса** у водним токовима представља екстремни степен неустаљеног, неједноликог течења. До неких приближних резултата о томе се може доћи једино изоловањем или упрошћавањем појединих случајева што не даје реалну представу појаве. Ипак, овим путем се у одређеној мери приближава решењу проблема.

Када се разматра **режим наноса**, за сливно подручје акумулације препоручује се извршити анализу ерозионих процеса. За процену годишње количине наноса по km^2 слива користе се различите једначине које су резултат истраживања спроведених како у свету, тако и код нас. Поред лебдећег наноса, посебну пажњу треба посветити и утицају вученог наноса (слика 24).



Слика 24. Распоред наслага наноса у акумулацији: 1 - Брана, 2 – Узводна косина, 3 – Крупана нанос, 4 – Средишња тачка, 5 – Речно дно бујичног тока, 6 – Низводна косина, 7 – Фини нанос, 8 – Пад дна акумулације. 9 -Темељни испуст

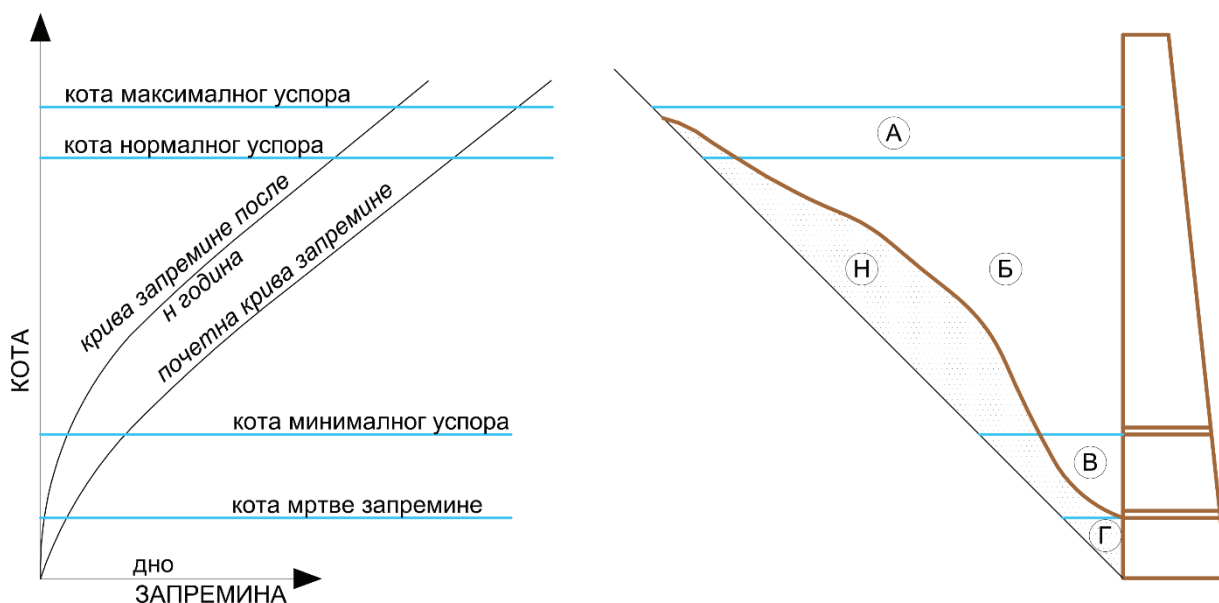
Уобичајено је мишљење да се овај тип наноса задржава у мртвом простору акумулације и да не представља опасност од даљег засипања. Међутим, савремена истраживања у природним условима и лабораторијама показују да вучени нанос ретко достиже мртви простор, али зато врло брзо попуњава плитки, корисни део акумулације као што је то приказано на слици 25. Овим се значајно умањује радни век акумулације, што указује на важност детаљног проучавања ерозионих процеса у сливу пре доношења коначне одлуке о локацији језера.

Прорачун **количине наноса** на основу потенцијалне ерозије је кључан за планирање развоја подручја. Иако постоје бројне емпиријске формуле за израчунавање ерозије, њихова примена је углавном ограничена на специфична подручја. За прецизну прогнозу наноса неопходно је осматрање, јер постоје значајна неслагања између метода чак до 1000% и то услед сложености одређивања кључних фактора као што су коефицијент ерозије, типа и еродибилности земљишта, и други.

Таложeње наноса у акумулацијама смањује њихову запремину, што директно утиче на капацитет прихватања поплавних таласа и повећава ризик од поплава низводно. Истраживања показују да је век трајања акумулација различит, али за већину се процењује на 50-100 година. Засипање наноса, нарочито у зони узводно од акумулације, представља посебан проблем.

Заштита акумулација од засипања укључује:

- Правилан избор локације и величине акумулације,
- Спречавање уливања и регулацију депоновања наноса,
- Извођење антиерозионих радова у сливу,
- Коришћење таложних базена и вегетационих завеса.



Слика 25. Подела простора у акумулацији: А – Резервна запремина, Б – Корисна запремина, В – Неактивна запремина, Г – Мртви простор (некорисна запремина), Н – Профилнаносних наслага после n година експлоатације

Повећање запремине акумулације ради дужег века може бити оправдано само економском анализом, нарочито за акумулације мале запремине у односу на сливно подручје, али то није трајно решење. Методи попут евакуације мутних струја или багеровања наноса су скупи и често неефикасни. Најбољи приступ је спровођење мера за борбу против ерозије у сливу пре изградње акумулације, уз свест о потенцијалном смањењу дотока воде након тих радова.

Савремена техника не може елиминисати ерозију, али је може успорити, што је најздравији приступ очувању акумулација.

3.6. Потребе корисника

Формирање акумулација и изградња брана представљају мултифункционалне пројекте који истовремено задовољавају широк спектар потреба корисника. Основне функције акумулационих басена укључују обезбеђивање воде за различите намене, заштиту од ерозије, суше и бујичних поплава, као и снабдевање водом насеља,

индустрије и пољопривреде уз паралелно развијање рибарства, туризма и рекреације. Произиласком од основних функција могу се дефинисати и основне потребе корисника:

1. Водоснабдевање

Обезбеђивање воде за пиће: Акумулације служе као сигуран извор питке воде за становништво, уз неопходну константну контролу квалитета воде.

Наводњавање: Стварају резерве воде за пољопривреду, посебно током сушних периода, допуњујући разлику између малог дотока водотока и потреба за наводњавање.

Индустријска употреба: Вода из акумулација се користи у различитим индустријским процесима.

Уколико је могуће, наводњавање се организује гравитацијом како би се избегла додатна потрошња енергије. У случају да ово није изводљиво, одређују се локације за водозахвате. У Србији може се рећи да готово сва земљишта могу бити погодна за наводњавање уз примену одговарајућих мера. Однос потопљене површине и површине која се може наводњавати треба да износи од 1:5 до 1:8. Ако је овај услов испуњен, као и услов да је однос утрошеног земљаног материјала за изградњу бране и количине акумулисане воде минимално 1:4 до 1:10, може се закључити да је у нашим условима изградња акумулација економски оправдана.

2. Контрола поплава

Регулација отицања: Акумулације играју важну улогу у спречавању поплава, задржавајући и регулишући поплавне таласе.

Активна контрола поплава: Простор акумулације омогућава прихват дела поплавног таласа, док се остатак воде контролисано испушта кроз евакуационе системе. Ово смањује ризик од оштећења низводно.

Контрола поплава акумулацијама заснива се на активној регулацији. Простор акумулације за прихват поплавних таласа мора увек остати празан пре очекиваног повишења водостаја. Основни принципи укључују:

- Пријем, задржавање и безбедну евакуацију дела поплавног таласа у акумулацији.
- Вишак воде од поплавног таласа се евакуише преко евакуационих органа.
- Простор за прихват поплавног таласа у акумулацији мора бити празан уз предвђање непосредног пражњења акумулације пре надоласка поплавног таласа.
- Испуштање воде је неопходно у контролисаним количинама које неће изазвати штету низводно.
- Димензионисање бране и евакуационих органа треба да буде такво да обезбеде стабилност и сигурност.
- Мањи таласи вишка воде у акумулацији регулишу се путем прелива или темељног испуста.
- Заштиту од поплава обезбеђује служба прогнозе расподеле испуштања воде што представља стручно управљање могућностима акумулације.

3. Еколошке функције

Заштита биодиверзитета: Акумулације могу обезбедити замену за изгубљена станишта.

Очување квалитета воде: Потребно је одржавати квалитет воде како би се избегла еутрофикација и загађење.

Обезбеђење биолошког минимума: Испуштање воде из акумулације мора обезбедити минималну количина воде у низводном водотоку која је неопходна да би се очувала природна равнотежа и одржао живот водених организама, као и да би се спречиле негативне последице по екосистем. Овај проток је важан за обезбеђивање оптималних услова за живот биљних и животињских врста које зависе од водених станишта, као и за спречавање загађења и деградације водотока.

4. Социо-економски аспекти

Развој туризма и рекреације: Вештачка језера могу постати привлачна дестинација за туризам, рибарство и спортове на води.

Подршка локалној економији: Различите активности на и око акумулације могу значајно повећати приходе локалне заједнице.

Вештачка језера постају средиште за бројне активности, попут купања, спортова на води, риболова и рекреативног рибарства. Развој ових активности доприноси расту прихода и побољшању квалитета живота у околини акумулације. Стабилан ниво воде и адекватан квалитет су од суштинске важности за развој објеката на обали и организацију ових активности.

Противречности и баланс између захтева корисника

Акумулације задовољавају различите потребе корисника, а захтеви ових корисника често су у супротности. На пример, пољопривреда захтева што већу количину воде у вегетационом периоду, док заштита од поплава захтева остављање дела акумулације празним ради прихватања поплавног таласа. Са друге стране, рекреација и туризам теже што стабилнијем нивоу воде, што може бити у сукобу са сезонским осцилацијама потребним за друге намене.

Баланс између ових захтева постиже се већ у фази пројектовања, где се дефинишу корисна запремина акумулације, њена намена и режим коришћења, као и кроз оперативно управљање водним ресурсима.

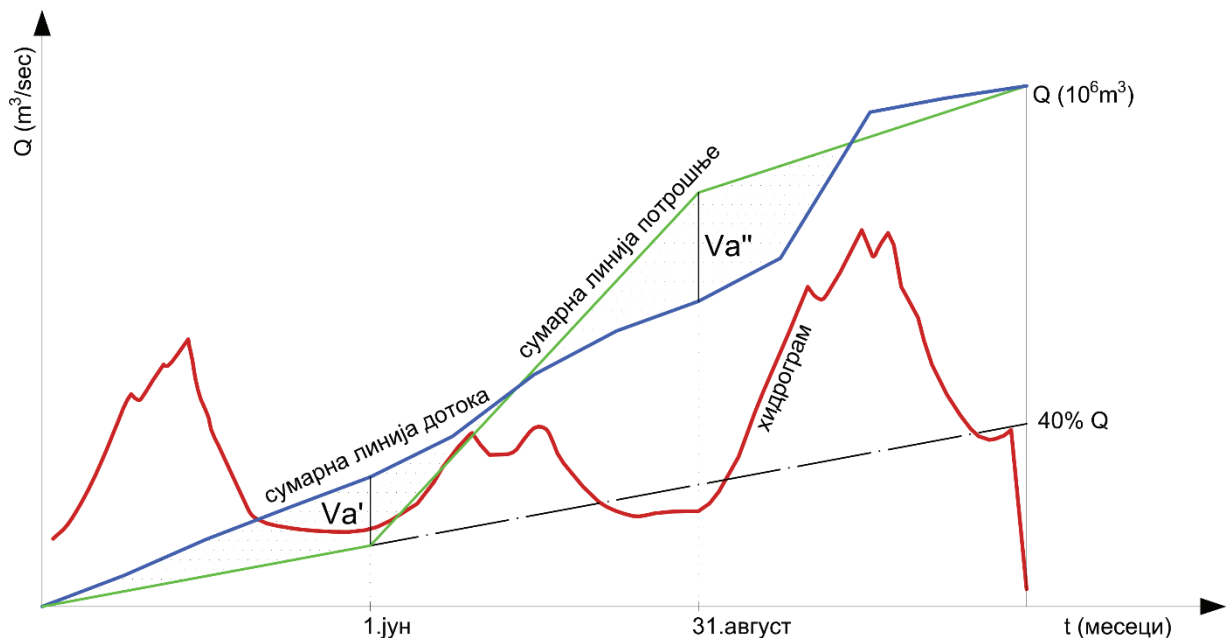
3.7. Одређивање корисне запремине акумулације

Корисна запремина акумулације одређује се анализом следећих фактора:

- **Хидролошких услова:** Проток реке, сезонске варијације и екстремни услови као што су суше или поплаве.

- **Потреба корисника:** Планирана потрошња воде за пиће, наводњавање, индустрију, рекреацију и одржавање биолошког минимума.
- **Губитака воде:** Испаравање, процеђивање и евентуални технички губици.
- **Сигурносних услова:** Запремина резервисана за прихват поплавних таласа.

На основу ових параметара врши се детаљна анализа која укључује прорачун минималних, просечних и максималних дотока, као и сценарије екстремних ситуација. Резултат је дефинисање оптималне корисне запремине која омогућава дугорочно одрживо коришћење ресурса. Поред детаљних анализа и прорачуна, може да се користи и графоаналитички метод за одређивање оквирних поредбних количина воде у акумулацији, као што је то приказано на слици 26.



Слика 26. Графоаналитички метод одређивања корисне запремине у акумулацији

3.8. Управљање акумулацијама

Ефикасно управљање акумулацијама заснива се на диспечерским дневницима и правилницима о коришћењу акумулационог простора:

Диспечерски дневници садрже оперативне планове који укључују дневне распореде коришћења воде, узимајући у обзир тренутне и прогнозиране дотоке и потрошње.

Правилници о коришћењу дефинишу дугорочна правила управљања, укључујући приоритете коришћења, дозвољене осцилације нивоа воде, управљање током поплавних таласа (процедуре за испуштање током поплава) и поступке у кризним ситуацијама.

Ови документи омогућавају флексибилно прилагођавање коришћења воде у складу са захтевима корисника, осигуравајући истовремено да се простор за прихват поплавних таласа и очување еколошког баланса не угрожава.

3.9. Режији изравнања у акумулацијама

У зависности од своје намене, акумулације могу вршити дневно, месечно, сезонско, годишње или вишегодишње изравнање. Ове категорије говоре о томе како се задржана вода користи и распоређује:

Дневно изравнање: Регулише се током једног дана како би се задовољиле тренутне потребе, попут снабдевања водом, наводњавања или одржавања биолошког минимума.

Месечно изравнање: Омогућава прилагођавање нивоа воде променама у захтевима током месеца, као што су потребе за водом за одређене пољопривредне културе.

Сезонско изравнање: Обухвата складиштење воде током периода обилних падавина (зима и пролеће) и њено коришћење у сушним месецима (лето), што је кључно за наводњавање и одржавање екосистема.

Годишње изравнање: Регулише се на основу дугорочних хидролошких и климатских циклуса како би се осигурало довољно воде за целу годину.

Вишегодишње изравнање: Омогућава планирање у условима са већим осцилацијама у дотоку воде током више година, осигуравајући стабилност снабдевања чак и у периодима дуготрајних суша. Ово изравнање се највише односи на акумулације са великим количинама воде.

За мале акумулације, према класификацији FAO, најчешћа улога је сезонско или годишње изравнање. Како би се одредила потребна корисна запремина, неопходно је детаљно анализирати критичне услове – екстремно високе и ниске дотоке воде, као и очекивану потрошњу.

Акумулације су сложени системи који задовољавају различите потребе. Њихова изградња и управљање захтевају детаљне анализе, усклађивање приоритета корисника и примену савремених метода планирања. Са добро планираним приступом приликом димензионисања и извођења, експлоатација акумулације може постати важан ресурс за економски и еколошки одржив развој.

4. ИЗБОР МЕСТА И ВЕЛИЧИНЕ **АКУМУЛАЦИЈЕ**

Избор места за изградњу бране подразумева састављање свеобухватних студија на основу којих се доноси одлука о њеној величини, положају на водотоку и врсти. Намена акумулиране воде одређује расподелу воде током године, што директно утиче на запремину будућег језера. Место за брану је у великој мери усмерено потребном запремином језера и може се прилагодити теренским условима у ограниченом простору. Тип бране мора бити прилагођен својствима подлоге. Ако је подлога чврста и отпорна са малим деформацијама, разматрају се различити типови масивних брана – бетонске лучне, лучно-гравитационе, олакшане или масивне, а у ретким случајевима и зидане. Разни типови насутних брана могу бити разматрани само ако постоји економска оправданост.

Ужи избор места за насуту брану зависи од следећих фактора:

- Морфолошке карактеристике профила, које утичу на запремину бране,
- Геолошке карактеристике подлоге, које утичу на њену пропусност,
- Могућности и проблеми евакуације воде из акумулације,
- Присуство и положај раседа и дисконтинуитета у близини бране, који могу представљати путеве за циркулацију воде испод или око бране,
- Чврстоћа и стишљивост подлоге.

Када има више опција за место изградње бране, одлука зависи од:

- Промена у кубатури акумулације с променом висине и положаја бране,
- Запремина бране и трошкова изградње, уз осигурање исте безбедности на различитим местима,
- Специфичних проблема као што су ризици у вези са темељима и припремом подлоге,
- Услови за постављање хидротехничких објеката (прелива, темељног испуста, деривационих органа за време грађења, доводних органа за коришћење воде - доводни тунел до хидруелектране или до испуста за регулисано провођење воде),
- Услови за евакуацију воде током изградње,
- Налазишта материјала за изградњу бране,
- Могућности развоја комуникација за допрему материјала.

Најповољније место ће бити одабрано елиминацијом профила на основу анализе економске исплативости, безбедности и функционалности. Први корак је разматрање различитих профила на карти користећи студије морфологије и геологије, чиме се суже могуће опције. Студија избора профила почиње најужим профилима, а

рекогносцирањем терена треба проценити услове који намећу геолошки и тектонски односи. Ако су ови услови проблематични, разматрају се и други, мање повољни профили. У случају недоумица, потребна су претходна истраживања методом бушења и геофизике како би се добиле информације које ће помоћи у доношењу одлуке. Након одабира најпогоднијег профила, спроводе се детаљна испитивања.

Суштина проблема није у томе да ли су објекти класификовани као мали или велики акумулациони системи, већ у избору да ли изградити једну или две веће акумулације, или већи број малих акумулација на једном водотоку или на више водотока у посматраној области. Одлука не би требало да буде подложна дилемама ако се равноправно узму у обзир сви услови и критеријуми. Међутим, постоји уобичајено правило да се мала акумулација не гради у великом сливу јер постоји ризик да буде засејана наносом, док изградња велике акумулације у малом сливу носи специфичне проблеме, од којих је најзначајнији тај да ће акумулација тешко бити довољно напуњена. За мале акумулације, хидролошке анализе се углавном раде на основу емпиријских формула и хидролошких података из суседних сливова. Улагања за добијање кубних метара воде су, у већини случајева, најмања за велике акумулације, а највећа за мале. Експлоатациони трошкови су, по правилу, највећи у великим системима. За мале акумулације обично се потапа земљиште лошег квалитета, док се код великих акумулација потапа квалитетније земљиште.

Величина или запремина акумулације зависи од великог броја параметара, од којих су најзначајнији:

- Природни услови на месту изградње и акумулационог простора,
- Режим вода и наноса на водотоку где се налази прекидно место,
- Намена акумулације,
- Режим и потребе коришћења акумулације,
- Карактеристике водoprивредног система на коме се налази акумулација,
- Друштвено-економски, социјални и еколошки услови у зони будуће акумулације и др.

Ови бројни параметри који утичу на могућу и потребну величину акумулације указују на то да је њено димензионисање или избор оптималне запремине сложен вишекритеријумски задатак. Прелиминарним дефинисањем циљева реализације одређене акумулације и одређивањем критеријума за оптимални избор њене величине потребно је посветити пуну пажњу. Ови циљеви зависе од намене акумулације, њеног места и улоге у водoprивредном систему, као и од економских, еколошких и других параметара везаних за њену реализацију.

Уопштено, запремина акумулације може бити подељена у три основна дела:

- Корисна запремина,
- Запремина резервисана за ублажавање поплавног таласа или одбрану од поплава,
- Мртви простор резервисан за задржавање наноса или запремина одређена најнижом котом захвата воде.

Сваки од ових делова запремине акумулације може бити одређен појединачно, а укупна запремина добија се њиховим сабирањем. Између ових делова постоје међусобни утицаји. Међутим, у свим анализама највише пажње се посвећује корисној запремини, нешто мање запремини за одбрану од поплава, а најмање мртвом простору, који иако увек постоји, често чини велики део укупне запремине акумулације.

За решавање задатка одређивања величине корисне запремине акумулације, углавном су коришћене три групе метода:

- Методе интегралних кривих или графоаналитичке методе билансирања дотока и потрошње,
- Аналитичке методе за брзо одређивање запремине:
 - Метода базирана на критичном периоду,
 - Метода базирана на матрицама прелазних вероватноћа,
 - Метода базирана на генерисаним подацима,
- Систематске методе:
 - Симулативни поступак,
 - Оптимизациони поступак.

5. КЛАСИФИКАЦИЈА БРАНА

Бране се класификују према више критеријума, зависно од њихове трајности, висини, начина изградње, материјала који се користе, као и од услова у којима се налазе.

