

РЕКА ЛЪУБОСТИЊА

код профила пројектованог цевног моста (ВАЉЕВО)
ХИДРОЛОШКО ХИДРАУЛИЧКИ ЕЛАБОРАТ



Наручилац:

1.1. НАСЛОВНА СТРАНА СТУДИЈЕ

ХИДРОЛОШКО ХИДРАУЛИЧКА СТУДИЈА РЕКЕ ЉУБОСТИЊЕ у Ваљеву код профила пројектованог цевног моста преко реке Љубостиње, као део пројекта реконструкције, доградње и изградње објекта „Помоћна зграда – део – енергетски блок О-174, централна котларница“

Наручилац: Енерготехника Јужна Бачка доо
Пут новосадског партизанског одреда 1
21000 Нови Сад

Објекат: ПОМОЋНА ЗГРАДА-ДЕО-ЕНЕРГЕТСКИ БЛОК О-174,
ЦЕНТРАЛНА КОТЛАРНИЦА, ПР+СП БРОЈ 1
КП 698/7, КП 698/11, КП 698/2 КО Ваљево
Владике Николаја 59, Ваљево

Врста радова: реконструкција, доградња и нова градња

Израђивач: ТАШ ГРУПА, Краљице Марије 9, Београд

Одговорно лице
израђивача: Растко Петровић

Потпис:

Овлашћено лице: Никола Златановић, дипл. грађ. инж.

Број лиценце: 314 L038 12

Потпис:

Место и датум: Београд, 12.6.2025.

1.2. САДРЖАЈ СТУДИЈЕ

1.1.	Насловна страна
1.2.	Садржај
1.3.	Решење о именовању овлашћеног лица
1.4.	Изјава овлашћеног лица
1.5.	Текстуална документација
1.6.	Нумеричка документација
1.7.	Графичка документација

1.3. РЕШЕЊЕ О ИМЕНОВАЊУ ОВЛАШЋЕНОГ ЛИЦА

На основу члана 32. Правилника о садржини, начину и поступку израде и начину вршења контроле техничке документације према класи и намени објекта, као:

О В Л А Ш Ћ Е Н О Л И Ц Е

за израду хидролошко хидрауличке студије реке Љубостиње у Ваљеву код профила пројектованог цевног моста преко реке Љубостиње, као део пројекта реконструкције, доградње и изградње објекта „Помоћна зграда – део – енергетски блок О-174, централна котларница“ одређује се:

Никола Златановић, дипл. грађ. инж..... 314 L038 12

Израђивач: ТАШ ГРУПА, Краљице Марије 9, Београд

Одговорно
лице/заступник: Растко Петровић

Потпис:



Место и датум: Београд, 12.6.2025.


1.4. ИЗЈАВА ОВЛАШЋЕНОГ ЛИЦА

Као овлашћено лице које је израдило хидролошко хидрауличку студију реке Љубостиње у Ваљеву код профила пројектованог цевног моста преко реке Љубостиње, као део пројекта реконструкције, доградње и изградње објекта „Помоћна зграда – део – енергетски блок О-174, централна котларница“

Никола Златановић, дипл. грађ. инж.

ИЗЈАВЉУЈЕМ

1. да је елаборат израђен у свему у складу са Законом о планирању и изградњи, прописима, стандардима и нормативима из области хидротехнике и правилима струке;
2. да је на начин предвиђен елаборатом, односно студијом обезбеђено испуњење одговарајућег основног захтева за објекат и да је студија израђена у складу са мерама и препорукама којима се доказује испуњеност основних захтева.

Овлашћено лице:	Никола Златановић, дипл. грађ. инж.
Број лиценце:	314 L038 12
Потпис:	
Место и датум:	Београд, 12.6.2025.

1.5 ТЕКСТУАЛНА ДОКУМЕНТАЦИЈА

САДРЖАЈ ТЕКСТУАЛНЕ ДОКУМЕНТАЦИЈЕ:

1.	УВОД.....	1
2.	ОПИС СЛИВА РЕКЕ ЉУБОСТИЊЕ	3
3.	ПОДЛОГЕ	5
3.1.	ТОПОГРАФСКЕ ПОДЛОГЕ	5
3.2.	ХИДРОЛОШКЕ И МЕТЕОРОЛОШКЕ ПОДЛОГЕ	9
4.	ХИДРОЛОШКА АНАЛИЗА.....	12
4.1.	ПРОСЕЧНЕ ВИШЕГОДИШЊЕ ВОДЕ РЕКЕ ЉУБОСТИЊЕ ДО РАЗМАТРАНОГ ПРОФИЛА	12
4.2.	МАЛЕ ВОДЕ РЕКЕ ЉУБОСТИЊЕ ДО РАЗМАТРАНОГ ПРОФИЛА	16
4.3.	РЕЖИМ ВЕЛИКИХ ВОДА РЕКЕ ЉУБОСТИЊЕ ДО РАЗМАТРАНОГ ПРОФИЛА	17
4.3.1.	ПРОРАЧУН УСЛОВА ОТИЦАЊА СА СЛИВА	17
4.3.2.	РЕЗУЛТАТИ ПРОРАЧУНА ВЕЛИКИХ ВОДА НА ЉУБОСТИЊСКОЈ РЕЦИ КОД РАЗМАТРАНОГ ПРОФИЛА	22
4.4.	РЕКАПИТУЛАЦИЈА ХИДРОЛОШКИХ АНАЛИЗА И ПРОРАЧУНА.....	24
4.4.1.	СРЕДЊЕ ВОДЕ.....	24
4.4.2.	МАЛЕ ВОДЕ.....	24
4.4.3.	ВЕЛИКЕ ВОДЕ.....	25
5.	ХИДРАУЛИЧКА АНАЛИЗА	26
5.1.	Увод.....	26
5.2.	МЕТОД ПРОРАЧУНА ЛИНИЈЕ НИВОА	27
5.3.	ХИДРАУЛИЧКИ ОТПОР КОРИТА ЗА ВЕЛИКЕ ВОДЕ.....	28
5.4.	ГЕОМЕТРИЈСКИ МОДЕЛ КОРИТА.....	28
5.5.	РЕЗУЛТАТИ	29
5.6.	ПРИЛОЗИ ХИДРАУЛИЧКЕ АНАЛИЗЕ	32
5.6.1.	ПОДУЖНИ ПРОФИЛ	32
5.6.2.	ПОПРЕЧНИ ПРОФИЛИ	33
5.6.3.	ТАБЕЛАРНИ ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА	37
6.	ЛИТЕРАТУРА.....	39

1. УВОД

Ова хидролошко хидрауличка студија реке Љубостиње је израђена за потребе градње објекта цевног моста преко реке Љубостиње, као део пројекта реконструкције, доградње и изградње објекта „Помоћна зграда – део – енергетски блок О-174, централна котларница“.

На наредној слици је приказана шира ситуација слива реке Љубостиње до разматраног профила.



Слика 1. Приказ шире ситуације и слива реке Љубостиње до разматраног профила (ТК 1:300.000)

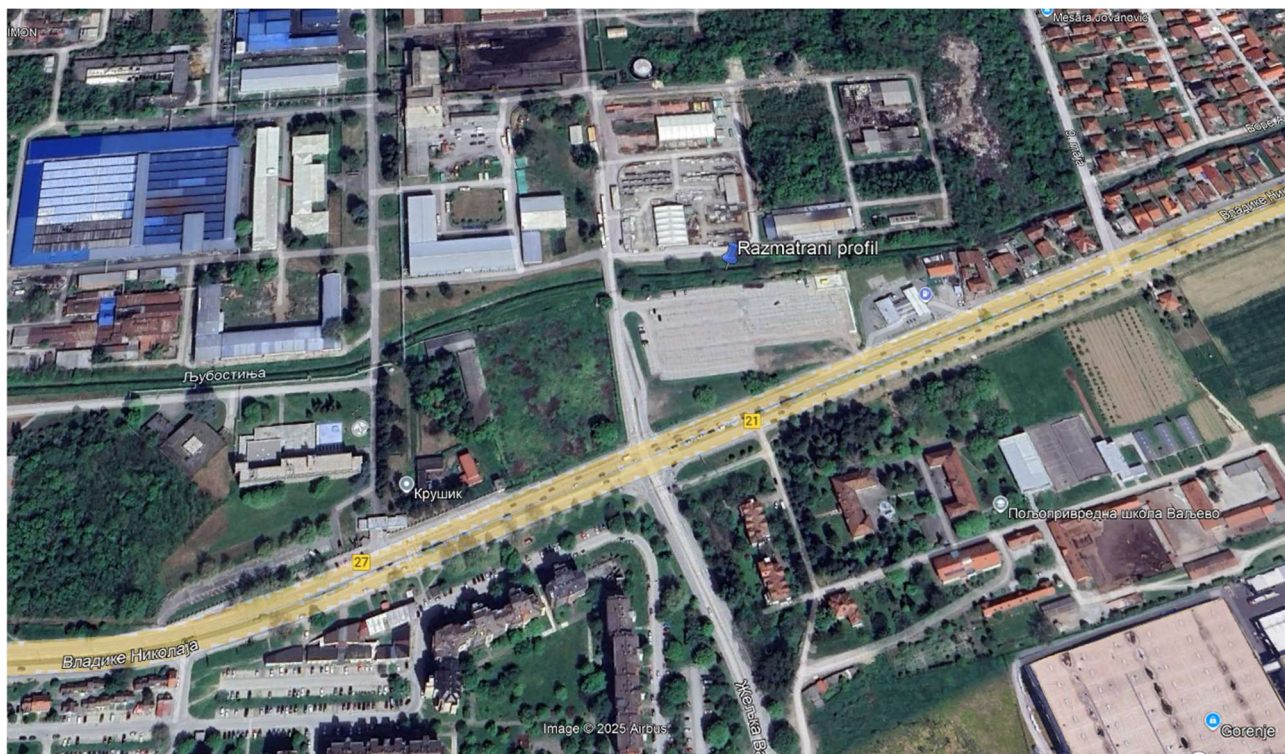
У хидролошком делу студије се одређују велике воде одређене вероватноће појаве ($p=1\%$, 2% , 5% и 10%) на профилу реке Љубостиње код разматраног профила. Поред великих вода, у овој студији је анализиран и обрађен режим средњих и малих вода.