Према трајности, бране могу да буду привремене када се користе за краткорочну употребу, обично током грађевинских радова, и трајне када се пројектују за дугорочну употребу.

Према висини једини званичан критеријум за поређење брана према висинама је Правилник о техничком осматрању високих брана (Сл. гл. СР Србије од 16.2.1966. године) и према њему бране се у нашој земљи деле на ниске до 15 m и високе преко 15 m. Ако је висина бране између 10 и 15 m, сматрају се високим ако испуњавају један од критеријума: дужина у круни већа од 500 m, запремина акумулације већа од 1.000.000 m³ и протицај преко прелива већи од 2.000 m³/s. Према америчким стандардима USBR (United States Bureau of Reclamation), бране се деле на: ниске (low dams) – до 30 m, средње висине (medium dams) – од 30 до 90 m и високе (high dams) – преко 90 m. Док се према руским стандардима СНиП (Строительные Нормы и Правила), бране се деле на: ниске бране: висине до 10 m, средње високе бране: висине од 10 m до 50 m и високе бране: висине преко 50 m. Према руском стандарду класификација брана према висини зависи и од врсте материјала па класификација брана се спроводи како је то приказано у табели 17.

Табела 17. Класификација брана према висини и врсти материјала

БРАНЕ	Ниске	Средње	Високе	Врло високе
Земљане	< 15 m	15 - 20 m	> 50 m	
Камене	< 20 m	20 - 70 m	70 - 150 m	> 150 m
Бетонске	< 40 m	40 - 100 m	> 100 m	

Приликом градње брана, основни циљ је коришћење квалитетног материјала који је доступан у близини градилишта, чиме се значајно смањују трошкови изградње. Најчешће се примењују гравитациона решења – конструкције које својом тежином пружају отпор статичким и динамичким утицајима акумулисане воде. **Према врсти уграђеног материјала**, бране се деле на следеће категорије:

1. Бетонске бране најчешће се користе због њихове отпорности, дуговечности и могућности примене у различитим условима. Разликују се према облику:

- Праволинијске и
- Лучне.

Према функционалности бетонске бране могу бити:

- Гравитационе,
- Олакшане и
- С контрафорама.

2. Меке бране су обично привремене конструкције или специјалне врсте брана које се користе у специфичним условим. Могу бити:

- Отворене и
- Затворене (врећасте).

3. Камене бране се користе у условима где је камен лако доступан. Постоји неколико подтипова:

- Камен зидан у суво,
- Камен зидан са везивом и
- Камени набачај.

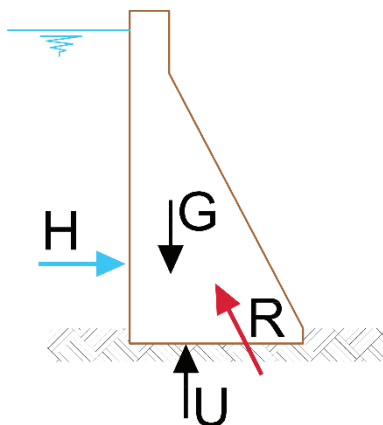
4. Земљане бране су међу најчешће коришћеним због доступности материјала и економичности. Изграђене су од земљаног материјала и разликују се према начину изградње:

- Насуте бране (Хомогене и зониране) и
- Рефулисане бране.

5.1. Бетонске бране

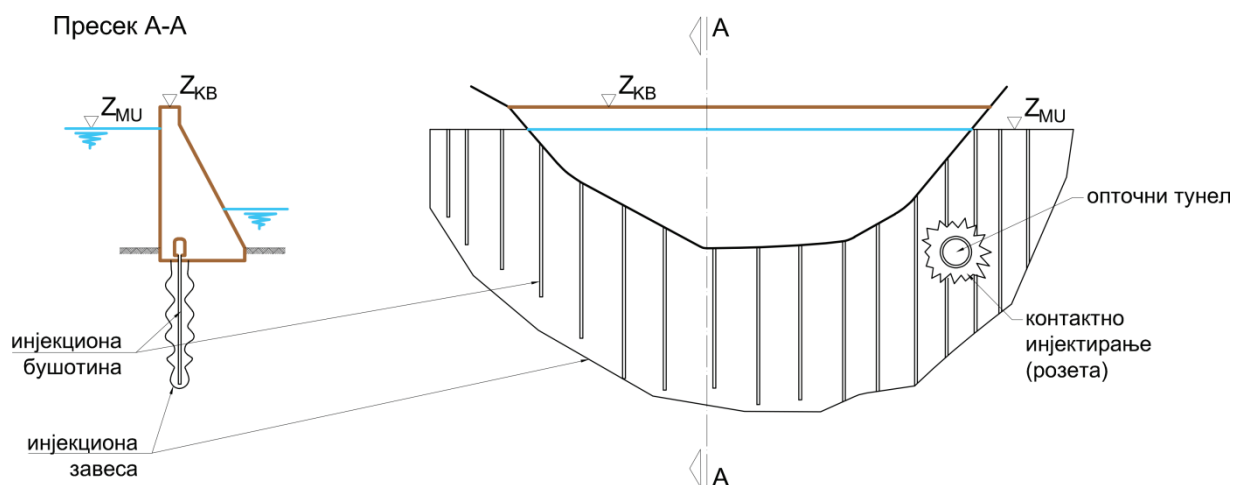
Хидротехнички објекти који служе за задржавање воде, регулисање њеног протока, производњу електричне енергије, снабдевање водом, наводњавање или заштиту од поплава и ерозионих процеса, граде се поред бетона, често у комбинацији са армираним челиком како би се повећала отпорност на притиске и напрезања.

Гравитационе бетонске бране у специфичним случајевима представљају веома економично решење, нарочито када се граде на стеновитој подлози и када је потребна већа висина бране. У таквим условима, изградња земљаних брана захтевала би веома велику количину материјала. Важно је напоменути да се гравитационе бетонске бране могу градити и на нестеновитој (земљаној) подлози ако је пројектом предвиђена преливна брана, што чини употребу других материјала неприкладном. Ове бране се граде још од средњег века, а свој врхунац доживеле су у 19. веку. Током времена, попречни пресек ових брана развијао се од правоугаоног, преко трапезног, до данашњег облика блиског троуглу.



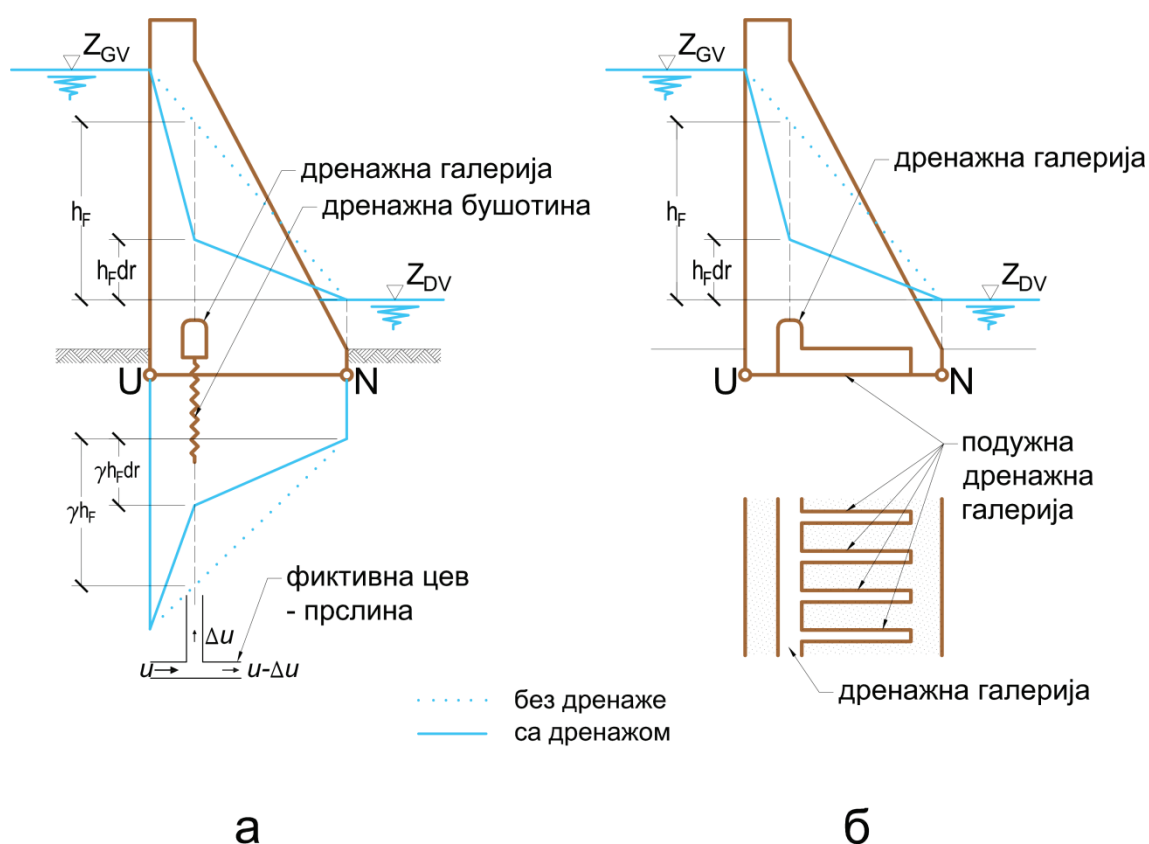
Слика 27. Преношење оптерећења код гравитационе бране

Постоје два основна типа гравитационих бетонских брана: масивне и олакшане. На бетонску брану делују различите силе, укључујући сопствену тежину, хидростатички притисак, притисак таласа, притисак леда, притисак наноса, сеизмичке силе и потисак (слика 27). Величина потиска, као најнеповољније силе, смањује се применом конструктивних елемената као што су зуб, инјекциона завеса (слика 28) и дренажа.

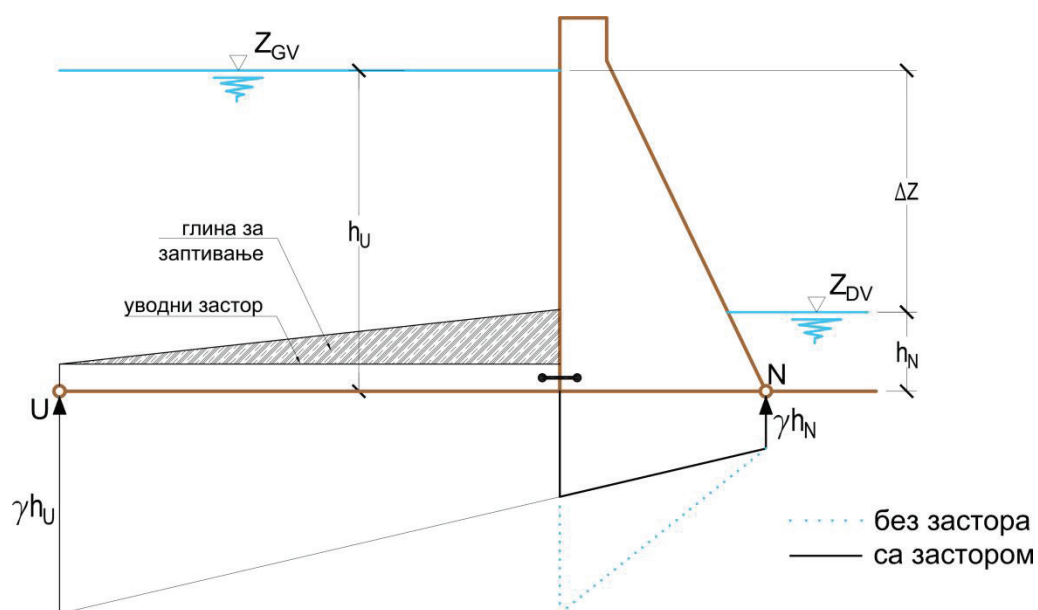


Слика 28. Инјекциона завеса у попречном и подужном пресеку гравитационе бране

Смањивање узгона може се обезбедити применом вертикалних решења попут дренава/бушотина испод темеља или хоризонталних решења у виду подужних галерија као што је то приказано на сликама 29 и 30.



Слика 29. Смањивање узгона дренажом: а – дренажа са бушотинама, б – дренажа са подужним галеријама



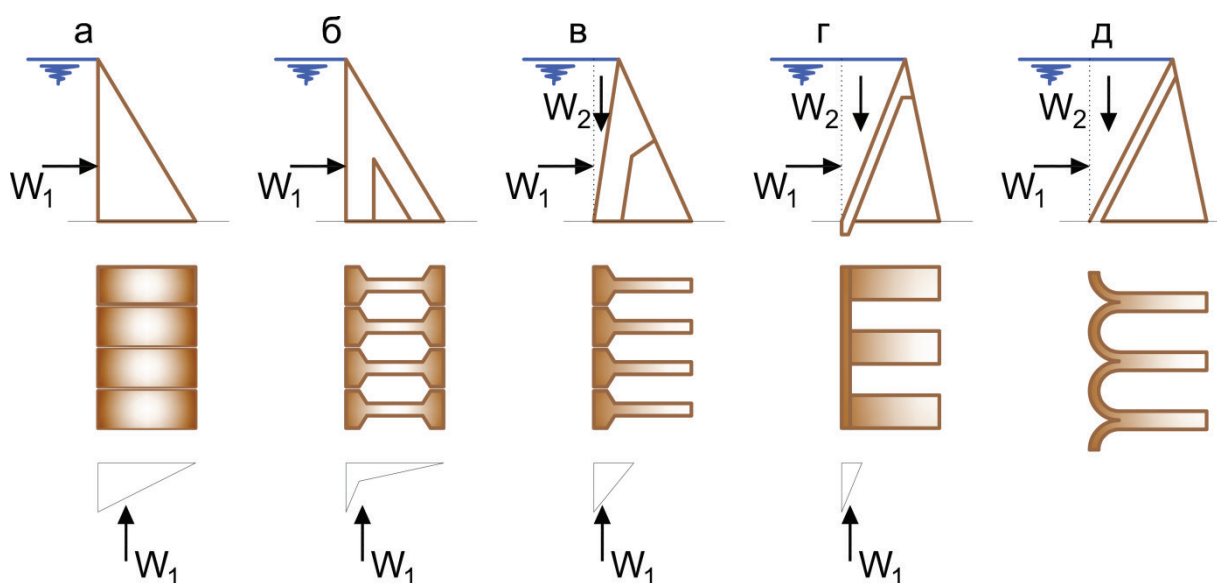
Слика 30. Смањивање узгона хоризонталним решењем – уводним застором

Табела 18. Примери гравитационих брана

Карактеристике гравитационих брана		
Гранд Диксанс, Швајцарска Висина 285 m Ширина 700 m Запремина 400 000 000 m³ * Највиша бетонска гравитациона брана на свету		
Токтогул брана – Киргистан Висина 150 m Ширина 804 m Запремина 187 000 000 m³		

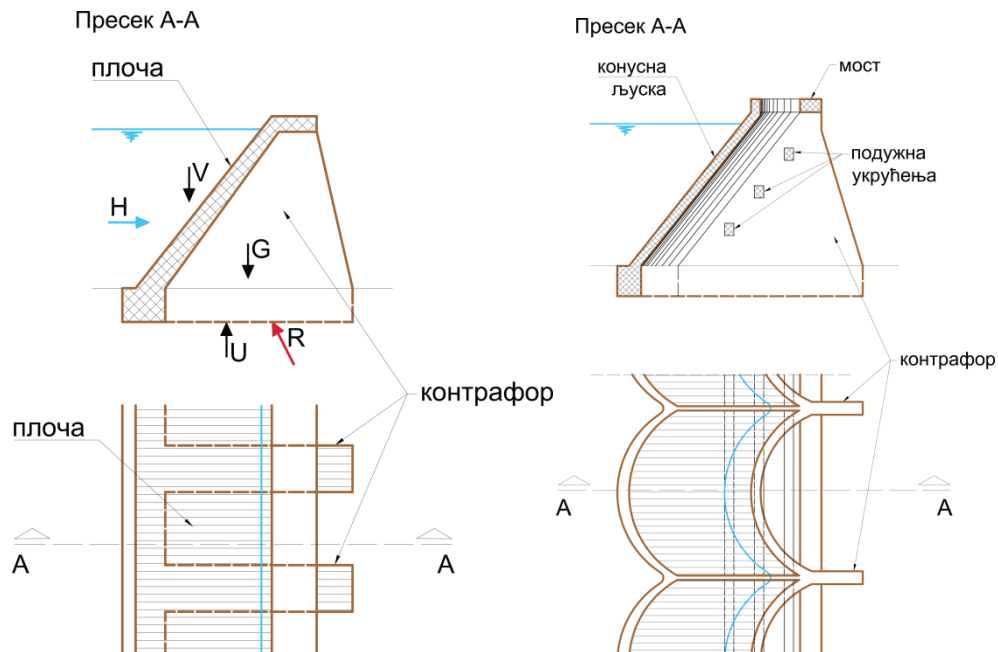


Једно од кључних питања у пројектовању ових брана је како смањити количину уграђеног бетона. То је постигнуто увођењем олакшаних бетонских брана, које лакше подносе температурне промене и неравномерна слегања, изводе се у елементима и омогућавају једноставније надгледање функционисања бране. Међутим, њихова конструкција је сложенија, а неопходно је решити и проблем негативног утицаја леда у спојевима (шавовима) између елемената. На слици 31. приказан је развој олакшавања тела бране са њиховим оптерећењима.



Слика 31. Развојни ток олакшано гравитационих брана: а – масивна гравитациона брана, б – олакшана гравитациона брана са шупљинама, в – брана са контрафорама и масивном главом, г – брана са контрафорама и равном плочом, д – више лучна брана са контрафорама

Повећавањем шупљина унутар олакшаних бетонских брана долази се до тзв. масивних бетонских брана са контрафорама. Код овог типа брана узводни нагиб је блажи у односу на низводни, тако да тежина воде изнад облоге преузима улогу тежине саме бране.



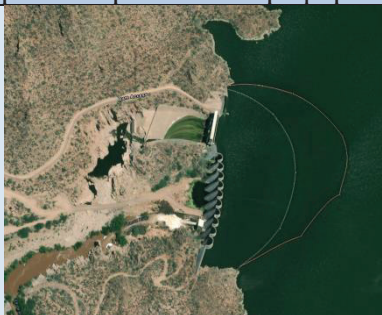
Слика 32. Преношење оптерећења код бране са контрафорама

Постоје различити облици ових брана: масивни облици, бране са шупљинама и као крајњи облик бране са контрафорама које могу имати масивну главу или равну плочу. Бране са контрафорама бране могу бити рашчлањене са равном плочом или лучне као што је то приказано на слици 32.

Иако имају бројне повољне карактеристике, ове бране нису постале популарније од класичних масивних брана. Разлог за то је у чињеници да сложена конструкција захтева компликовану организацију радова, обухвата велику површину облоге, постоји значајна опасност од испирања танког слоја бетона облоге, а потребан бетон мора бити знатно квалитетнији (и скупљи) у односу на онај који се користи у масивним бранама.

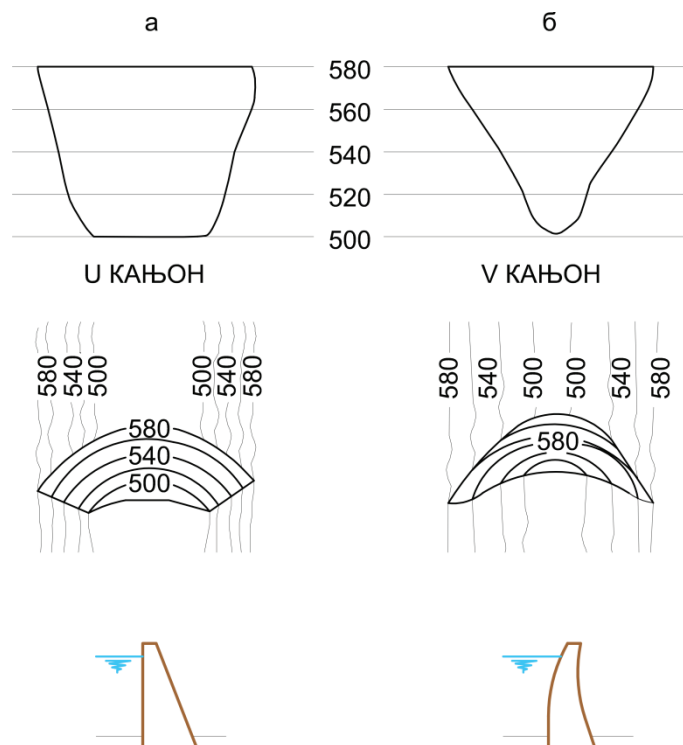
Неки од примера брана са контрафорама су приказани у табели 19.

Табела 19. Примери брана са контрафорама

Карактеристике олакшаних брана и брана са контрафорама		
Бартлет - Аризона, САД Висина 94 m Ширина 251 m Запремина 291 789 000 m ³		

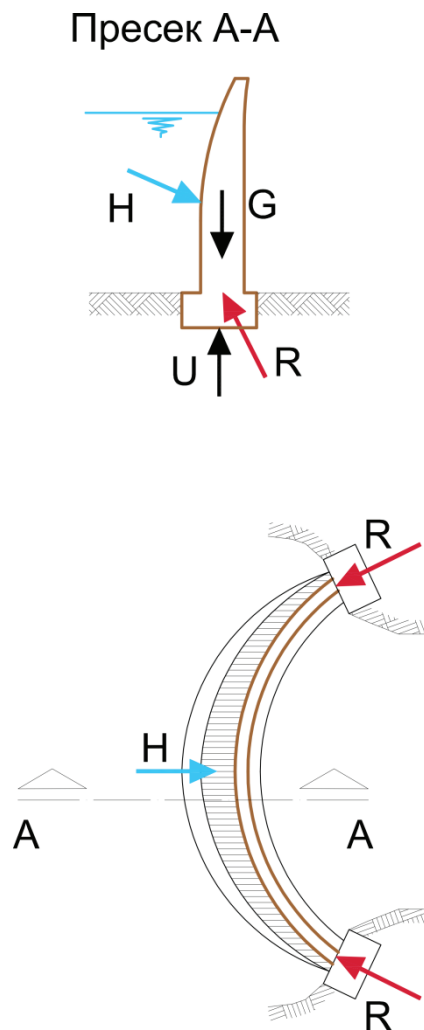
Роусленд – Француска Висина 150 m Ширина 804 m Запремина 187 000 000m³		
Зворник – Србија Висина 41,5 m Ширина 450 m Запремина 126 000 000m³		

Лучне бране користе се за преграђивање узаних и дубоких речних долина са стеновитим обалама, које обезбеђују довољну чврстоћу и стабилност. Овај тип брана најбоље функционише у долинама троугластог попречног профила, мада је примена могућа и у другим облицима корита што је и приказано на слици 33.



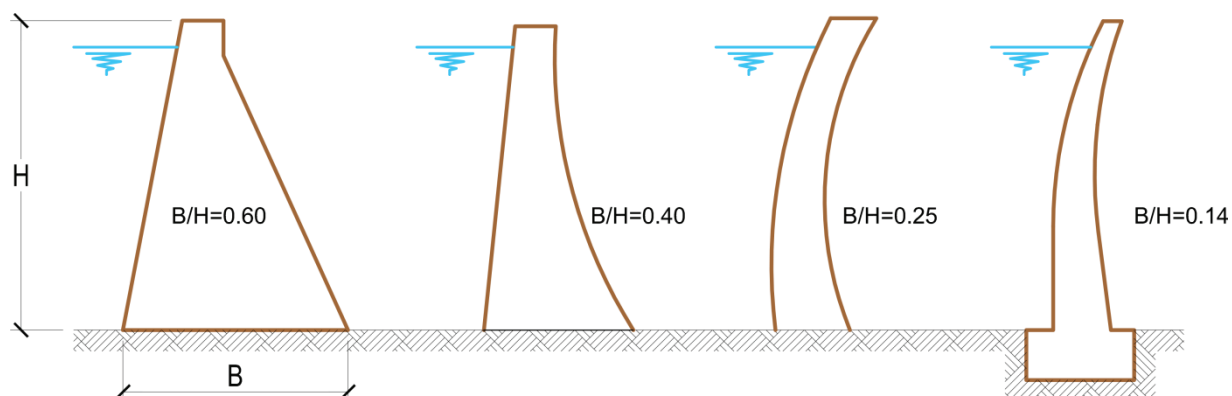
Слика 33. Изглед лучне бране у различитим долинама у подужном и поречном профилу

За разлику од других бетонских брана, лучне бране преносе оптерећење углавном дејством лука на бокове долине, док је дејство потпорног зида занемарљиво (слика 34).



Слика 34. Преношење оптерећења код лучне бране

Могу бити у облику лучно-гравитационих брана или танких (љускастих) лучних брана. Код лучно-гравитационих брана, лук пружа додатну стабилност потпорном зиду. Однос ширине у дну бране према њеној висини значајно варира како је то и приказано на слици 35. Код лучних брана овај однос износи од 0.1 до 0.4, док је код лучно-гравитационих брана нешто већи, од 0.5 до 0.6. Лучне бране захтевају мање бетона (10–15%) у односу на друге бетонске бране, али захтевају скупљи бетон и омогућавају савладавање већих висина.



Слика 35. Изглед лучних брана у односу различитих висина и ширина

Посебна пажња се мора посветити испитивању чврстоће и водопропусности стеновитих обала на које ће брана бити ослоњена, јер су то фактори који су кључни за стабилност и дуготрајност конструкције. Неки од примера брана са контрафорама су приказани у табели 20.

Табела 20. Примери лучних брана

Карактеристике лучнич бетонских барана		
Ингури - Грузија Висина 272 m Ширина 292 m Запремина 15 000 000 m ³		
Мратиње – Црна Гора Висина 220 m Ширина 296 m Запремина 880 000 000m ³		
Гружа – Србија Висина 52,5 m Ширина 300 m Запремина 64 000 000m ³		

5.2. Меке бране

Примена меких брана у хидротехничком грађевинарству представља револуционарну промену у приступу изградњи објеката за управљање водама. Оне су почеле да се користе крајем педесетих година прошлог века, иако су први експериментални објекти направљени већ тридесетих година.

Меке бране се заснивају на употреби конструкција од синтетичких опни које примају искључиво затезна напрезања. Њихова шира примена дуго је зависила од развоја висококвалитетних синтетичких материјала који могу да издрже велика напрезања, обезбеде трајност и задовоље захтеве објеката великих димензија (нпр. распон до 100 метара и висина 2–4 метара). Савремени синтетички материјали омогућили су добијање опни које су истовремено изузетно отпорне и трајне, чиме је омогућена њихова масовнија примена у изградњи хидротехничких објеката. Неки од примера брана са контрафорама су приказани у табели 21.

Табела 21. Примери меких брана

Карактеристике меких брана	
Тирол -Аустија Река Brixentaler Ache Висина 2,4 m Ширина 26 m	
Асти – Италија Река По Висина 4,3 m Ширина 200 (4x50 m)	

Космач - Албанија
Река Дрим
Висина 2,5 m
Ширина 250 (4x62,5 m)

* Једна од најдужих
меких мбрана у Еворпи



У односу на традиционалне материјале попут метала, бетона или дрвета, конструкције од меких опни имају бројне предности:

- Мањи трошкови: Смањење материјалних и радних ресурса у изградњи.
- Бржа изградња: Значајно краће време потребно за монтажу.
- Флексибилност: Боље прилагођавање специфичним теренским условима и динамичким оптерећењима.
- Мања тежина: Олакшава транспорт и постављање.

Принцип рада и примена

Примена меких брана у хидротехници обухвата две главне категорије према принципу рада:

1. Затворене меке бране

- Конструкције затвореног типа причвршћују се за објекат (брана, устава или дно канала) помоћу специјалних анкера.
- Опне се пуне водом, ваздухом или комбинацијом ова два медијума, чиме се ствара унутрашњи притисак.
- Овај притисак даје опни потребну чврстину, облик и носивост, а сам материјал се налази у преднапегнутом стању.
- Због овога затворене меке бране спадају у категорију преднапегнутих конструкција.

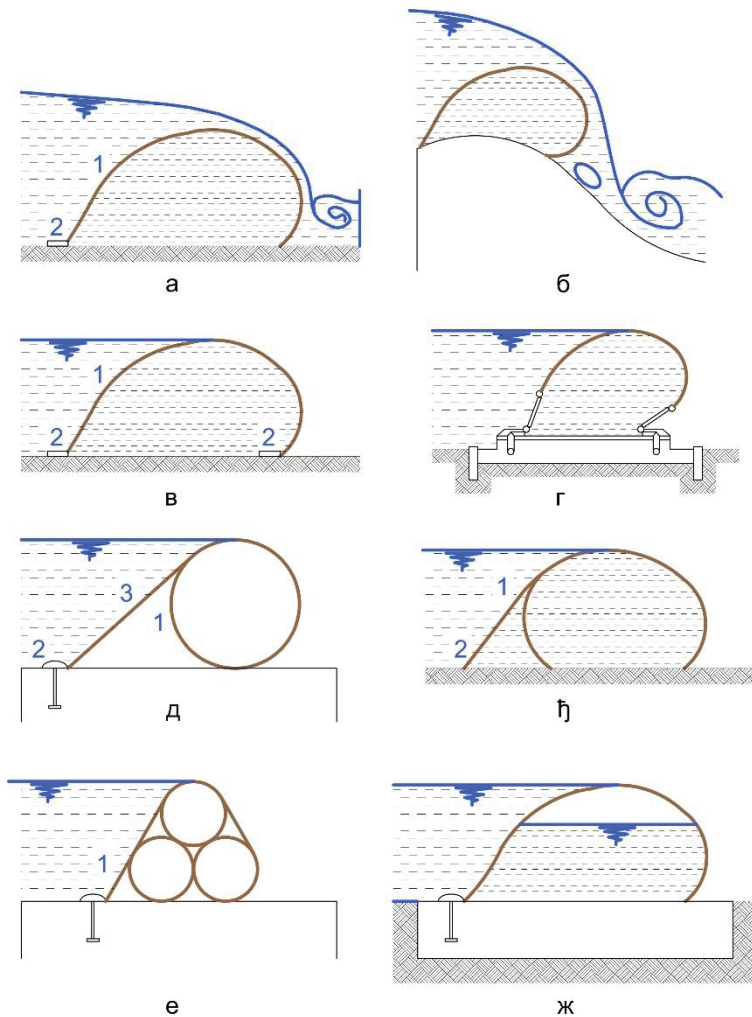
Цилиндричан облик је најчешћи код затворених брана, јер омогућава преграђивање водотокова велике ширине. Овај облик се показује као најпогоднији за материјал опне, јер не ствара подужна напрезања, чиме се постижу најбољи услови рада.

Конструктивни елементи затворених брана укључују:

- Меку носећу опну,
- Анкерне уређаје за причвршћивање опне,

- Систем цеви и пумпи за пуњење и пражњење и
- Систем за контролу рада и управљање.

Одређена конструктивна решења затворених меких брана приказана су на слици 36.



Слика 36. Конструктивна шема затворене меке бране: 1 – Мека брана, 2 – Анкерна стегу, 3 – Ужад;

- а) Опна пуњена водом на дну корита, б) Опна пуњена водом постављена на преливу, в) Опна пуњена водом и фиксирана анкерима за дно у две тачке, г) Опна пуњена водом и фиксирана анкерима са шарнираним пловцима*, д) Опна пуњена ваздухом и анкерисана ужадима, ђ) Опна пуњена водом и накерисана ужадима, е) Систем пони напуњен ваздухом, ж) Кобиновано пуњење опне водом и ваздухом

* **Шарнирани пловак** означава пловак (нпр. уређај или структура која плута на води) који је повезан са другом структуром преко зглобног (шарнирног) механизма. Ово омогућава пловку да се слободно креће, обично у вертикалном или нагибном правцу, у зависности од таласања воде или промене нивоа течности.

Пуњење и пражњење опне:

Водом:

- Пуњење може бити гравитационо, вештачко или комбиновано.
- Гравитациони систем је погодан за објекте са споријим маневрисањем, док је вештачки систем бржи и ефикаснији захваљујући употреби пумпи.
- Комбиновани систем, који користи обе методе, најчешће се примењује јер нуди најбоље резултате.

Ваздухом:

- Пуњење се врши помоћу компресора или вентилатора.
- Могућа је и комбинација, где се опна пуни водом до $1/3$ – $2/3$ запремине, а остатак ваздухом, што омогућава брзу промену висине објекта.

Управљање:

- Систем управљања укључује сензоре који прате ниво воде, притисак у опни и висину објекта. Ови подаци се преносе у центар за управљање, који аутоматски активира пумпе и системе за пуњење и пражњење.

2. Отворене меке бране

- Отворене конструкције се користе за контролисано вођење воде, попут регулисања протока у каналима или рекама.
- Њихова примена је специфична за системе у којима се омогућавају одређени протицаји без потпуног задржавања воде.

Меке бране се користе у различитим хидротехничким подухватима, укључујући:

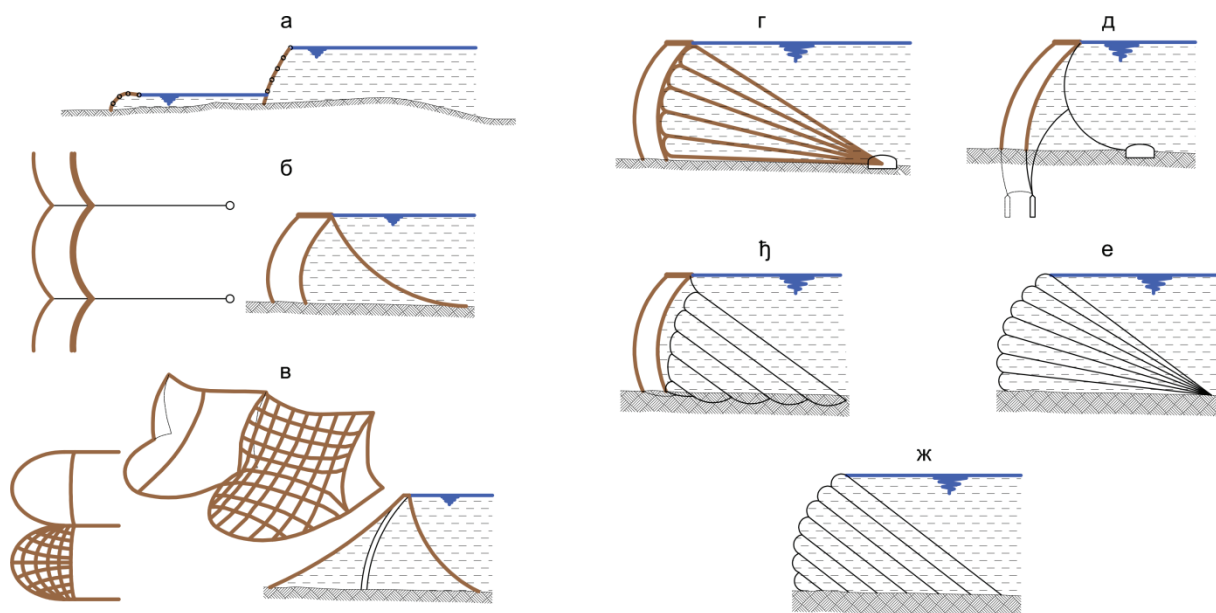
- Регулацију водотокова и спречавање поплава.
- Контролу протока у каналима за наводњавање.
- Привремене баријере у зонама градње или санације обала.
- Уређење речних корита и акумулација.

Ова решења представљају значајан корак ка рационалнијој и економичнијој изградњи, посебно у подручјима где традиционални материјали и методе нису практични или одрживи.

Опна отворене бране делује као једно, добијајући лучни облик под дејством воденог тока. Велике силе затезања у опни смањују се применом мреже ужади, која распоређује напрезања.

Конструктивни елементи:

- Мека опна (једна или више).
- Систем за учвршћивање који обухвата ужад и анкерне уређаје.
- Одређена конструктивна решења затворених меких брана приказана су на слици 37.



Слика 37. Конструктивна шема отворене меке бране која има опну, пловак, сајле, затеге и пилох-стуб: а – Брана са пловцима, б – Барана са носећим пловцима, в – Брана са ужетом, затегом и пилонима, г-ж – Бране са различитим системом затега

Предности примене меких брана су:

Економичност: Ове бране имају значајно ниже трошкове изградње и одржавања, као и једноставну замену застарелих конструкција.

Брза монтажа: Лака и брза изградња без потребе за гломазном механизацијом.

Прилагодљивост: Могућност прецизног управљања нивоима воде уз регулисање висином односно променом затегнутости ужади. Велика брзина промене висине бране, што је посебно корисно у условима варијације водостаја.

Техничке карактеристике: Велики распони (преко 100 метара) уз мале висине (2–4 м за затворене, до 10 м за отворене бране) и смањење напрезања на материјал, што продужава њихов радни век.

Меке бране представљају иновативан тип хидротехничких објеката који се ослањају на употребу синтетичких опни као главног носећег елемента. Њихова конструкција и принцип рада омогућавају ефикасно регулисање водотокова и нивоа воде, уз бројне предности у односу на традиционалне конструкције од бетона, метала или дрвета.

Материјали за израду меких брана

Материјал за израду меких брана мора испуњавати бројне захтеве како би обезбедио дуготрајност, поузданост и ефикасност у различитим условима. Ови захтеви укључују отпорност на температурне промене, затезна напрезања, хемијске и биолошке

утицаје, као и ултравиолетно зрачење. Поред тога, материјал мора бити херметичан, еластичан и економски исплатив. Кључне карактеристике материјала су:

1. **Отпорност на затезање.** Затезна чврстоћа материјала одређује висину опне и дозвољени притисак унутар ње. Такође, материјали који се данас користе показују изузетну отпорност – за пробијање опне потребна је сила од 230–240 kP, што је више него код пробијања аутомобилске гуме.

2. **Херметичност.** Постиже се гумирањем материјала, чиме се спречава пропустљивост воде и ваздуха.

3. **Еластичност и деформабилност.** Еластичност омогућава очување херметичности и након више циклуса савијања. Док, мала деформабилност осигурава стабилан облик опне под оптерећењем, што поједностављује израду и прорачуне.

4. **Отпорност на хемијске и биолошке утицаје.** Материјал мора бити отпоран на хемијску агресивност (нафтни производи, киселине, базе, разне соли растворене у води). Биолошка агресивност (деловање микроорганизама) је слабије истражена, али је познато да неки микроорганизми могу користити синтетичке материје као храну, што захтева додатна испитивања.

5. **Отпорност на ултравиолетно зрачење.** УВ зрачење може довести до старења материјала (губитак чврстоће, еластичности и промене боје). Заштитни премази значајно повећавају век трајања, који за квалитетне материјале износи 15–20 година.

6. **Абразивна отпорност.** Материјал мора бити отпоран на абразивне честице како би се спречило оштећење херметичког слоја и осигурао нормалан рад бране.

Данас се користе савремени материјали за израду меких брана који се могу поделити у три групе:

1. **Гумирани материјали** који се састоје од носеће тканине обложене гумом, која обезбеђује херметичност.
2. **Пластификовани материјали** који су слични гумираним, али користе пластику као херметички слој.
3. **Пластични материјали** који истовремено испуњавају функцију носећег и херметичког елемента.

Напредак у хемијској индустрији довео је до развоја **вишеслојних комбинованих материјала**, где сваки слој има специфична својства, чиме се постиже већа отпорност и шире могућности примене.

Савремене меке бране израђују се од флексибилних и издржљивих материјала као што су термопластични еластомери (ТПЕ) и термопластични полиуретан (ТПУ), који обезбеђују одличну отпорност на хабање, воду и ултраљубичасто зрачење. ПВЦ (поливинил хлорид) са ојачањима од полиестерских влакана користи се због своје приступачности и водоотпорности, док су материјали као што су хипалон (CSM - хлоросулфонирани полиетилен) и неопрен (полихлоропренски каучук) погодни због отпорности на хемикалије, озон и температурне промене. Геотекстили са полимерним премазима, попут ПВЦ-а или ТПУ-а, обезбеђују додатну чврстоћу и стабилност, док

етилен-пропилен-диенски мономер (ЕПДМ) нуди изузетну отпорност на временске услове. Ови материјали су идеални за бране које захтевају флексибилност, отпорност на динамичка оптерећења и дуг век трајања, уз минимално одржавање. Број слојева тканине (од 1 до 4) прилагођава се специфичним захтевима, попут флексибилности и отпорности. Материјали за израду меких брана најчешће се испоручују у ролнама ширине 1–2 метра и дужине 100–150 метара, што омогућава лаку манипулацију и брзу уградњу.

Материјали за израду меких брана морају задовољити захтеве високе отпорности, херметичности и дуготрајности у различитим условима. Напредак у развоју синтетичких материјала отворио је могућност примене нових решења, која обезбеђују поуздан рад и економичну израду. Захваљујући овим карактеристикама, меки материјали постали су кључни елемент у савременом хидротехничком грађевинарству.

Израда и експлоатација меких брана

Израда меких брана је сложен и пажљиво испланиран технолошки процес. Након обављених прорачуна, пројектовања и избора материјала, а често и спровођења лабораторијских тестирања, приступа се производњи. Главне фазе рада обухватају: Израду шаблона за кројење материјала, набавку и контролу квалитета материјала, мерење, кројење и склапање опне, херметизацију шавова и паковање и као завршна фаза представља монтажу меке бране на терену.

Шаблони за кројење - Шаблони се израђују са додацима за шивење и морају бити трајни, отпорни на деформације и погодни за виšekратну употребу. Флексибилни шаблони (на бази стаклених влакана) погодни су за веће детаље јер су лакши и могу се чувати савијени. Крути шаблони (од челика или метала) користе се за мање детаље где је потребна већа прецизност.

Припрема и контрола материјала - Пре кројења, материјал се пажљиво прегледа ради откривања дефеката. Оштећења се обележавају упадљивим бојама, а материјали са већим оштећењима одбацују.

Кројење и састављање - Контуре опне се обележавају на материјалу помоћу шаблона, а прецизност кројења је кључни услов за квалитет конструкције. Сечење се обавља ручно или помоћу специјализованих машина. Састављање опне подразумева лепљење и шивење делова. Основни шивени спојеви осигуравају чврстоћу и херметичност опне. Помоћни спојеви, који се користе за повезивање рукаваца, цеви и других елемената, углавном захтевају само водонепропусност. Шавови који подносе затезне силе морају бити изузетно издржљиви и често имају максималан број прошивка.

Монтажа на терену - Доњи део опне се учвршћује анкерима за бетонску подлогу, док је горњи део повезан ужадима или опремљен пловцима који осигуравају њен положај.

Меке бране представљају савремено и економично решење које значајно надмашује традиционалне конструкције од бетона, армираног бетона и метала. Њихова највећа предност огледа се у ниским трошковима израде и монтаже, који су чак 4–6 пута мањи у односу на класичне системе. Поред тога, процес постављања је изузетно брз – може се обавити у року од неколико дана или чак сати, без потребе за тешком механизацијом. Будући да се целокупна конструкција производи у фабрици, време изградње је додатно смањено, што омогућава брзу реакцију у хитним ситуацијама.

Још једна значајна предност меких брана је минималан трошак одржавања, захваљујући могућности потпуне аутоматизације управљања. Њихова прилагодљивост омогућава примену у различитим хидротехничким пројектима, укључујући брзо заграђивање пролаза, изградњу привремених преграда и канала за наводњавање, као и формирање валобрана и прелива способних за апсорпцију енергије таласа. Осим тога, користе се као потпорни зидови и регулатори протока воде, чиме се доприноси ефикасном управљању водним ресурсима.

Захваљујући својој великој маневарској способности и отпорности на ударе таласа, меке бране имају значајан потенцијал за примену у хитним интервенцијама, санацији инфраструктуре и заштити приобалних зона. Са даљим напретком технологије синтетичких материјала, очекује се да ће ове конструкције постати доминантан избор у бројним хидротехничким применама, пружајући ефикасно и одрживо решење за будућност.

Типови и карактеристике насутих брана

Насута брана се дефинише као брана изграђена од природних материјала који се ископавају или набављају у непосредној близини. Доступни материјали се користе на најбољи могући начин у складу са својим инжењерским својствима, при чему се унутар попречног пресека бране формирају одговарајуће зоне насипа. Природни материјали за насипање се постављају и сабијају без додавања везивних средстава, користећи механизацију високог капацитета. Изградња насутих брана је, уз повољне временске и земљишне услове, данас скоро непрекидан и високо механизован процес, који више зависи од ангажовања грађевинске опреме него од ручног рада.

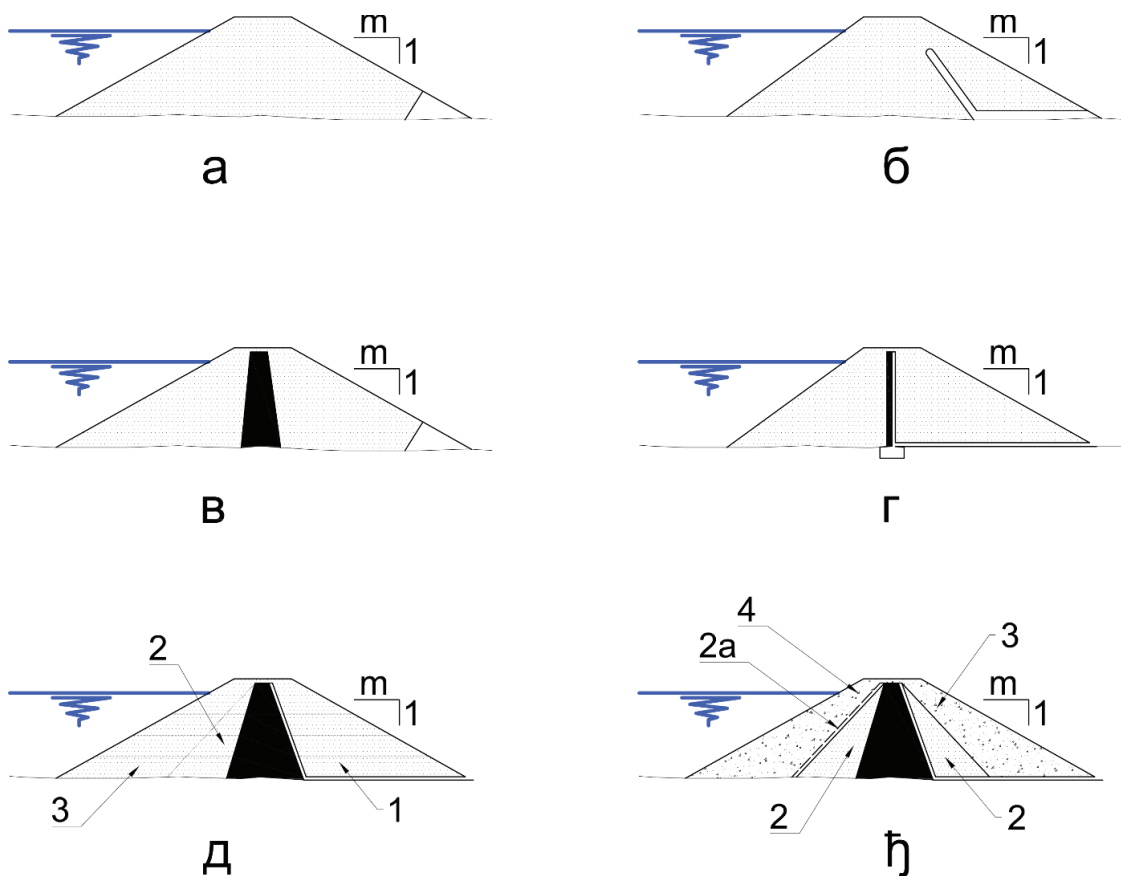
Како је већ наведено бране се у ширем смислу могу класификовати као **камене** или **земљане** бране. Подела између ове две врсте насипа није увек стриктна, јер многе бране садрже материјале оба типа унутар одговарајућих зона.

Насуте бране и мали број већих насипа могу имати **хомогену структуру**, али у већини случајева насипи садрже **непропусну зону или језгро**, које је у комбинацији са потпорним раменима начињеним од релативно пропусног материјала. Сврха потпорних рамена је пре свега конструктивна – она обезбеђују стабилност непропусног језгра и целокупног пресека бране.

Врсте насутих брана

Насуте бране могу бити различитих типова, у зависности од начина на који се користе доступни материјали. Основна подела на **земљане** и **камене насипе** представља полазну основу за разматрање главних варијанти које су и приказане на слици 38.

1. **Земљане насуте бране** - се сматра **земљаном браном** ако више од 50% запремине насутог материјала чине збијене земље. Земљане бране се углавном граде од пажљиво одабраних земљишта, која се збијају равномерно и интензивно у релативно танким слојевима, уз контролу садржаја влаге.

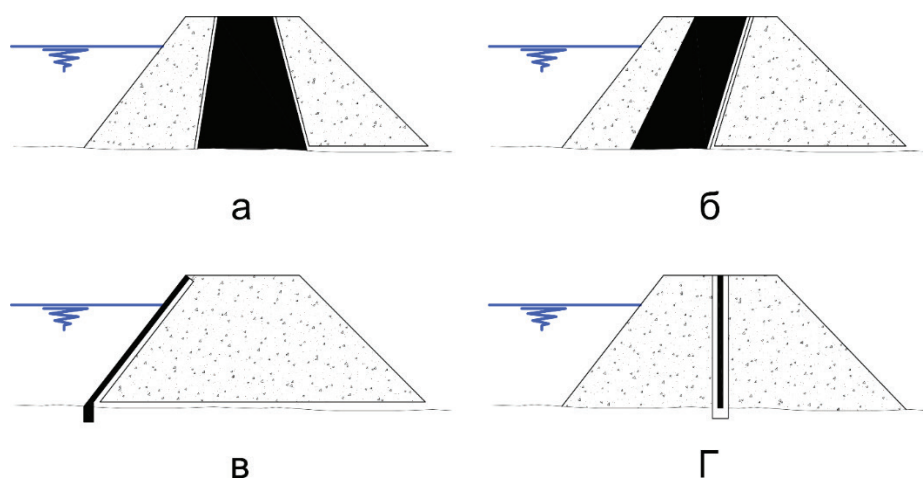


Слика 38. Главне варијанте земљаних и земљано-камених насутих брана (вредности коефицијента m су само индикативне): а – Хомогена насута брана са дренажном призмом ($m=2,0-2,5$), б – Хомогена насута брана са вертикалним дренажом ($m=2,5-3,5$), в – Насута брана са централним језгром од глине ($m=2,5-3,5$), г – Насута брана са централним бетонским језгром ($m=2,5-3,5$), д – Насута брана са широко ваљаним језгром од глине са зонираним прелазним слојевима и дренажом ($m=2,5-3,5$), ђ – Камено-земљана насута брана са централним језгром од глине са зонираним прелазним слојевима и дренажом ($m=1,6-2,0$)

2. **Камене насуте бране** - У каменом насипу се налази посебан **непропусни елемент**, који може бити збијена земља или неки други слабопропусни елемент који може бити танка бетонска или битуменска мембрана. Назив "**камена насута брана**" користи се када више од 50% насутог материјала чини камен, односно крупнозрнасти материјал са високим трењем.

- Термини "**зонска камена брана**" или "**комбинована земљано-камена брана**" односе се на бране који имају релативно широке непропусне зоне од збијене земље.
- Камене насуте бране које садрже танку узводну мембрану од асфалтног бетона, армираног бетона или неког другог произведеног материјала називају се "**брране са екраном**".

Попречни пресек различитих типова камених насutih брана приказан је на слици 39.



Слика 39. Главне варијанте камених насutih брана (вредности коефицијента m су само индикативне - $m=1,6-2,0$): а - Насута брана са централним језгром од глине, б – Насута брана са нагнуто ваљаним језгром од глине, в – Насута брана са узводном плочом од асфалта или армираног бетона, г - Насута брана са централном мембраном од асфалта

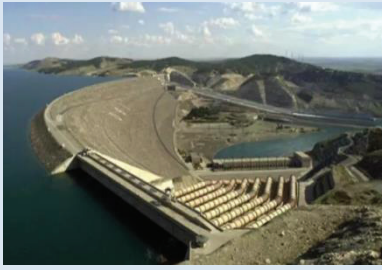
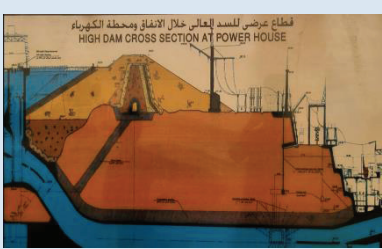
Поређењем попречних пресека на сликама 38 и 39 уочава се значајна уштеда у количини насутог материјала када се користи камен. Ова уштеда произилази из својстава камена – његова велика чврстоћа на смицање омогућава примену **стрмијих косина**. Додатна уштеда остварује се и смањењем основе бране, као и скраћивањем дужине одводних канала и других пратећих објеката.

5.3. Камене бране

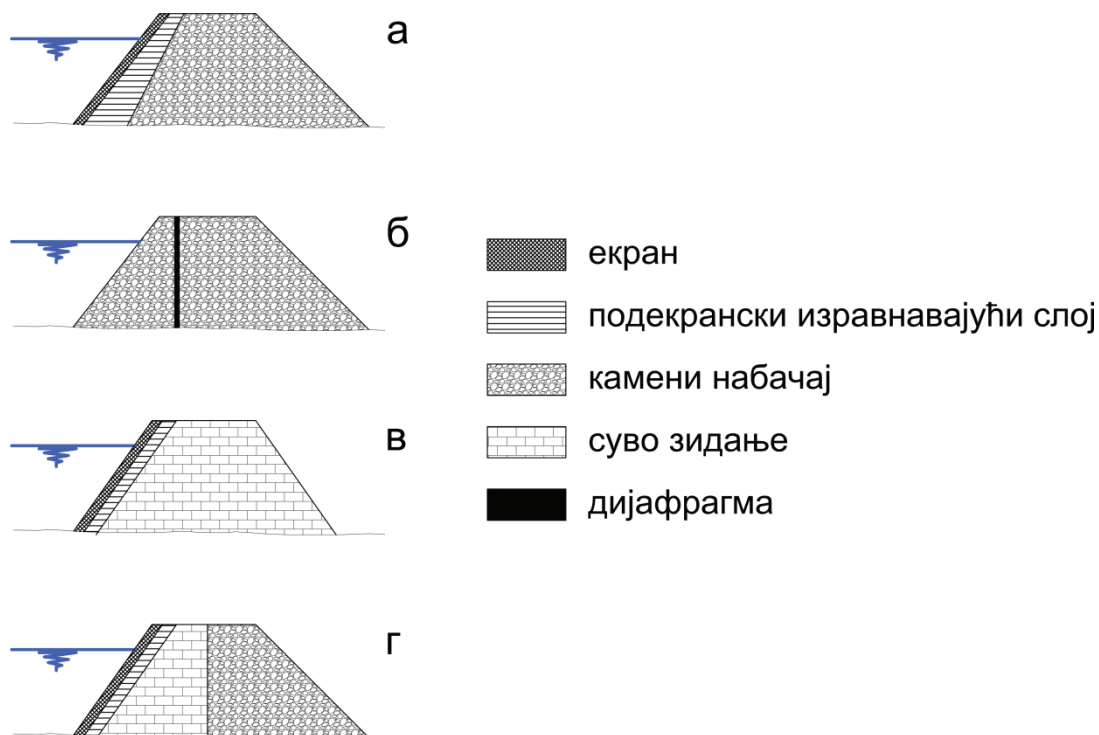
Камене бране припадају групи брана које се граде од природних материјала, првенствено камена. Оне се обично изводе на локацијама где постоји доступно и квалитетно позајмиште камена у непосредној близини. У зависности од уграђеног материјала, камене бране могу бити:

- Бране од **каменог набачаја** са екраном или дијафрагмом,
- Бране од **камена у сувозиду** са екраном,
- Бране **комбинованог типа**.

Табела 22. Примери камених брана

Карактеристике камених брана			
Сјеница - Србија Река Увац Висина 110 m Ширина 313 m Запремина 210 000 000 m ³			
Ататурк – Турска Река Еуфрат Висина 170 m Ширина 1670 m Запремина 48 700 000 000 m ³			
Асуан – Египат Река Нил Висина 111 m Ширина 3830 m Запремина 169 000 000 000 m ³			

Камене бране се граде у слојевима различитих дебљина, обично између 1,5 и 10 метара. Код брана постављених на нестабилној подлози посебно је важно испитати стабилност косина бране услед могућих слабости подлоге и ефикасност противфилтрационих елемената попут екрана, дијафрагме и кецеље. На слици 40. приказани су основни елементи камених брана.



Слика 40. Основни облици камених брана

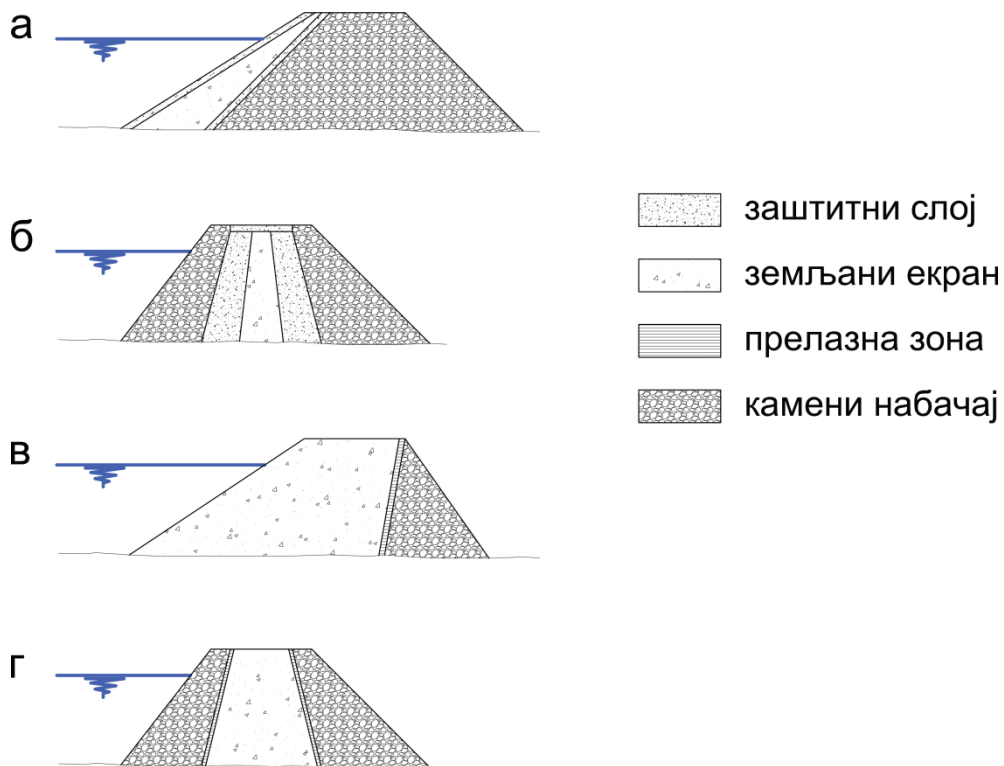
Након изградње, потребно је континуирано пратити настале деформације. Најчешћи облици деформација су хоризонталне и вертикалне деформације услед тоњења камена, његовог потапања или размицања. Контрола деформација је од кључног значаја за стабилност и водонепропусност објекта. Водонепропусност камених брана остварује се применом противфилтрационих елемената који морају бити непропусни како би спречили цурење воде и флексибилни ради прилагођавања евентуалним деформацијама током експлоатације. Ови елементи се најчешће формирају као екран, језгро или дијафрагма.

Екрани се у пракси више користе од дијафрагми и најчешће се изводе од армираног бетона, асфалта, метала. Армирано-бетонски екрани су најзаступљенији и могу бити једнослојни, положени на изравнавајући слој с битуменом или вишеслојни, са слојевима битумена између. Екрани се постављају на изравнавајућу подлогу, што омогућава већу стабилност бране, лакшу монтажу и истовремено извођење више фаза радова.

Дијафрагме такође имају своје предности. Оне су заштићене од спољашњих утицаја, независне су од вертикалних деформација и захтевају мање материјала од екрана. Ипак, екрани су чешћи због боље стабилности, лакше уградње и једноставнијих статичких услова.

Камено-земљане бране представљају конструкције у којима се комбинују камен и земљани материјали, при чему су противфилтрациони елементи, попут екрана или језгра, кључни за спречавање продора воде кроз објекат, док камен служи као баласт. У зависности од положаја противфилтрационих елемената, ове бране се деле на неколико типова (слика 41):

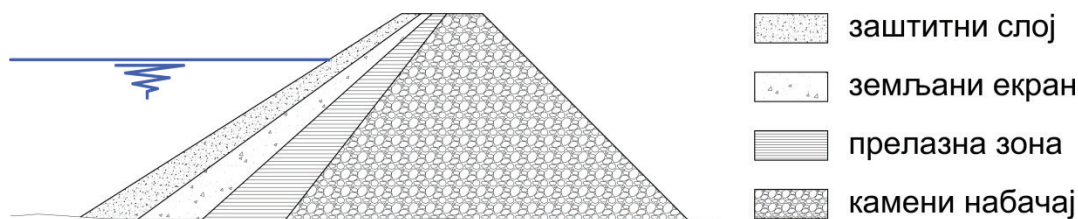
- Бране са **земљаним екраном**,
- Бране са **језгром**,
- Бране са **узводном земљаном призмом**,
- Бране са **централном земљаном призмом**.



Слика 41. Типови камених брана

Сваки од ових типова има специфичне карактеристике које утичу на њихову стабилност и примену у различитим условима.

Код камено-земљаних брана, противфилтрациони елементи су димензионисани тако да обезбеде потпуну водонепропусност. Посебну пажњу потребно је посветити пројектовању прелазних зона између камених и земљаних делова (слика 42), како би се спречила суфозија, односно испирање финог материјала, што би могло довести до слабења дела или целокупног објекта.



Слика 42. приказ спајања противфилтрационог елемента и тела камене бране

При пројектовању ових брана морају се узети у обзир количина и квалитет доступних природних материјала у околини, као и климатски услови који могу утицати на стабилност и дуговечност бране. Влага и температурне осцилације посебно су важни фактори, јер могу утицати на запреминске промене материјала и пропустљивост противфилтрационих елемената. Пажљиво димензионисање и уградња ових елемената кључни су за дугорочну функционалност и безбедност објекта.

Камено-земљане бране представљају поуздано и економично решење за изградњу хидротехничких објеката, нарочито на локацијама где су природни материјали лако доступни. Њихова флексибилност у примени, уз коришћење савремених технологија у изради противфилтрационих елемената, обезбеђује стабилност и дуготрајност ових конструкција у различитим условима експлоатације.

5.4. Земљане бране

5.4.1. Насуте земљане бране

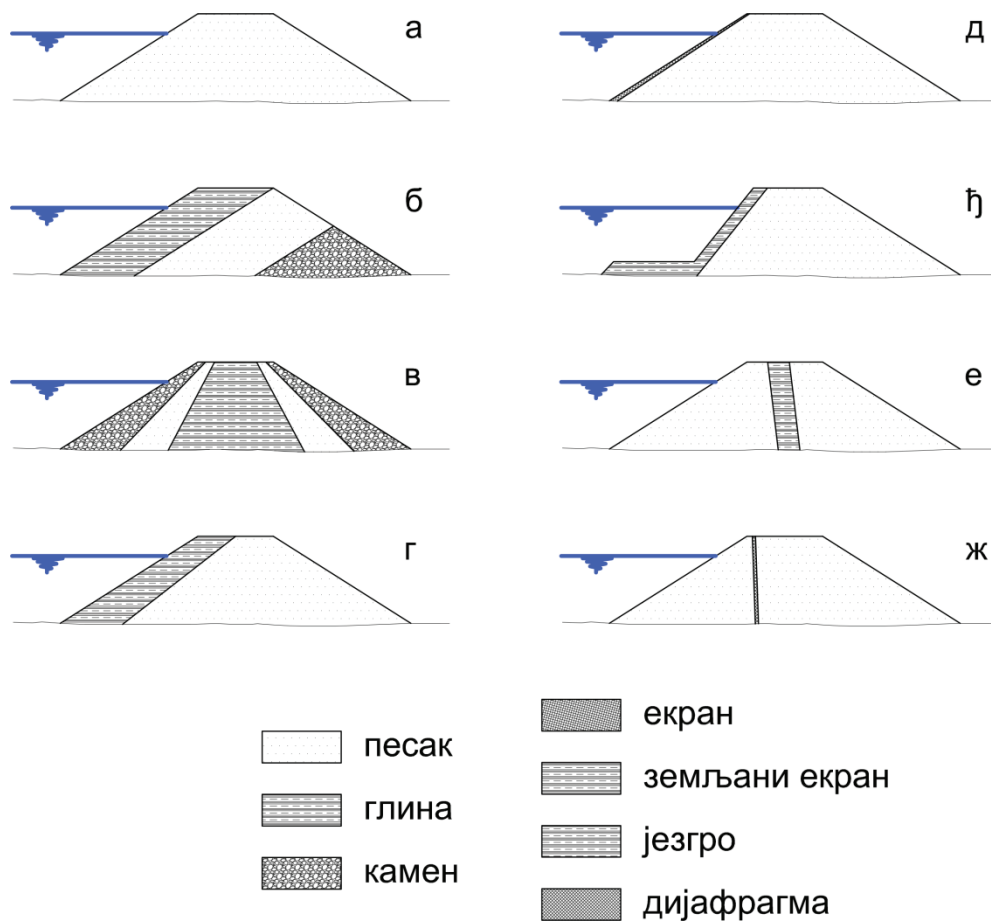
Насуте земљане бране могу се класификовати према врсти материјала који се користи за њихову изградњу (слика 43):

Хомогене бране - Бране које су изграђене од једног, слабопропусног материјала.

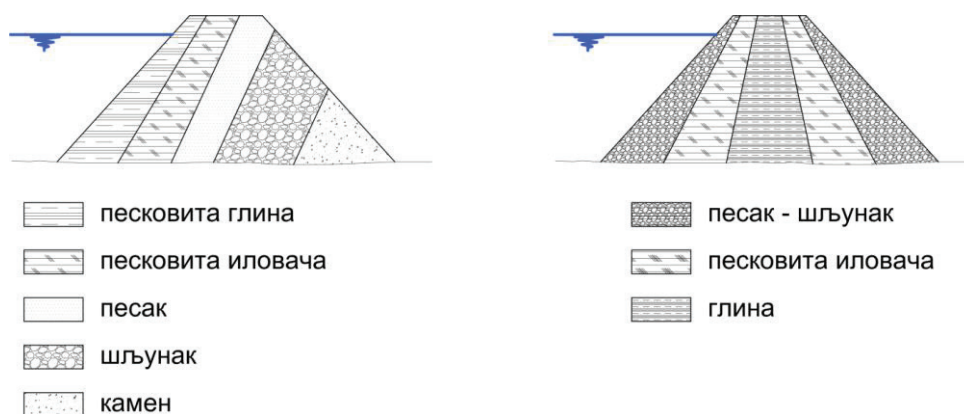
Зониране бране - Бране које се граде од земљаних материјала различитих водопрпусних карактеристика, при чему водопрпусност расте од узводне према низводној страни, или је у средини објекта постављен слабопропусни земљани материјал (слика 44). Специфични облици зонираних брана су:

Бране с противфилтрационом преградом - Ове бране користе екран од различитих материјала (земља, асфалт, полиетилен) како би спречиле филтрацију.

Бране са централним противфилтрационим елементом - Ове бране садрже средишњи, језгровити елемент (од земљаног материјала) или дијафрагму (од бетона, асфалта, полиетилена или метала).



Слика 43. Осноблици земњаних насутих брана са протифилтрационим елементима



Слика 44. Земљане насуте бране у зависности од концепта зонарања

Насуте земљане бране карактерише **трапезни попречни профил**. Висина бране се одређује на основу максималног дозвољеног нивоа воде у језеру, као и заштитне

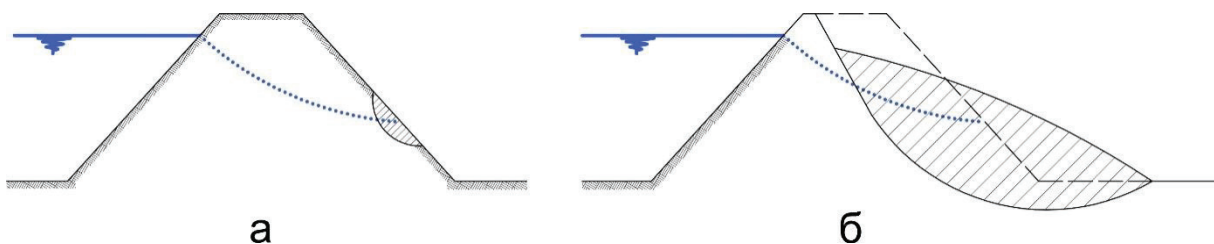
висине која спречава утицај таласа и других спољних фактора. **Ширина** круне бране зависи од функције бране и њене дужине. **Косине** бране се штите од деформација изазваних кишом и таласима користећи бетонске плоче или затрављивањем. **Тело** бране се повезује с подлогом путем конструктивног елемента познатог као „зуб“. На низводној страни бране, како би се спречила филтрација, гради се дренажни систем (дренажна призма). Приликом прорачуна филтрације, потребно је узети у обзир и капиларну и опнену воду. Земљишне честице у брани су подложне различитим филтрационим деформацијама, као што су:

- Суфозија - Филтрациони ток воде који изазива померање земљишних честица.
- Колмација - Таложење ситних честица у крупније поре.
- Премештање земљишних честица - Помицање честица од места настанка суфозионих процеса до места колмирања, или чак на површини земљишта.

Филтрационе деформације (слика 45) се могу поделити на безопасне и критичне. Безопасне деформације се јављају у свим објектима, док критичне могу изазвати и рушење бране. Филтрациона отпорност земљишта означава његову способност да се одупре овим деформацијама.

Специфични облици филтрационих деформација код насутих земљаних брана укључују:

- Опште обрушавање косине,
- Локално филтрационо издизање,
- Нормалну суфозију,
- Течење песковитог земљишта изазвано динамичким оптерећењем,
- Нарушавање случајне филтрационе отпорности.



Слика 45. Деформације косине бране а) локална деформација, б) обрушавање целе косине

При избору типа насуте земљане бране, кључни фактори који се узимају у обзир укључују:

- Количину и квалитет земљаног материјала, удаљеност од позајмишта и висински положај материјала,
- Геолошке карактеристике подлоге на локацији бране,

- Климатске услове (нпр. ниске температуре захтевају дебљи заштитни слој и скраћују време за уградњу),
- Могућности примене механизације током градње,
- Услови спајања тела бране и бетонских елемената у њеној структури,
- Филтрационе особине бране.

5.4.2. Рефулисане земљане бране

Рефулисане земљане бране се граде у условима где је налазиште земљаног материјала на таквом положају који омогућава хидраулички транспорт до локације будуће бране. Ове бране можемо поделити у два основна типа:

- **Једноподне рефулисане бране:** Ове бране су изграђене од једног типа материјала, као што су песак или глина.
- **Хетерогене рефулисане бране:** Ове бране се граде од различитих материјала, на пример, песковите брану са централном зоном од глиновитог материјала.

Рефулисане бране могу имати два типа профила:

- **Нормалан профил** - нагиби косина се формирају принудно.
- **Распљинут профил** - косина се формира слободним течењем пулпе.

Током изградње рефулисаних брана, важно је осигурати да материјал буде хомоген. Ово се постиже сталним померањем излива пулповода, тако да материјал који се користи за изградњу бране неће имати различите гранулометријске и физичко-механичке особине у односу на материјал из позајмишта.

Такође, приликом изградње, треба осигурати одговарајућу брзину насипања која ће омогућити несметано цеђење воде из рефулисане масе. Ако ова брзина није одржана, може доћи до појаве "тешке жидкости" у централном делу бране, што је често узрок смањене стабилности објекта која може довести у питање и рушење објекта.

При пројектовању рефулисане бране, предвиђена минимална ширина круне треба да буде од 10 до 12 метара, док ширина глиненог језгра треба да износи од 10% до 20% ширине бране на одговарајућој висини.

За распљинуте бране, често није потребно припремати подлогу пре почетка изградње. Једнородне рефулисане бране могу се примењивати до висине од 60 метара, зависно од типа, док се распљинуте бране могу градити на висини од 10 до 15 метара.

6. Елементи насутих земљаних брана

Насуте земљане бране су један од најчешће коришћених типова брана за формирање водних акумулација. Ова врста брана има бројне предности у односу на друге типове, пре свега због своје једноставности и погодности за примењивање на

слабопропусним подлогама. Поред тога, овај тип брана је веома флексибилан, јер омогућава широк спектар могућности у погледу набавке материјала. За мање акумулације, попут оних на пољопривредним газдинствима, често се користи искључиво природни земљани материјал.

Пројектовање насуте земљане бране захтева прикупљање следећих основних података:

- Попречни профил терена на локацији бране,
- Екстремни протицај воде на посматраном профилу,
- Сливна површина са топографским, хидрогеолошким и хидролошким својствима,
- Положај позајмишта материјала.

Попречни профил терена је од кључног значаја за одређивање економичних параметара бране и акумулације. Овај профил помаже да се одреди оптималан однос између запремине уграђеног земљаног материјала и запремине акумулиране воде, који би требало да буде најмање 1:4.

Такође, минимални и максимални протицај воде пружају увид у величину акумулације која ће бити потребна за испуњавање захтева корисника, као и за димензионисање евакуационих органа. Ако нису доступни подаци о протицају, могу се користити следећи прилагођени коефицијенти за димензионисање акумулације:

- Дневно изравнавање: $V_a = 50.000 \cdot Q_{min}$
- Месечно изравнавање: $V_a = 2.000.000 \cdot Q_{min}$
- Сезонско-годишње изравнавање: $V_a = 8.000.000 \cdot Q_{min}$

Поред тога, анализа величине потопљене површине и висинских зона је неопходна за одређивање потребне геодетске висине бране.

Након прикупљања свих потребних података, приступа се пројектовању насуте земљане бране и њених основних елемената: тела бране, евакуационих органа (као што су прелив и испуст) и водозавхвата ако се планира.

Према већини стандарда, избор типа конструкције насуте бране врши се на основу техничко-економског разматрања различитих решења. На избор типа бране утичу различити фактори који се анализирају у оквиру пројектне документације. Најважнији фактори укључују:

- Расположиви материјал који се може искористити на основу својих гранулометријских и експлоатационих својстава,
- Климатски услови који дефинишу трајање сезоне за рад са одређеним материјалима,
- Приступачност профила (трасе) на којој ће бити постављена конструкција у односу на локацију материјала и транспортне могућности,
- Услови темељења конструкције, укључујући геомеханичке особине подлоге и потребне радове на ојачању темеља,

- Извођење осталих објеката као што су евакуациони органи, објекти различите намене на профилу, као и временски и организациони услови,
- Могућност етапне изградње и експлоатације конструкције пре завршетка радова,
- Хидролошки услови на профилу и проблеми евакуације воде током изградње и експлоатације,
- Сеизмичка активност на локацији,
- Угроженост подручја низводно од бране,
- Војни-стратешки значај конструкције,
- Експлоатациони услови, као и редовна и ванредна оптерећења,
- Величина и значај објекта у односу на степен захтеване сигурности и дозвољен степен ризика.

6.1. Тело насуте земљане бране

Тело насуте земљане бране има основну функцију да задржи воду и на тај начин створи акумулациони басен. У зависности од материјала који је доступан, могу се изградити различити типови брана: хомогена брана, насута брана с језгром или дијафрагмом и брана са екранима. Ако се у близини бране налази позајмиште квалитетног земљаног материјала, тежи се изградњи хомогене земљане бране. Међутим, ако материјал не поседује задовољавајуће карактеристике, пре свега коефицијент филтрације, неопходно је укључити водонепропусне или слабопропусне конструктивне елементе као што су екран, језгро или дијафрагма.

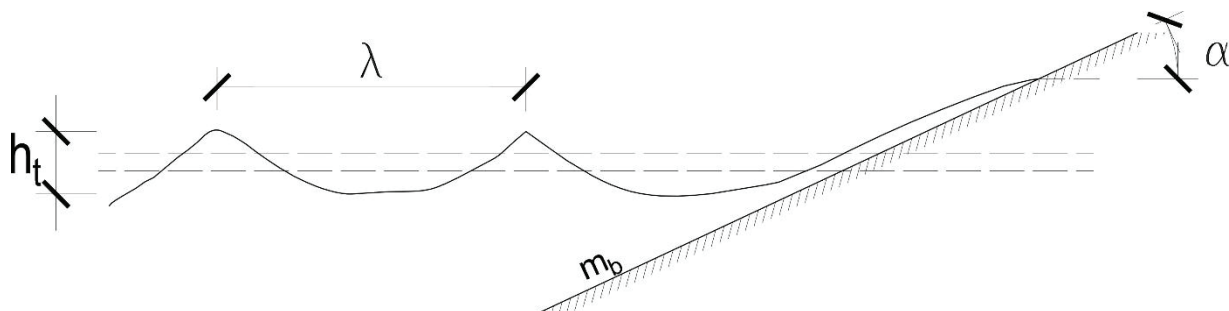
Висина бране (h_{br}) се одређује према следећој формули:

$$h_{br} = h + h_1 + h_2 + h_3 + h_4$$

где су:

- h – Геодетска висина,
- h_1 – Висина преливног млаза на евакуационом органу,
- h_2 – Заштитна висина (заштита од дејства таласа),
- h_3 – Додавање висине ради безбедности (приближно 0,1м),
- h_4 – Годишњи губитак воде због испаравања и провирања.

Геодетску висину бране добијамо са карте на којој су извршене анализе висинских зона акумулационог басена. Висина преливног млаза одређује се приликом димензионисања евакуационог органа. Заштитна висина служи за елиминацију негативног утицаја таласа и спречавање преливања бране (слика 46).



Слика 46. Пењање таласа по косини бране

Ова висина може да се одреди на више начина применом различитих образаца, а један од најчешће коришћених је образац Андрејанова:

$$h_2 = 3,2 \cdot K \cdot \frac{h_t}{m_b}$$

$$2 \cdot h_t = 0,0208 \cdot v^{\frac{5}{4}} \cdot D^{\frac{1}{3}}$$

где су:

K – Коефицијент рапавости облоге узводне косине (за бетонске плоче $K=1$),

h_t – Половина висине таласа (m),

m_b – Нагиб узводне косине,

v – Брзина ветра (m/s),

D – Дужина воденог огледала (km).

Висина која се односи на висину таласа се често креће у оквирима 1,5 – 2 укупне висине бране. Такође, за одређивање могу да се користе и номограми који се усвајају на основу стандарда који су прописани у датој држави или на вишем нивоу. Након распада СФРЈ, Југословенски стандарди (ЈУС) су постепено замењени новим српским стандардима (SRPS), који су често усаглашени са европским (EN) и међународним (ISO) стандардима.

Минимална ширина круне бране се углавном одређује у односу на укупну висину бране. И то према различитим обрасцима:

$$b_{br} = 0,25 \cdot h_{br}$$

$$b_{br} = 0,25 \cdot h_{br} + 0,1 \cdot \sqrt{h_{br}}$$

$$b_{br} = 0,20 \cdot h_{br} + 1$$

Поред ових елемената, важно је одредити и **нагиб косина бране**. Нагиб косина зависи од врсте уграђеног материјала, односно од природног угла трења (ϕ). За веће висине брана (око 7 m), како би се смањила концентрација тока воде, низводна косина

се пројектује са **банкинама**. Уобичајени нагиб косина је од 1:1 до 1:4, а ширина банке је 1-2 m на сваких 7-15 m висине банке.

6.1.1. Хидраулички прорачун тела насуте земљане банке

Након што су дефинисани сви елементи банке, приступа се хидрауличком и статичком прорачуну тела банке. Пре него што се изведе хидраулички прорачун, потребно је размотрити основне карактеристике противфилтрационих елемената који имају задатак да смање филтрационе губитке, смање пиезометријски пад филтрационог тока кроз банку и тиме повећају отпорност на филтрацију, смањујући криву депресије и повећавајући стабилност низводне косине. Противфилтрациони елементи су посебно важни у случају лоших геолошких услова, јер они осигуравају квалитетан спој тела банке и подлоге. Уколико земљани материјал има изражену суфозиону карактеристику, изградња противфилтрационих елемената је обавезна.

Екран се може изградити од различитих материјала, као што су глинени земљани материјали, асфалт или полипропилен. Његов врх мора бити виши од максималног дозвољеног нивоa у акумулацији. У основи, екран се ослања на "зуб", који у случају присуства песковите или пропусније подлоге, добија продужетак у виду **кецље**. Кецља има задатак да смањи депресију и смањи притисак на екран. Асфалтни екран може бити једнослојни или двodelни, у зависности од висине банке.

Језгро се гради од истог материјала као и екран, а његова оса се најчешће поклапа с осовином банке. Димензије језгра одређују се на исти начин као код екрана. Бетонске дијафрагме се граде од бетона минималне марке МВ20 до МВ40 са минералним (микросилика, пуцолани и сл.) или хемијским (редуктори воде, суперпластификатори и сл.) адитивима који служе за побољшање густине структуре и компактности, а највиши део може бити коришћен као валобран (део за спречавање преливања преко круне банке) ако се налази на узводној ивици круне. Ширина круне бетонске дијафрагме не сме бити мања од 0,5-0,7 m, а нагиб косина је од 10:1 до 20:1. На одређеним растојањима дуж дијафрагме, неопходно је оставити дилатационе спојнице које служе за апсорбовање деформација које настају услед температурних промена, напрезања објекта, као и сеизмичких утицаја. Армирано-бетонске дијафрагме пројектују се по истим принципима као и бетонске. Такође, дијафрагме се могу изградити и од асфалта, металних талпи или пластичних материјала.

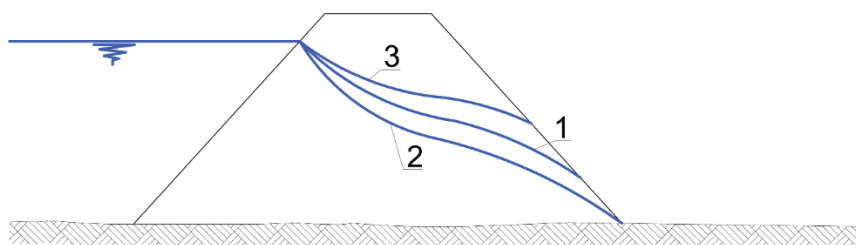
При избору противфилтрационих елемената треба водити рачуна о следећим аспектима:

- Земљани елементи захтевају већу количину материјала.
- Изградња земљаног екрана захтева ублажавање косине.
- Земљани екран је теже спојити са бетоном или каменом подлогом.
- Екран је осетљивији на спољашње утицаје и смањење стабилности.
- Изградња и одржавање екрана је једноставније него код језгра.

- Екран је лакши за ремонт и контролу рада од језгра.

Хидраулички прорачун тела бране односи се на одређивање облика провирне линије и количине воде која провири кроз брану.

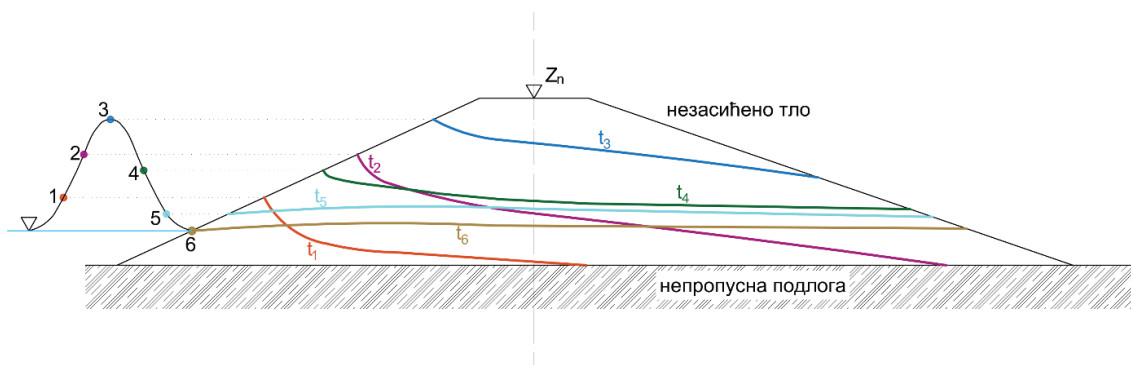
Облик провирне линије пре свега зависи од материјала уграђеног у насуту земљану брану. Идеалан материјал је земља с крупнијим честицама која је попуњена глином. Овај материјал има висок природни угао трења, што је карактеристично за крупнозрни део, као и низак коефицијент филтрације захваљујући глиненој фракцији. Важно је да се глинени материјали користе само у одређеном опсегу влаге, избегавајући рад при ниским температурама или променама у влажности. У зависности од материјала, крива депресије може бити различита, али је уобичајени облик **S-облика**.



Слика 47. S-облик провирне линије

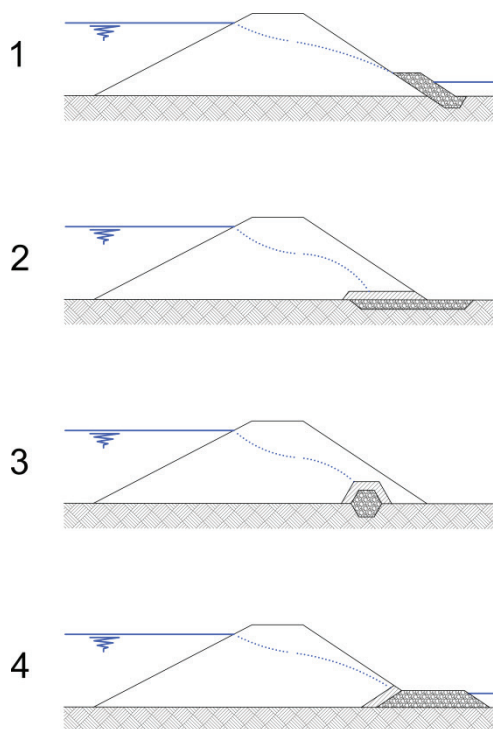
За хомогену брану, крива изгледа као на Слици 47, где криве представљају различите стадијуме филтрације у зависности од величине коефицијента филтрације. Крива (1) представља провирну линију за хомогену брану. Ако је током времена коефицијент филтрације повећа, крива заузима положај (2) а при смањењу положај (3). Најнеповољнији случај је крива 3 пошто је при том знатан део низводне косине засићен водом, угрожен филтрационим силама и у току зиме угрожен бубрењем.

Кад је променљив ниво воде у акумулацији провирна линија такође прати те промене. Провирна линија, при надоласку поплавног таласа или приликом пражњења и поновног пуњења акумулације, може да има облике као што је приказано на слици 48.



Слика 48. Положај провирне линије у зависности од динамике пуњења и пражњења акумулације

Снижење низводног краја депресионе криве могуће је изградњом различитих облика дренажних система (слика 49), који се у телу земљане бране постављају у зависности од висине изласка провирне линије на узводној косини и количине провирне воде.



Слика 49. Примери дренаже у ножици брањене косине: 1 – Обрнути филтар, 2 – Дренажни тепих (подвучена дренажа), 3 – Дренажн цев, 4 – Дренажна призма (дренажни насип)

Познавање процеса провирања воде је кључно из више разлога: одређивање стабилности косине, заштита тела бране од суфозије и прецизно одређивање сталног губитка воде, али треба имати на уму да тип дренажног система зависи и од техничких и економских услова.

6.1.2. Статички прорачун тела насуте земљане бране

Насуте земљане бране су масивна, некохерентна тела у којима, под утицајем спољашњих сила, не долази до превртања, већ се може јавити само клизање дуж неке равни унутар тела или на подлози односно темељу бране. За статички прорачун важно је разматрати и хоризонталне и вертикалне силе, где вертикалне силе повећавају стабилност објекта, јер повећавају његову тежину. Хоризонтална компонента силе воде тежи да изазове смицање, али се томе супротставља сила трења.

У случају насутих земљаних брана, сила узгона није значајна, јер порозно тело бране прихвата и испушта воду. Провирна линија има утицај само на смањење тежине

материјала од кога је брана изграђена. Поред тога, притисак наносног материјала који се налази у "мртвом простору" уз брану доприноси стабилности објекта.

Утицај леда може се занемарити, јер некохерентни материјали подносе деформације настале процесом кристализације леда.

Струјање ветра нема директан утицај на стабилност бране, али ефекат таласа може бити опасан за незаштићене косине.

Посебно важан фактор који може угрожити стабилност бране је земљотрес. Деловање хоризонталне силе при земљотресу може довести до померања тела бране, јер се у том случају отпор трења и коезије не могу да се супротставе. Смицање се врши по кривој равни која, према различитим ауторима, може бити логаритамска спирала, кружница или комбинација ових кривих.

Разликују се следећи типови клизања на основу положаја клизне равни у односу на тело бране:

- **Надножично** или делимично клизање косина,
- **Ножично** или потпуно клизање косина,
- **Подножично** или клизање косине и тла испод ножице.

Најчешћи облик клизања је **ножично клизање**, које ће бити разматрано у даљем тексту. У анализи стабилности користе се различите методе, од којих су најчешће: Шведска метода, модификована Шведска метода и метода круга трења.

За одређивање стабилности хомогених земљаних брана претпоставља се да је брану могуће поделити на два дела: узводни део који има облик трапеза и низводни део који има облик троугла.

Низводни део служи као ослонац узводном делу, који је под утицајем притиска воде. Сила отпора делује на свакој коти бране, супротно сили смицања која делује дуж хоризонталне основе, али је најопаснији пресек на дну бране, у најнеповољнијем случају при пуној акумулацији.

У процесу одређивања силе смицања, неопходно је познавати провирну линију, запреминску тежину сувог и влажног земљишта, као и средњу запреминску тежину материјала.

6.2. Обликовање косина и облога косина

У случају да је узводна косина бране изложена удару таласа, неопходно је поставити заштитну облогу. Низводну косину такође треба заштитити од ерозивних процеса, што се најчешће постиже затрављивањем. Облога узводне косине може бити изведена од бетона, камена или асфалта. У нашим условима, најчешће се користи облога од бетонских плоча које се изливају на лицу места.

Саму облогу чине бетонске плоче, подлога која се састоји од дренажног и контрафилтрационог слоја, као и заштитни слој. Основни задатак облоге је да на себе прими ударе таласа и заштити косину од абразије. Орапављење плоча је пожељно, јер смањује висину по којој талас може да се пење по косини. Међутим, рапаве облоге су

подложне већим динамичким оптерећењима услед деловања таласа, али омогућавају мању висину пењања таласа, јер се енергија воде распршује кроз турбулентни ток који настаје када таласи пролазе кроз празнине између плоча и преко рапаве плоче.

Облога се обично не прорачуна на утицај леда, што може довести до деформација у зимским условима. Подлога и заштитни слој обезбеђују равномерно припајање облоге на тело бране, омогућавају несметан ток провирне воде и спречавају деформације услед ниских температура, као и погоршање услед бубрења материјала у телу бране.

Глатке облоге од бетона и асфалта могу бити оштећене неједнаком слегањем бране, за разлику од облога од камена, које су отпорније на овакве факторе. Ако је акумулација смештена у области где су чести снажни ветрови, на крају бране често се поставља валобран, који има задатак да спречи преливање таласа преко крне бране.

Дебљина плоча и размак спојница рачунају се зависно од притиска таласа, њихове висине и планисаног квалитета бетона.

6.3. Градња тела бране

Градњи бране претходе озбиљна геомеханичка истраживања подлоге на профилу бране. Резултати испитивања спречавају могуће нежељене појаве и хаварије које могу настати ако се брана лоше повеже са подлогом. Та веза се обично остварује преко елемента који се назива "зуб", ако је подлога непрпусна, или инјекционим завесама ако је потребно пресецати филтрационе токове (слика XX).

Пре почетка насипања, неопходно је очистити темељ бране од хумусног слоја. Након завршеног насипања, хумус се враћа на низводну косину објекта. Исти поступак уклањања хумуса примењује се и на косине долине, односно на цео профил испод бране.

За насуте бране користе се природни, дофабриковани и индустријски материјали који задржавају стабилност својстава током употребе. Ако се својства материјала мењају, те промене се узимају у обзир при изради пројекта и избору димензија. За материјале који садрже лако растворљиве соли и недовољно разложене материје, потребно је обезбедити посебне доказе о њиховој погодности.

Према различитим домаћим али и светским стандардима, материјали који се користе за градњу земљаних брана према ужој намени материјала могу бити:

- Заптивни - за формирање водонепропусне зоне,
- Дренажно-филтрирани - за одвојење провирне воде и побољшање консолидације зона брана изграђених од стишљивих материјала,
- Заштитно-обложни - за спречавање ерозије,
- Носиви - за обезбеђивање стабилности и минималне деформације,
- Баластни - за повећање масе носиве зоне, са спогедним значајем чврстоће и деформабилности.

Материјали који се користе за градњу бране према својим основним својствима могу бити:

- Кохезивни - финозрни зрнасти материјали са више од 50% фракција мањих од 0,063 mm,
- Некоензивни - финозрни материјали са више од 50% фракција мањих од 0,063 mm, али са већим индексом пластичности,
- Некоензивни зрнасти материјали - садрже око 12% фракција мањих од 0,063 mm, а највеће зрно је око 5 mm),
- Грубозрни материјали - садрже више од 50% фракција већих од 5 mm,
- Мешани материјали - садрже 12-50% фракција мањих од 0,063 mm
- Побољшани материјали - којима се додају различити адитиви.

У случају недовољног претходног искуства са сличним материјалима, неопходно је испитати њихова геомеханичка својства као што су:

- Минералoшки састав (квалитативна и квантитативна анализа) фракција,
- Хемијски састав подземне воде,
- Експанзивност - бубрење, скупљање,
- Осетљивост према засићењу (при додиру са водом) у погледу промене деформабилности,
- Осетљивост према пулзационо - динамичком оптерећењу,
- Осетљивост према дисперзији глинених фракција у условима струјања воде из акумулације која је другачијег квалитета од подземне воде,
- Дуктилност - степен развлачења материјала до појаве пукотина,
- Пузање при сталном напону и релаксација напона при сталној деформацији,
- Брзина дисипације порних притисака,
- Деградација у времену, утицај мрза на чврстоћу.

На локацији где се планира експлоатација материјала потребно је провести истраживање како би се доказали:

- Залихе материјала у тачно одређеним границама потреба изградње,
- Униформност састава,
- Геомеханички квалитет материјала и
- Проценат отпада - јаловине.

За материјале који ће бити коришћени за насипање, изводе се лабораторијска и теренска испитивања како би се утврдила класификација и инжењерска својства потребна за:

- Експлоатацију у различитим временским условима,
- Уграђивање на најрационалнији начин,
- Постигнуће довољне водонепропусности (спољне и унутарње) и ерозионе сигурности,

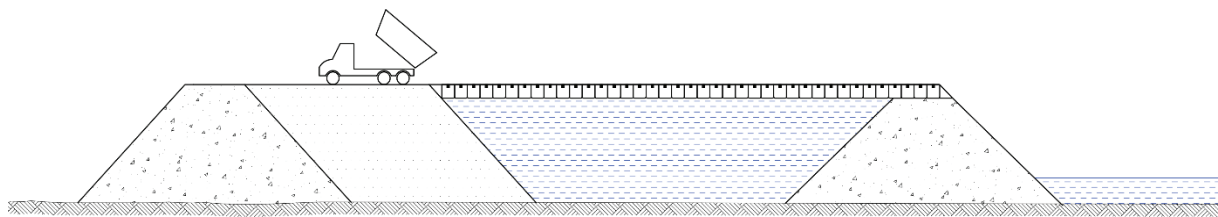
- Стабилност и деформабилност,
- Постојаност у експлоатационим условима.

Уграђивање и збијање материјала у брани представља завршни процес, који је од пресудног значаја за сигурност и трајност објекта. Пројектом се прописују технички услови за уграђивање, укључујући врсту и карактеристике машина (класичне стабилне за глиновити материјал или вибрационе машине за пасковити материјал), дебљину слојева, влажност и толеранцију на одступања од квалитета.

Процес насипања земљане бране може бити мокар или сув.

Мокри метод градње земљане бране подразумева уградњу влажног материјала у танким слојевима уз континуирано сабијање (слика 50). Пре почетка градње, материјал се припрема довођењем у оптимално влажно стање како би се постигла највећа могућа сабијеност, што се постиже додавањем или уклањањем воде у зависности од почетног стања материјала. Након тога, материјал се наноси у танким, равномерним слојевима, чија дебљина обично износи од 15 до 30 cm пре сабијања.

Сваки слој се затим сабија употребом ваљака, који могу бити челични, вибрациони или гусенични, у зависности од врсте материјала и потребног степена збијености. Током процеса изградње, контрола квалитета је кључна, па се редовно проверавају збијеност, влажност и механичка својства материјала како би се осигурала дуготрајност и стабилност бране. Предност мокрог метода је у томе што омогућава већу чврстоћу и стабилност конструкције, али истовремено захтева прецизну контролу влажности и додатно време за сушење појединачних слојева уколико дође до прекомерног влажења.



Слика 50. Мокри метод градње бране

Суви метод градње земљане бране заснива се на уградњи материјала са природним или малим садржајем влаге, без додатног влажења, уз интензивно сабијање. Овај метод се примењује када је расположиви материјал погодан за уградњу у сувом стању, што је често случај са грубозрнастим земљиштима, као што су шљункови и пескови. Материјал се наноси у слојевима, чија дебљина обично износи од 20 до 40 cm, а сабијање се изводи тешким ваљцима или вибрационим машинама како би се постигла одговарајућа густина и стабилност.

Једна од главних предности сувог метода је то што се избегава потреба за прецизном контролом влажности, што поједностављује процес градње и смањује зависност од временских услова. Осим тога, овај метод омогућава бржу изградњу у

поређењу са мокрим методом. Међутим, његова примена је ограничена на материјале који могу постићи довољну збијеност без додатног влажења, а уколико се користе ситнозрнаста земљишта, могуће је да ће брану карактерисати већа порозност и мања отпорност на ерозију. Због тога се овај метод чешће користи за градњу насипа и других конструкција где водонепропусност није од пресудног значаја.

Тело бране се увек гради нешто изнад пројектоване коте и благо испупчено, што је последица слагањем самог тела бране и консолидације подлоге.

7. ОСМАТРАЊЕ БРАНА

Осматрање брана, као сложених грађевинских објеката у природном окружењу, захтева мултидисциплинарни приступ, према стандардима који се користе. Главни облици осматрања укључују:

- **Визуелно осматрање** - Праћење видљивих делова бране и околине, са циљем уочавања промена, попут пукотина, деградације материјала или ерозије.
- **Инструментално осматрање** – Мерење промена помоћу специјализованих уређаја на кључним тачкама бране и темеља (реперне тачке) као што су дилатације, померања, притисци, температура и друго.
- **Геодетско осматрање** - Прецизна мерења померања тачака на брани, укључујући хоризонтална и вертикална померања.
- **Мерење подземних вода** - Праћење нивоа подземних вода и пијезометарских притисака.
- **Осматрање сеизмичких активности** - Употреба инструмената за мерење вибрација изазваних земљотресима.
- **Хидрометеоролошка мерења** - Прикупљање података о временским условима, температурама, падавинама, отицању, доминантним ветровима, релативној влажности и друго.

Циљ осматрања је да се обезбеди континуитет праћења током целокупног животног циклуса бране – од истраживања, преко изградње, па све до и током експлоатације. Програми техничког осматрања морају прецизирати врсте, обим и учесталост мерења. На основу података, процењују се:

- Да ли се пројектни услови остварују,
- Понашање објекта у односу на предвиђене услове,
- Потреба за додатним мерењима, санацијом или осигурањем објекта, ако су неке величине неповољније од пројектом предвиђених вредности и ако се утврди да те вредности угоржавају стабилност објекта.

У обзир се узимају и природни процеси, попут процеђивања воде кроз брану, деформација под новим оптерећењима, или ефекти земљотреса. Због различитих

фактора који могу утицати на различите делове објекта, систематско осматрање током времена је кључно за оцену стања бране.

Кључни фактори успешног осматрања укључују:

- Квалитет мерне опреме,
- Правилно постављање опреме на одговарајућим локацијама,
- Доследност у спровођењу осматрања,
- Правовремена интерпретација података.

Визуелно осматрање је основни вид праћења промена на брани и њеној околини. Основне промене које треба пратити укључују:

- Деградацију материјала услед температурних промена, појаве леда, таласа и деловање вегетације,
- Појава пукотина, денивелација и сличних уошљивих дисконтинуитета на осматраној површини,
- Ерозија површине услед механичког деловања површинских ерозионих сила, вегетације и гравитације,
- Ерозија филтрацијом услед механичког и физичко - хемијског деловања филтрационог струјања воде кроз брану и темеље,
- Стварање вегетације на дренажним објектима и смањење њиховог капацитета.

Деловање наведених фактора може бити појединачно или удружено. Важан аспект овог разматрања јесте систематско уочавање и континуирано праћење обима, интензитета и тенденције процеса и појава које представљају промену у односу на стање завршетка објекта и почетка његове функције. Подаци добијени визуелним посматрањем могу претходити мерљивим променама на инструментима, али су, поред тога, неопходни као допуна за боље разумевање осталих резултата посматрања. Визуелно посматрање треба да укаже на потребу проширења обима и врста инструменталних мерења, као и да помогне у одређивању локација за та додатна мерења.

Геодетско осматрање се спроводи геодетским методама и инструментима одговарајуће прецизности. Њиме се могу утврдити апсолутна и релативна померања контролних тачака (реперних тачака) у хоризонталној пројекцији и у вертикалној равни, као и релативна промена њихових међусобних растојања.

При осматрању померања бране, дозвољене тачности мерења износе ± 2 mm за хоризонтално, а ± 1 mm за вертикално померање. Контролне тачке са којих се врше мерења морају бити проверене у односу на удаљеније тачке, које су сигурно ван утицаја објекта и акумулације, односно преко државне мреже репера.

Осматрање вертикалних померања врши се на већем броју контролних тачака, јер су она референтна за хоризонталну раван. Контролне тачке морају бити заштићене од локалних утицаја, због чега се уграђују у масивне бетонске стубове, утемељене

најмање 60 cm испод површине терена. Ове тачке указују на општу тенденцију деформисања објекта и постављају се на растојањима од 30 до 50 m.

Осматрање хоризонталних померања врши се на контролним тачкама у критичним зонама и на локацијама од посебног значаја за оцену функционалности објекта. Обавезно се комбинује са осматрањем вертикалних померања.

Осматрање релативног растојања врши се на карактеристичним деловима бране или терена, где су такве промене важне за појаву неповољних напрезања, пукотина и сличних деформација. Локације за мерења дефинишу се пројектом. Неповољни облици деформисања, као што су размицање ивица круне бране или узводне и низводне ножице, осматрају се праћењем промена релативних растојања.

Осматрање напрегнутог стања врши се употребом уређаја познати као **стресметри** или **тензиометри** који, преко деформација осетљивих мембрана калибрисаних на одговарајући притисак, омогућавају одређивање величине напона који делују у телу бране или у њеним темељима. Они се обично уграђују у критичне тачке током изградње бране и повезани су са системима за прикупљање података који омогућавају континуирано праћење напрезања.

Осматрање порних притисака спроводи се уређајима познати као **пиезометри** који мере притисак у порној води, било преко деформације осетљиве мембране, било путем система вентила који се активирају при изједначавању притиска у земљишту. Осетљиве мембране долазе у контакт са порном водом кроз порозни камени филтер, који спречава деловање укупних напона на мембрану. Пиезометри се обично постављају на различитим дубинама и локацијама унутар бране и њених темеља како би се пратила стабилност и безбедност конструкције. Локације ових уређаја морају бити дефинисане пројектом.

Осматрање померања у телу бране заснива се на праћењу вертикалних и хоризонталних померања одређених тачака унутар конструкције. Ово се остварује коришћењем посебних уређаја (познати као **инклинометри** или **екстензометри**) који се састоје од елемента уграђеног у брану, приступног вода и мерног уређаја. Елемент система за осматрање, у виду челичних прстенова или крстова, уграђује се током изградње, док се приступни вод, у облику телескопске пластичне цеви, поставља паралелно са насипањем. Овај систем омогућава праћење померања уграђених елемената и током саме изградње. Осматрање се врши увођењем индикаторског уређаја у приступну цев, при чему он преко кабла шаље сигнал када се поравна са уграђеним елементом (металним прстеном, крстом и сл.).

Осматрање искључиво хоризонталних померања врши се мерењем инклинације, односно одступања савитљиве вертикалне цеви од почетног положаја на различитим висинама. Ово одступање мери специјални уређај – инклинометар, којим се утврђује величина и правац одступања у односу на север. Сукупним мерењима на малим висинским размацима одређује се релативни положај осе уграђених савитљивих

цеви у односу на њихов почетни положај. Дозвољена грешка мерења износи ± 5 mm за померање и ± 15 mm за инклинацију. Локације и методе осматрања дефинише пројекат.

Осматрање релативних деформација услед истезања или сабијања врши се специјалним уређајима који се састоје од више телескопских цеви, бочно повезаних са земљаном масом помоћу попречних ребара. Померање ових цеви, било увлачењем или извлачењем, региструје се мерним уређајем (познати као екстензометри или деформетри), а подаци се електричним путем преносе до регистарске станице на површини бране или терена. Мерење релативних деформација врши се у зонама бране које задржавају воду, као и на другим местима где су деформације услед затезања и настанка пукотина недопустиве.

Осматрање пиезометарских притисака мора се спроводити у областима у којима се очекује процеђивање кроз брану и њене темеље. Потребно је омогућити приступ пиезометарским цевима ради читавања нивоа воде на површини терена, изнад тачке мерења притиска. Локације мерења морају бити дефинисане пројектом. Пошто пиезометри прихватају доток воде дуж већег сегмента (30–60 cm), добијени резултати представљају просек за ту дужину. При брзим променама нивоа подземне воде или притиска, пиезометри могу каснити у реакцији, при чему је кашњење веће ако је краћи пријемни део пиезометра.

Осматрање процеђивања мора обухватити учесталост осматрања, количину и квалитет процедне воде, начин и место њене појаве, временски однос према нивоу воде у акумулацији и стању подземних вода у приобаљу. Количина процеђивања мери се на захватима са хидраулички обликованим током. Ако није могуће директно измерити укупне количине процеђивања, мере се промене у количини воде изнад нивоа доње воде. Квалитет процедне воде прати се углавном анализом хемијског састава и сувог остатка.

Осматрање утицаја земљотреса подразумева праћење вибрација темеља и тела бране. Пројектом се мора предвидети постављање најмање два инструмента (акцелерографа) у темељима објекта и у основној геолошкој средини ради регистрације кретања земљишта, као и најмање три инструмента на површини или у телу бране ради добијања података о реакцији конструкције на сеизмичке таласе.

Осматрање метеоролошких и хидролошких услова има помоћну улогу, јер омогућава боље тумачење осталих мерења и може имати значајан утицај на поједине елементе или функцију објекта. Ова осматрања морају бити дефинисана пројектом.

Сви подаци осматрања помажу у доношењу одлука о безбедности бране и њеној функционалности.

8. ЕВАКУАЦИОНИ ОРГАНИ

Евакуациони органи на земљаним бранама имају кључну улогу у управљању водама унутар акумулација, посебно у ситуацијама када је потребно уклонити вишак воде како би се очувала стабилност бране и заштитила околна подручја. Ови органи омогућавају контролисано испуштање воде, спречавајући преоптерећење бране и смањујући ризик од поплава или оштећења структуре. Евакуационе органе можемо поделити у две основне групе.

Прва група су преливни органи. Њихова функција је да евакуишу воду тако да простор за пријем поплавног таласа у акумулацији буде увек празан и спреман за прихват новог таласа. Преливни органи омогућавају да вишак воде буде контролисано испуштен када ниво у акумулацији премаша предвиђене границе, чиме се смањује притисак на брану и омогућава њена стабилност.

Друга група су испусни органи, чији је задатак да омогуће пражњење акумулационог басена. Ови органи се користе у различите сврхе, као што су испуштање наноса, ремонт бране или за безбедносне разлоге. Такође, испусни органи могу бити коришћени за претпражњење акумулације, чиме се ствара простор за регулисање нивоа воде и спречава прекомерно пуњење бране.

Комбинација ова два типа органа омогућава ефикасно управљање водама унутар бране, штитећи објекат и околину, као и обезбеђујући да брана функционише у складу са пројектованим условима.

8.1. Преливни органи

За насуте земљане бране, без обзира на њихову величину, преливање воде преко круне може бити веома опасно, а у екстремним случајевима и катастрофално. Ризик расте са повећањем висине бране и запремине акумулације, а нарочито ако се низводно од акумулације налазе насељена подручја. У таквим случајевима неопходно је обезбедити брану адекватним хидрауличким димензионисањем прелива како би се омогућио сигуран пријем воде у складу са учесталосту појаве максималних нивоа. За мање објекте, дозвољено је да се рачунају краткотрајан прелив у облику танког млаза, уз претпоставку да највећи део воде пређе преко прелива, док су низводна косина и круна бране затрављени.

Према положају прелива и максималном дозвољеном нивоу воде у акумулацији, преливне органе можемо поделити на следеће врсте:

1. **Површински преливни органи** – омогућавају преливање воде са површине акумулације.
2. **Дубоки преливни органи** – смештени на дубљим нивоима акумулације за контролисано преливање.

3. **Диференцијални преливни органи** – протежу се од темеља до врха бране, омогућавајући равномерно преливање.
4. **Дубински преливни органи** – користе се у специфичним деловима бране, углавном на већим дубинама.

Код комплексно коришћених насутих земљаних брана најчешће се примењују површински преливни органи, у облику бочних и левкастих прелива. На бетонским бранама често се користи сифонски прелив различитих облика.

Левкасти прелив, или шахтни прелив, одводи воду кроз цевовод постављен у темељу бране, уз притисак. На насутим земљаним бранама најчешће се користи бочни прелив због своје ефикасности.

Бочни прелив је смештен ван тела бране, и вода тече са слободним нивоом. Овај тип прелива укључује све карактеристике брзоток система: улазни део, канал и слапиште. Бочни прелив је обично најскупљи део објекта, па је хидрауличко димензионисање, засновано на принципима брзотока, веома важно. Кључни фактори у овом процесу укључују количину воде коју прелив мора да спроведе, чиме се одређују дужина преливне ивице, димензије канала и слапишта.

Први корак у дизајну је избор типа прелива. Преливи се обично праве од армираног бетона, са правоугаоним или трапезним пресеком. Важно је правилно фундирање прелива, односно бетонска облога мора бити постављена на контрафилтарску подлогу како би се обезбедила стабилност. Такође, облога мора омогућити пролаз подземних вода кроз отворе са поклопцима и дренажним призмама, чиме се избегава неравномерно слегање објекта изазвано потиском.

У статичком смислу разматрају се два критична случаја: пуно корито и празно корито са високим нивоом подземне воде. При њиховој анализи потребно је обратити пажњу на следеће факторе:

1. Пуно корито (максимални водостај у акумулацији)

- Хидростатички притисак на конструкцију – Дејство велике количине воде врши притисак на све делове бране и њених структура, што утиче на стабилност.
- Стабилност косина (земљане бране) – Висок водостај може довести до слабљења стабилности унутрашње косине због притиска воде и могућег процеђивања.
- Хидрауличко подривање и ерозија – Повећан проток преко прелива може изазвати ерозију на контактним зонама и низводним деловима.
- Притисци на темељ (фундирање прелива) – Конструкција прелива мора бити пројектована тако да издржи све силе које делују при максималном водостају.
- Расипање енергије воде – Велики проток може довести до снажне ерозије низводно, па је неопходно обезбедити ефикасно расипање енергије.

2. Празно корито са високим нивоом подземне воде

- Уздизање подземне воде и узгон – Висок ниво подземне воде може створити значајан узгон на конструкцију прелива, што може довести до подизања или испливавања појединих елемената.

- Диференцијални притисци – Разлика притисака између спољашње и унутрашње стране конструкције може довести до појаве пукотина и напрезања.
- Могућност клизања темеља – Ако се конструкција налази на вододрживом тлу, повећан притисак подземне воде може изазвати смањење ефективног напрезања и нестабилност темеља.
- Продор воде кроз темељ и бочне зоне – Вода може продирати испод конструкције и изазвати процеђивање и подривање темеља.

Оба случаја захтевају пажљиву анализу статичке стабилности конструкције. Код пуног корита кључни фактори су притисак воде, стабилност косина и заштита од ерозије, док код празног корита са високим нивоом подземне воде критични су узгон, диференцијални притисци и ризик од подривања темеља.

Због тога је неопходно предвидети одговарајуће дренажне системе, заштиту од ерозије, армирање критичних зона и осигурање стабилности темеља приликом пројектовања.

Преливни органи имају кључну улогу у трансформацији поплавног таласа. Ефекат прелива на ову трансформацију зависи од типа улазног дела, као што су уставе или диференцијални преливи. Приликом хидрауличког димензионисања прелива, морају се ускладити следећи контрадикторни захтеви:

1. **Довољан капацитет за евакуацију воде vs. економичност конструкције** - Прелив мора бити довољно велик да безбедно пропусти максималне поплавне воде, али истовремено не сме бити сувише велики јер би повећао трошкове изградње.
2. **Стабилност бране vs. што већа искоришћеност акумулационог простора** - Висина прелива мора бити таква да не угрожава стабилност земљане бране, али и да обезбеди што већи користан волумен акумулације.
3. **Безбедност при великим водама vs. минимизација губитака воде** - Прелив мора осигурати да нема ризика од преливања бране и ерозије низводно, али и да не доведе до непотребних губитака воде током нормалног рада.
4. **Контрола ерозије и подривања vs. што већа ефикасност прелива** - Брзина воде која се испушта мора бити таква да не изазове оштећења на конструкцији или подлози низводно, али уз што мање додатних хидротехничких мера за расипање енергије.
5. **Једноставност и поузданост у раду vs. флексибилност у експлоатацији** - Прелив мора бити довољно једноставан за одржавање и рад у различитим режимима, али и омогућити регулисање испуштања воде у зависности од потреба акумулације.

Ови захтеви се морају пажљиво размотрити и ускладити кроз пројектовање, како би се осигурала безбедност, дуготрајност и ефикасност преливног система.

Величину прелива условљавају: меродавни поплавни талас, запремина акумулације, као и капацитет низводног корита. Усаглашавање ових елемената мора бити оптимално како би се обезбедила функционалност и сигурност бране.

8.2. Испусни органи

Испусни органи, односно темељни испуст, има основни задатак да испразни акумулацију у одређеном временском периоду. Разлози за потпуно или делимично пражњење акумулације могу бити различити:

- Уклањање наноса из акумулационог басена (мутне струје),
- Поправке тела бране,
- Безбедносни разлози,
- Претпражњење акумулације,
- Освежавање и обнављање језерске воде.

У последње време, темељни испуст све чешће служи за претпражњење акумулације. Уз добро организован систем прогнозе и најаве поплавних таласа, акумулација се може унапред испразнити, чиме се повећава запремина која може примити надолazeћи талас. Ови испуси обично имају веће димензије од стандардних, јер је потребно у релативно кратком временском периоду испустити велику количину воде. Упркос повећању димензија, ови испуси имају повољан ефекат на трансформацију поплавног таласа.

Темељни испуст је цев која је постављена у темељ бране, са решетком на улазу, затварачем и бучницом на излазу. Цеви су ослоњене на бетонску плочу, а дуж испуста се на одређеним растојањима постављају плоче (застори или кецеље) које су постављене попречно на осу цеви. Овај елемент омогућава продужени пут за филтрацију воде кроз цев, чиме се смањује ризик од суфозионих процеса у том делу објекта. Димензије цеви зависе од специфичне намене испуста и величине акумулације. Такође, темељни испуст треба да има одређену еластичност, како би могао да реагује на неравномерно слегање тела бране или у случајевима земљотреса.

Хидрауличко димензионисање темељног испуста заснива се на одвођењу воде из резервоара са променљивим нивоом. За правилно пројектовање неопходно је познавати количину воде која треба да се испусти, време за које се евакуација мора обавити, као и граничне услове у одводном каналу. Капацитет одводног канала, постојећи објекти на њему и могућност безбедног прихвата и провођења воде представљају ограничавајуће факторе у процесу димензионисања. Поред тога, морају се узети у обзир хидраулички губици дуж водотока, кавитација, струјна стабилност и динамички притисци који могу утицати на рад испуста.

Статичко димензионисање темељног испуста подразумева проверу стабилности конструкције под утицајем унутрашњих и спољашњих сила. Основни фактори који се анализирају укључују хидростатички притисак, утицај подземних вода, узгон, ефекте ерозије и вибрације изазване протоком. Посебна пажња се посвећује интеракцији испуста са подлогом и браном, како би се спречили нежељени деформациони процеси и осигурала дуготрајна стабилност објекта.

9. УЗРОЦИ РУШЕЊА МАЛИХ ЗЕМЉАНИХ БРАНА

Иако у нашој земљи није било случајева рушења земљаних брана, бројни примери из света показују да рушење брана, посебно малих земљаних брана, може довести до значајних последица. У Италији и Бугарској, на пример, било је случајева у којима су земљане бране порушене, али је највећа опасност при рушењу великих брана, које акумулирају велике количине воде. У тим случајевима последице на низводном подручју могу бити катастрофалне, јер у случају изненадног рушења велике бране огромне количине воде могу да се излију на долину и сруше низводне објекте. Насупрот томе, рушење малих брана не узрокује значајне штете, јер акумулације у малим бранама имају мање количине воде, а рушење таквих брана није обично изненадно.

Рушење бране доводи до појаве поплавног таласа који се брзо шири низводно, а хидрауличке последице требају бити пажљиво разматране током пројектовања бране. Талас који се формира након рушења бране је сложена појава која захтева примену напредних математичких и хидрауличких модела за њено предвиђање. Процењују се различите последице као што су брзина и величина таласа који ће се ширити низводно, што је од пресудне важности за заштиту људских живота и имовине.

Процена хидрауличких и других последица рушења бране врши се најчешће помоћу:

- Физичко-хидрауличког модела, који омогућава директно тестирање ефеката рушења на мањим моделима,
- Нумеричким моделима који користе рачунарске симулације за предвиђање пропагације таласа и других последица.

Комбиновање физичког модела и нумеричке симулације даје најтачније процене, али се овај метод користи углавном за велике бране чије рушење би могло довести до великих људских и материјалних губитака.

У контексту пројектовања и изградње земљаних брана, разумевање ових узрока и последица је кључно за обезбеђивање сигурности бране и избегавање потенцијалних катастрофа у случају њеног рушења.

Основни узроци рушења земљаних брана су:

1. Преливање преко бране,
2. Пропуштање воде кроз тело бране,
3. Клизење косина бране,
4. Дејство таласа на косине и круну бране,
5. Темељни испуст и
6. Остали узроци.

9.1. Рушење услед преливања

Рушење високих брана услед преливања воде преко круне бране чини око 30% свих случајева рушења брана. Међутим, проценат рушења малих земљаних брана због преливања је значајно мањи и износи око 17%. Ова разлика проистиче из чињенице да преливање на високим бранама траје много дуже него на малим, јер се високе бране граде на већим сливовима, док су мале бране на мањим. Такође, мали проценат рушења малих брана може се приписати чињеници да су ове бране релативно нови објекти. Време трајања поплавног таласа зависи од величине слива, па ће на малим акумулацијама преливање обично трајати од 10 минута до неколико часова, док код великих сливова преливање може трајати и неколико дана.

Преливање воде преко круне бране може се догодити у следећим случајевима:

1. **Прекорачење капацитета преливног органа** – Ако се појави већа количина воде од пројектованог капацитета преливног система, може доћи до неконтролисаног преливања.
2. **Мало надвишење бране** – Уколико је надвишење бране изнад нормалног и максималног нивоа воде мало, таласи изазвани ветром могу довести до преливања преко круне.
3. **Губитак носивости подлоге бране** – У случају слабљења или неравномерног слегања темеља, може доћи до деформација конструкције, што повећава ризик од преливања.
4. **Недовољно сабијање материјала у телу бране** – Ако материјал није адекватно сабијен током изградње, може доћи до његовог постепеног збијања и слегања, чиме се смањује ефективна висина бране.
5. **Недовољно одржавање и контрола прелива** – Акумулација наноса или клизање земљаног материјала у одводни канал могу смањити капацитет одвођења воде, што доводи до преливања.
6. **Запушење преливног прага** – Ако се на преливном прагу нагомилају плутајући материјали, грање, рибе или други остаци, пропусна моћ прелива може бити значајно умањена чак и до 80%.
7. **Кашњење у испуштању воде** – Код брана са затварачима, неблаговремено испуштање воде може довести до наглог пораста нивоа у акумулацији и могућег преливања.
8. **Запушење евакуатора** – Уколико евакуациони канали нису чисти и дође до њиховог зачепљења, вода се неће благовремено одводити, што може изазвати преливање преко круне.

9.2. Рушење услед провирних вода

Контролисано провирање воде кроз земљану брану није опасно за стабилност објекта, под условом да је вода бистра и да количина која избија не прелази пројектоване вредности. Међутим, провирање не сме да се појави на низводној косини бране. Због тога је приликом пројектовања неопходно обезбедити да се провирна линија спусти у терен пре него што изађе из тела бране.

За безбедност бране, провирање воде кроз њено тело и темељ мора бити под сталним надзором. **Мутна провирна вода је први знак да је дошло до ерозије унутар бране (суфозије).** Ово указује да вода односи ситне честице материјала који обезбеђује водонепропусност, чиме се угрожава стабилност објекта. У том случају, неопходно је одмах смањити ниво воде у акумулацији. Ако мутноћа не нестане, акумулацију треба испразнити и ангажовати стручњаке ради утврђивања узрока и предузимања санационих мера. **Брза интервенција је кључна**, јер у супротном провирање може да се појача, што доводи до прогресивног рушења бране.

Узроци рушења бране услед провирања:

1. **Недостатак одговарајуће дренаже** – Ако брана није пројектована са адекватним дренажним системом.
2. **Неодговарајући тип дренаже и филтера** – Избор дренажног система мора бити прилагођен врсти материјала од којег је брана изграђена.
3. **Запушавање дренажног система** – Ако се дренажа изгради од ситних честица, може доћи до зачепљења филтера, што доводи до појаве провирања на низводној косини бране.
4. **Неправилан распоред материјала у филтеру** – Ако при изградњи није поштовно правило градације честица, може доћи до ломљења филтера и изношења ситних честица из тела бране.
5. **Танак филтерски слој** – Ако филтер није довољне дебљине, неће испуњавати своју функцију задржавања финих честица.

Поред провирања кроз тело бране, рушење може бити изазвано и процуривањем подземне воде из основе бране, што доводи до губитка стабилности конструкције.

9.3. Рушење услед клизања косина бране

Клизање косина насутних земљаних брана најчешће настаје услед следећих фактора:

1. **Неадекватно извршен прорачун стабилности косина** – Ако се при изради пројекта користе неисправне претпоставке или непотпуни подаци, стабилност косина може бити погрешно процењена.

2. **Мали коефицијент сигурности** – Уколико је усвојени коефицијент сигурности недовољан, брана може бити подложна отказу услед неочекиваних услова.
3. **Неодговарајући материјали** – Уградња неиспитаних или материјала са лошијим геомеханичким карактеристикама од предвиђених у прорачуну може довести до нестабилности.
4. **Рашквашћавање низводне косине** – Недовољна контрола провирне воде може довести до акумулације воде на низводној косини, што повећава ризик од клизања.
5. **Неисправан прорачун узводне косине** – Уколико се узводна косина не пројектује за најнеповољније услове потпуног потапања, ризик од отказа је значајно увећан.
6. **Нагле промене нивоа акумулације** – Брзо пуњење или пражњење резервоара може изазвати динамичке ефекте који утичу на стабилност косина.
7. **Сеизмички утицаји и померање тла** – Земљотреси могу изазвати поремећаје у конструкцији бране, што доводи до појаве пукотина и слабљења стабилности.
8. **Саобраћај на брани** – Ако брана није пројектована за саобраћајно оптерећење, пролаз возила може створити вибрације и динамичке ударе који утичу на стабилност.
9. **Ерозија услед дејства таласа** – Недовољно заштићена косина подложна је оштећењу због ударног дејства таласа.
10. **Притисак леда** – Залеђена вода у акумулацији може проузроковати напоне на косинама бране, што доводи до њихове деградације.
11. **Неједнако слегање тла** – Диференцијално слегање може довести до појаве напона и слабљења носивости тла испод бране.
12. **Рушење прелива и поткопавање бране** – Оштећења преливног органа или поткопавање бране услед ерозије могу довести до губитка стабилности косина и урушавања бране.

Мере превенције:

Грешке у прорачуну стабилности морају бити елиминисане кроз адекватна геомеханичка испитивања и праћење услова на терену. Квалитет уграђеног материјала мора се континуирано контролисати, а уколико дође до промена, неопходне су корекције у прорачуну стабилности.

Коефицијент сигурности за мале земљане бране обично износи **1,3 до 1,5**, а његова вредност зависи од методе прорачуна и потенцијалног ризика по људске животе.

Иако се земљане бране сматрају једним од најсигурнијих типова објеката у случају земљотреса, могуће је њихово рушење уколико дође до значајног померања тла. Најопасније је када земљотрес изазове пукотине у телу бране, кроз које вода може да продире и додатно угрози стабилност.

Лоше одржавање малих брана, укључујући преливне органе, представља значајан ризик. Ако се преливни орган оштети и дође до утицаја на ножицу бране, може доћи до клизања косина и рушења објекта.

9.4. Рушење услед удара таласа

Насутне земљане бране изграђене су од материјала који су осетљиви на дејство удара таласа. Под утицајем таласа долази до постепеног разарања структуре бране, које се испољава кроз следеће процесе: поткопавање круне бране, одношење материјала, смањење ширине круне, повећање нагиба косина и, у крајњем случају, рушење објекта.

Чак и када је узводна косина бране заштићена бетонском облогом, може доћи до оштећења како саме облоге, тако и земљаног тела бране. Оштећење бетонске облоге под дејством таласа најчешће се јавља у следећим случајевима:

1. **Недостатак филтарског слоја** – Ако бетонска облога не садржи адекватан филтарски слој, вода може продирати између бетона и земљане подлоге, што доводи до испирања материјала и унутрашње ерозије.
2. **Мала дебљина бетонске или камене облоге** – Уколико је дебљина облоге недовољна, она не може да издржи дејство таласа и лакше пуца или се оштећује.
3. **Мали уграђени елементи** – Ако су елементи облоге (камене коцке, бетонски блокови) премалих димензија, они нису довољно масивни да пруже отпор снази таласа.
4. **Неправилно израђене спојнице** – Лоша израда спојница између бетонских плоча или блокова може довести до њиховог раслојавања и продора воде, што убрзава оштећење облоге.
5. **Недовољно одређена сила удара таласа** – Ако у прорачуну није правилно одређен интензитет удара таласа на конструкцију, може доћи до преоптерећења и оштећења бране.

Иако оштећења услед удара таласа могу угрозити стабилност насутних брана, рушење бране из овог разлога је ретко. Код мањих брана није забележен ниједан случај потпуног рушења услед овог узрока.

9.5. Рушење услед неисправности преливних и испусних органа

Преливни органи као узрочници рушења

Преливни органи су један од најчешћих узрока рушења малих земљаних брана. Њихова функција је да безбедно евакуишу вишак воде из акумулације, а њихов неисправан рад може довести до критичних оштећења бране. До рушења може доћи у следећим случајевима:

1. **Недовољне димензије прелива** – Ако прелив нема довољан капацитет за евакуацију воде, ниво у акумулацији може премашити висину бране, што доводи до преливања воде преко круне и ерозије конструкције.

2. **Неочекивано велика количина воде** – У случају да се јави већи доток воде него што је предвиђено прорачуном, повећани хидраулички притисак може угрожавати стабилност бране.
3. **Незавршени преливни органи** – Ако се акумулација напуни пре него што су преливни органи у потпуности завршени, њихова нефункционалност може изазвати проблеме са одвођењем воде.
4. **Рушење самог прелива** – Уколико дође до оштећења или рушења прелива, он губи способност контролисаног испуштања воде, што може довести до изненадног пораста нивоа воде и преоптерећења бране.
5. **Недовољно одржавање преливних органа** – Неадекватно или нередовно одржавање може довести до зачепљења, оштећења или смањене функционалности прелива, што угрожава стабилност бране.

Испусти као узрочници рушења

Испусти представљају кључне елементе бране, јер омогућавају контролисано испуштање воде из акумулације. Код већине малих акумулација, затварачи на испусним цевима постављени су на низводној страни, што значи да су под сталним притиском воде. Оваква поставка може довести до механичких оштећења, пуцања цеви и, у најгорем случају, до рушења бране. Када се затварач постави на узводну страну, ризик од оштећења се смањује, због чега се у новијим пројектима овај приступ све чешће примењује ради побољшања безбедности. Испусне цеви могу бити оштећене и услед притиска земљаног материјала или неједнаког слегања земљишта.

Најчешћи узроци оштећења испуста:

1. **Положај на нестабилној подлози** – Ако се испуст постави на неадекватно стабилизовану или неравну подлогу, може доћи до померања и оштећења цеви.
2. **Неправилно постављене цеви** – Лоше припремљена подлога или непрецизно постављање цеви може довести до њиховог напрезања и пуцања.
3. **Лоше спајање цеви** – Ако спојеви нису добро изведени, вода може продирати дуж цеви, што може довести до испирања земљишта и нестабилности бране.
4. **Оштећења приликом насипања бране** – Током изградње може доћи до механичких оштећења испусних цеви, што касније утиче на њихову функционалност.
5. **Недовољно сабијен материјал око цеви** – Лоше сабијање материјала може довести до стварања празнина кроз које вода продире, узрокујући ерозију.
6. **Оштећења током изградње** – Непажљиво копање рова за испусне цеви или недовољна контрола током градње може угрозити њихову стабилност.
7. **Механичка оштећења** – Оштећења услед рада грађевинских машина могу довести до пукотина и смањења трајности испуста.

8. **Замрзавање воде у цевима** – Ако се вода у испусним цевима замрзне, могу се створити насlage леда које блокирају проток воде и доводе до повећаног притиска у систему.

При пројектовању и изградњи испуста, неопходно је користити материјале високог квалитета и осигурати да су сви делови у складу са стандардима и прописима. Само уз адекватно одржавање и правилну уградњу могуће је спречити потенцијална оштећења која би могла угрожити стабилност бране.

9.6. Рушење усле осталих узрочника

Остали узроци рушења малих земљаних брана укључују:

1. **Слабо и нестручно одржавање** – Недовољно или неправилно одржавање бране и објеката у њој веома је чест узрок рушења. Одржавање бране подразумева редовну и благовремену инспекцију објекта (оскултација објекта), која мора бити изведена на високом техничком нивоу. За мале бране, посебну пажњу треба посветити хидрауличкој инспекцији, јер губитак воде из малих акумулација може имати значајне последице не само са техничког већ и са економског аспекта. Неадекватно одржавање и неуклањање започетих оштећења на било ком делу бране могу довести до њеног рушења. Такође, неадекватно одржавање на косинама, као што је остављање дрвећа да расте или гајење детелине, може бити проблем. Детелина или друге врсте биљака које имају дугачак и дебео корен који, када се распадне, ствара каверне и доводи до слабљења и рушења објекта.
2. **Насилно рушење** – У неким случајевима, рушење брана може бити последица намерних или насилних акција, као што су саботажа или непланирана људска интервенција.
3. **Утицај животиноског фактора** – Животиње као што су водене волухарице, кртице и бизамски пацови понекад могу изазвати оштећења на бранама. Највећа опасност је за бране у којима се језеро повремено пуни и празни, јер животње као што су набројане праве канале који могу ослабити конструкцију.
4. **Лоша изградња објекта** – Ако брана није правилно изграђена, или ако су коришћени неадекватни материјали, то може довести до њеног оштећења и рушења. Лош прорачун при пројектовању, неадекватан избор материјала или нестручно извођење радова могу значајно угрожити стабилност бране.
5. **Лош прорачун** – Грешке у прорачунима стабилности бране или неадекватан избор дизајна могу резултирати slabим тачкама у конструкцији које временом могу довести до рушења.
6. **Клизанје околног терена у акумулациони простор** – У неким случајевима, померање терена око бране може довести до урушавања околних делова и угрожавања интегритета бране.

Сви ови фактори, било да се раде по незнању или из небриге, могу значајно ослабити брану и довести до њеног рушења ако се не предузму одговарајуће мере на време.

10. ПИТАЊА ЗА ПРОВЕРУ ЗНАЊА ИЗ ОБЛАСТИ: АКУМУЛАЦИОНИ БАСЕНИ У ФУНКЦИЈИ ЗАШТИТЕ ОД ЕРОЗИЈЕ

1. Трансформација поплавног таласа у акумулационом базену коришћењем евакуационих органа
2. Техничке препоруке за извођење радова код насутих земљаних брана
3. Испуст - намена, принципи хидрауличног димензионисања
4. Преливи код насутих земљаних брана - врсте, намена, принципи хидрауличног и статичког димензионисања
5. Тело насуте земљане бране - хидраулички и статички прорачун, облога косина, дренажа
6. Тело насуте земљане бране - облици, противфилтрациони елементи
7. Елементи насутих земљаних брана
8. Меке бране - облици, основна својства, примена
9. Земљане бране - облици, основна својства, примена
10. Камене бране - облици, основна својства, примена
11. Бетонске бране - облици, основна својства, примена
12. Класификација брана
13. Избор локације бране - хидрогеолошки услови, анализа наноса, потребе корисника
14. Избор локације бране - карактеристике слива, климатски чиниоци, топографски услови
15. Акумулациони базени - примена, услови градње, коришћење

ЛИТЕРАТУРА

1. Adrien, N.G. (2003). Computational Hydraulics and Hydrology: An Illustrated Dictionary (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203494493>
2. Barbalić, Z. (1989). Riječna hidrotehnika – Regulacija rijeka. Sarajevo: Građevinski fakultet.
3. Berga, L. (Ed.). (2003). RCC Dams - Roller Compacted Concrete Dams: Proceedings of the IV International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Madrid, Spain, 17-19 November 2003- 2 Vol set (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203741276>
4. Blake, L.S. (Ed.). (1989). Civil Engineer's Reference Book (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482269260>
5. Blinkov, I., Kostadinov, S., & Marinov, I. T. (2013). Comparison of erosion and erosion control works in Macedonia, Serbia and Bulgaria. International Soil and Water Conservation Research, 1(3), 15-28. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30027-7](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30027-7)
6. Cabrera, M. (Ed.). (2003). Dam Maintenance and Rehabilitation: Proceedings of the International Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams, Madrid, 11-13 November 2002 (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315140728>
7. Chadwick, A., Morfett, J., & Borthwick, M. (2021). Hydraulics in Civil and Environmental Engineering (6th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003026839>
8. Cheng, L., Draper, S., & An, H. (Eds.). (2014). Scour and Erosion: Proceedings of the 7th International Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, 2-4 December 2014 (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17703>
9. Dams, W.C.O. (2000). Dams and Development: A New Framework for Decision-making - The Report of the World Commission on Dams (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315541518>
10. Đeković, V. (1997). Projektovanje u bujičarstvu (udžbenik). Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
11. Doherty, P. H. (2001). Soil Erosion and Conservation.
12. Đorović, J. (2005). Erozivni procesi i mere zaštite. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Šumarski fakultet.
13. Dožić, S., & Ljujić, R. (2006). Šumske melioracije (udžbenik). Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
14. Dragović, N. (2006). Organizacija protiverozivnih radova (skripta). Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu.

15. Eslamian, S., & Eslamian, F. (Eds.). (2022). Flood Handbook: Analysis and Modeling (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429463938>
16. European Committee for Standardization. (2006). EN 752: Drain and Sewer Systems - Design and Construction. CEN.
17. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2000). Soil Erosion by Water: Some Measures for Its Control on Cultivated Land. Rome.
18. FAO. (1986). Watershed Management Field Manual: Torrent Control. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
19. Fell, R., & Fry, J.-J. (Eds.). (2007). Internal Erosion of Dams and Their Foundations: Selected and Reviewed Papers from the Workshop on Internal Erosion and Piping of Dams and their Foundations, Aussois, France, 25-27 April 2005 (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482266146>
20. Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., & Bell, G. (2005). Geotechnical Engineering of Dams (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/NOE0415364409>
21. Gavrilović, Z. (1972). Inženjerska hidrologija. Beograd: Građevinska knjiga.
22. Gavrilović, Z. (1988). Inženjerska zaštita od bujica. Beograd: Građevinska knjiga.
23. Goldin, A.L. (1992). Design of Earth Dams (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315141022>
24. Hager, W. H., & Boes, R. M. (2014). Hydraulic structures: a positive outlook into the future. Journal of Hydraulic Research, 52(3), 299–310. <https://doi.org/10.1080/00221686.2014.923050>
25. Hartmann, T. (2011). Clumsy Floodplains: Responsive Land Policy for Extreme Floods (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315572475>
26. Hey, R. D. (1990). Environmental river engineering. Journal of the Institution of Water and Environmental Management, 4(1990), 335–340.
27. Hudson, N. W. (1981). Soil Conservation. Ithaca, NY: Cornell University Press.
28. Institut za vodne resurse „J. Ž. Rakić“. (2014). Zajednički vodni resursi: Erozija i zaštita. Beograd: Institut za vodne resurse.
29. Jackson, D.C. (Ed.). (1997). Dams (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315258591>
30. Jevtić, L. (1978). Inženjerski priručnik za rešavanje problema iz oblasti bujičnih tokova i erozije. Izdavačko-informativni centar studenata, Beograd.
31. Jobin, W. (1999). Dams and Disease: Ecological Design and Health Impacts of Large Dams, Canals and Irrigation Systems (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482271836>
32. Jovanović, M. B. (2022). Regulacija reka – radovi i građevine.
33. Jovanović, M. B. (2023). Jedan pogled na regulaciju naših reka u sadašnjosti i budućnosti. Vodoprivreda, 55(321-322), 1-11.
34. Jugoslovenski komitet za eroziju i zaštitu zemljišta. (1989). Preporuke za suzbijanje erozije u slivovima i vodotocima. Beograd: JKEZZ.
35. Kapor, R. (2008). Hidraulika. Građevinski fakultet, Beograd.

36. Kostadinov, S. (1993). Mogućnost merenja i prognoze pronosa nanosa u bujičnim tokovima. Monografija "Uzroci i posledice erozije zemljišta i mogućnosti kontrole erozionih procesa", Šumarski fakultet, Beograd, str, 58-67.
37. Kostadinov, S. (1996). Bujični tokovi i erozija. Beograd: Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
38. Kostadinov, S. (2008). Bujični tokovi i erozija (udžbenik). Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
39. Kostadinov, S., & Markovic, S. (1996). Soil erosion and effects of erosion control works in the torrential drainage basins of southeast Serbia. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, 236, 321-332.
40. Kundzewicz, Z.W. (Ed.). (2012). Changes in Flood Risk in Europe (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12348>
41. Kuspilić, N. (2008). Hidrotehničke građevine – dio 2: Građevine na vodotocima. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
42. Lackóová, L., & Dufková, J. K. (2021). Erodible fraction content change in long-term wind erosion duration. Acta Horticulturae et Regiotecturae, 24(1), 56–62. <https://doi.org/10.2478/ahr-2021-0024>
43. Lal, R. (1990). Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management. McGraw-Hill.
44. Lamond, J., Booth, C., Hammond, F., & Proverbs, D. (Eds.). (2011). Flood Hazards: Impacts and Responses for the Built Environment (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11050>
45. Lautze, J. (Ed.). (2014). Key Concepts in Water Resource Management: A Review and Critical Evaluation (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315884394>
46. Lewis, B. (2013). Small Dams: Planning, Construction and Maintenance (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16062>
47. Li, J., Xiong, M., Sun, R., & Chen, L. (2024). Temporal variability of global potential water erosion based on an improved USLE model. International Soil and Water Conservation Research, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.005>
48. Lukić, J. (2011). Prirodna osnova životne sredine. Novi Sad: Prirodno-matematički fakultet.
49. Marinov, I. T., & Bardarov, D. (2005). Erosion state of the soils in the forest fund. Forest science, 4, 69-78.
50. Milanović, D. (2016). Upravljanje vodnim tokovima i zaštita od erozije. Beograd: Geografski fakultet.
51. Milanović, P. (1994). Geomorfologija. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva.
52. Milenković, B. (2005). Zaštita zemljišta od erozije. Beograd: Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“.
53. Milošević, A., & saradnici. (2013). Erozija zemljišta i zaštita od erozije: Priručnik. Beograd: Institut za zemljište.
54. Ministarstvo poljoprivrede, šumarstva i vodoprivrede Republike Srbije. (2017). Priručnik za zaštitu zemljišta od erozije i bujica. Beograd: Ministarstvo.
55. Mladenović, M. B. (2018). Uređenje vodotoka. Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi.

56. Moglen, G.E. (2022). Fundamentals of Open Channel Flow (2nd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003263630>
57. Morgan, R. P. C. (2005). Soil Erosion and Conservation (3rd ed.). Oxford: Blackwell Publishing.
58. Muchová, Z., Leitmanová, M., & Petrovic, F. (2015). A more detailed approach to the assessment of the water erosion threat for a territory. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, 3(2), 3-10.
59. Mulligan, C.N., Fukue, M., & Yong, R.N. (2025). Sustainable Practices in Geoenvironmental Engineering (3rd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003407393>
60. Muškatirović, D. (1991). Regulacija reka. Građevinski fakultet, Beograd.
61. Muškatirović, D., & Jovanović, M. (1982). Osnovi hidrotehnike. Beograd: Zavod za UNS.
62. Nanwal, R.K., & Rajanna, G.A. (2022). Rainfed Agriculture (1st ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003364917>
63. Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. A. I. B. (2017). Hydraulic structures. CRC Press.
64. Oladokun, V., Proverbs, D., Adebimpe, O., & Adedeji, T. (Eds.). (2023). Handbook of Flood Risk Management in Developing Countries (1st ed.). Routledge.
<https://doi.org/10.1201/9781003160823>
65. Oldeman, D. R. (1994). Principles of Soil Conservation and Management.
66. Pandey, S., Kumar, P., Zlatic, M., Nautiyal, R., & Panwar, V. P. (2021). Recent advances in assessment of soil erosion vulnerability in a watershed. International Soil and Water Conservation Research, 9(3), 305-318.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.03.001>
67. Pavlović, D., & Ćirković, D. (2017). Zaštita vodenih tokova od erozije. Beograd: Ekonomski fakultet.
68. Penning-Rowsell, E. (1986). Floods and Drainage: British Policies for Hazard Reduction, Agricultural Improvement and Wetland Conservation (1st ed.). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780367821524>
69. Penning-Rowsell, E.C., & Becker, M. (Eds.). (2019). Flood Risk Management: Global Case Studies of Governance, Policy and Communities (1st ed.). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9781351010009>
70. Petković, S. (1992). Odabrana poglavlja hidraulike otvorenih tokova. Beograd: Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
71. Petković, S. (1995). Geneza i transport nanosa u slivu Južne Morave. Beograd: Šumarski fakultet, Univerzitet u Beogradu.
72. Petkovic, S., Dragovic, N., & Markovic, S. (1999). Erosion and sedimentation problems in Serbia. Hydrological Sciences Journal, 44(1), 63-77.
73. Petrović, J., & saradnici. (2010). Biosfera i zaštita životne sredine. Novi Sad: Prirodno-matematički fakultet.

74. Petrović, M., Marković, D., & Đorđević, A. (2019). Efikasnost biotehničkih mera u kontroli erozije u slivovima na području Srbije. Zbornik radova sa naučne konferencije o vodoprivredi, 123–131.
75. Pimentel, D., & Kounang, N. (1998). Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1(5), 416–426.
76. Radović, P., & Ilić, B. (2021). Kontrola erozije korišćenjem kaskadnih struktura u slivu reke Lim. Bujični tokovi i erozija u Srbiji, 12(1), 19–26.
77. Radović, Z. (2018). Hidrotehničke mere za smanjenje erozije u malim vodotocima. *Inženjerstvo zaštite životne sredine*, 45(2), 87–95.
78. Ratta, R., & Lal, R. (Eds.). (1999). *Soil Quality and Soil Erosion* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203739266>
79. Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA Handbook 703.
80. Rickenmann, D. (2016). *Methods for the Quantitative Assessment of Channel Processes in Torrents (Steep Streams)* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b21306>
81. Ristić, R., & Macan, G. (1997). The impact of erosion control measures on runoff processes. *Red Book - IAHS Publ.*, (245), 191–194. England. ISBN 1-901502-30-9.
82. Ristić, R., Milanović, M., & Petrović, A. (2006). Vreme koncentracije na bujičnim slivovima u Srbiji. *Vodoprivreda*, 39, 7-15.
83. Roose, E.J., Lal, R., Feller, C., Barthes, B., & Stewart, B.A. (Eds.). (2005). *Soil Erosion and Carbon Dynamics* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203491935>
84. Samuels, P., Huntington, S., Allsop, W., & Harrop, J. (Eds.). (2008). *Flood Risk Management: Research and Practice: Extended Abstracts Volume* (332 pages) + full paper CD-ROM (1772 pages) (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203883020>
85. Savić, Lj. (2009). *Uvod u hidrotehničke građevine*. Građevinski fakultet, Beograd.
86. Scottish Environment Protection Agency (SEPA). (2010). *Engineering in the water environment – Good practice guide: Sediment management*.
87. Scottish Environment Protection Agency (SEPA). (2019). *Engineering in the water environment – Good practice guide: Intakes and outfalls*.
88. Silva, T. P., Bressiani, D., Ebling, É. D., & Reichert, J. M. (2024). Best management practices to reduce soil erosion and change water balance components in watersheds under grain and dairy production. *International soil and water conservation research*, 12(1), 121-136. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.06.003>
89. Soil and Water Conservation Society (U. S.), (1994). *Soil Erosion Research Methods* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203739358>
90. Takeuchi, K. (2022). *Integrated Flood Risk Management: Basic Concepts and the Japanese Experience* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781003275541>
91. United Nations Environment Programme (UNEP). (1982). *World Soil Charter*. Nairobi: UNEP.

92. Valenti, S. (2022). *Water in the Making of a Socio-Natural Landscape: Rome and Its Surroundings, 1870–1922* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003254423>
93. van Alphen, J., van Beek, E., & Taal, M. (Eds.). (2006). *Floods, from Defence to Management: Symposium Proceedings of the 3rd International Symposium on Flood Defence, Nijmegen, The Netherlands, 25-27 May 2005, Book + CD-ROM* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439833513>
94. Villela, J. M., Anache, J. A., Watanabe, A. M., Flanagan, D. C., Wendland, E. C., & Crestana, S. (2023). Performance evaluation of a water erosion tracer using plot-scale experiments and process-based modeling. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(4), 622-632. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.05.003>
95. Vranešević, M., Belić, S., Kolaković, S., Kadović, R., & Bezdan, A. (2017). Estimating suitability of localities for biotechnical measures on drainage system application in Vojvodina. *Irrigation and Drainage*, 66(1), 129-140.
96. Vučićević, D. (1998). *Uređenje bujica i zaštita od erozije*. Društvo bujičara Jugoslavije.
97. Vujović, J., & Radović, D. (2009). *Principi zaštite zemljišta i kontrola erozije*. Beograd: Univerzitet u Beogradu, Fakultet zaštite životne sredine.
98. Vuković, J., & Anđelković, S. (2020). Primena poljoprivrednih i šumarskih mera u slivu Zapadne Morave. *Ekologija i zaštita životne sredine u Srbiji*, 33(4), 45–53.
99. Wang, S., McGehee, R. P., Guo, T., Flanagan, D. C., & Engel, B. A. (2023). Calibration, validation, and evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for hillslopes with natural runoff plot data. *International Soil and Water Conservation Research*, 11(4), 669-687. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.10.004>
100. Wang, Y. (Ed.). (2020). *Fresh Water and Watersheds* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429441042>
101. Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. Washington, DC: USDA Agricultural Handbook.