Хидраулички део студије обрађује прорачун течења у реци Љубостињи за карактеристичне вредности средњих вода и великих вода ($p=1\%$, 2% , 5% и 10%).

Циљ хидрауличких анализа је да се одреде линије нивоа при карактеристичним протоцима воде.

За потребе хидрауличких анализа услова течења воде у реци Љубостињи, развијен је хидраулички модел течења употребом програмског пакета HEC-RAS. Прорачун хидрауличног режима је обухватао прорачун линија нивоа воде и прорачун морфолошких (површина протицајног профила, ширина водног огледала и хидрауличног радијуса) и хидрауличких (брзина и вучна сила) параметара режима.

На наредној слици је приказана ситуација реке Љубостиње и локација разматраног профила на подлози Google Earth.



Слика 2. Приказ реке Љубостиње и локације разматраног профила (Google Earth)

2. ОПИС СЛИВА РЕКЕ ЉУБОСТИЊЕ

Анализирана река Љубостиња је лева притока Колубаре. Река Љубостиња извире на око 275 мнм на јужним падинама Терзића брда (375 мнм). У горњем току се слив простира на подручју Рађевог села а у доњем на урбаном подручју Ваљева. Река Љубостиња је релативно кратка. Хидрографску мрежу слива поред Љубостиње чине само неколико потока који се уливају у њу.

У смислу вегетационог покривача на сливу реке Љубостиње до разматраног профила доминирају комплекс култивисаних парцела, нецеловита урбана подручја, широколиснате шуме и пољопривредно земљиште са већим подручјима природне вегетације.

У педолошком смислу, на сливу реке Љубостиње до разматраног профила доминира еродирано - параподзоласто земљиште.

На наредној слици је приказан слив реке Љубостиње до разматраног профила.



Слика 3. Шири приказ слива реке Љубостиње до разматраног профила (Google Earth)

Река Љубостиња је бујичне природе. У последњих пар деценија је било више поплавних епизода. У документацији (21) је наведено да је 12.6.2007. за мање од пола сата пало је 16 литара кише по квадратном метру после чега је набујала Љубостиња поплавила подруме у Пастеровој и Душановој улици, насељима "Миливоја Бјелице", "Сретена Дудића" и "Збратимљеним градовима". Поплављена су 72 стамбена објекта, ХК "Крушик", ОШ "Нада Пурић" и обданиште "Наша радост". Евакуисано је 10 домаћинстава и обданиште "Наша радост"; 4.7.2009. је услед падавина од 30 литара по квадратном метру дошло је до појаве бујичних вода и поплава у сливу река Љубостиње, Перајице, Кривошије и Рабаса. Поплављене су 44 куће и 1 јавни објекат. Љубостиња се поново излила 27.7.2018 (Документација 26). На наредним сликама је приказана река Љубостиња током поплавних догађаја 2018. године.



Слика 4. Приказ изливања реке Љубостиње 2018. године (Документација 26)



Слика 5. Приказ реке Љубостиње 2018. године након повлачења реке у корито (Документација 26)

На основу горње слике (Слика 5) се може закључити да су мостови на реци Љубостињи највероватније „уска грла“ која значајно смањују пропусну моћ реке при великим водама.

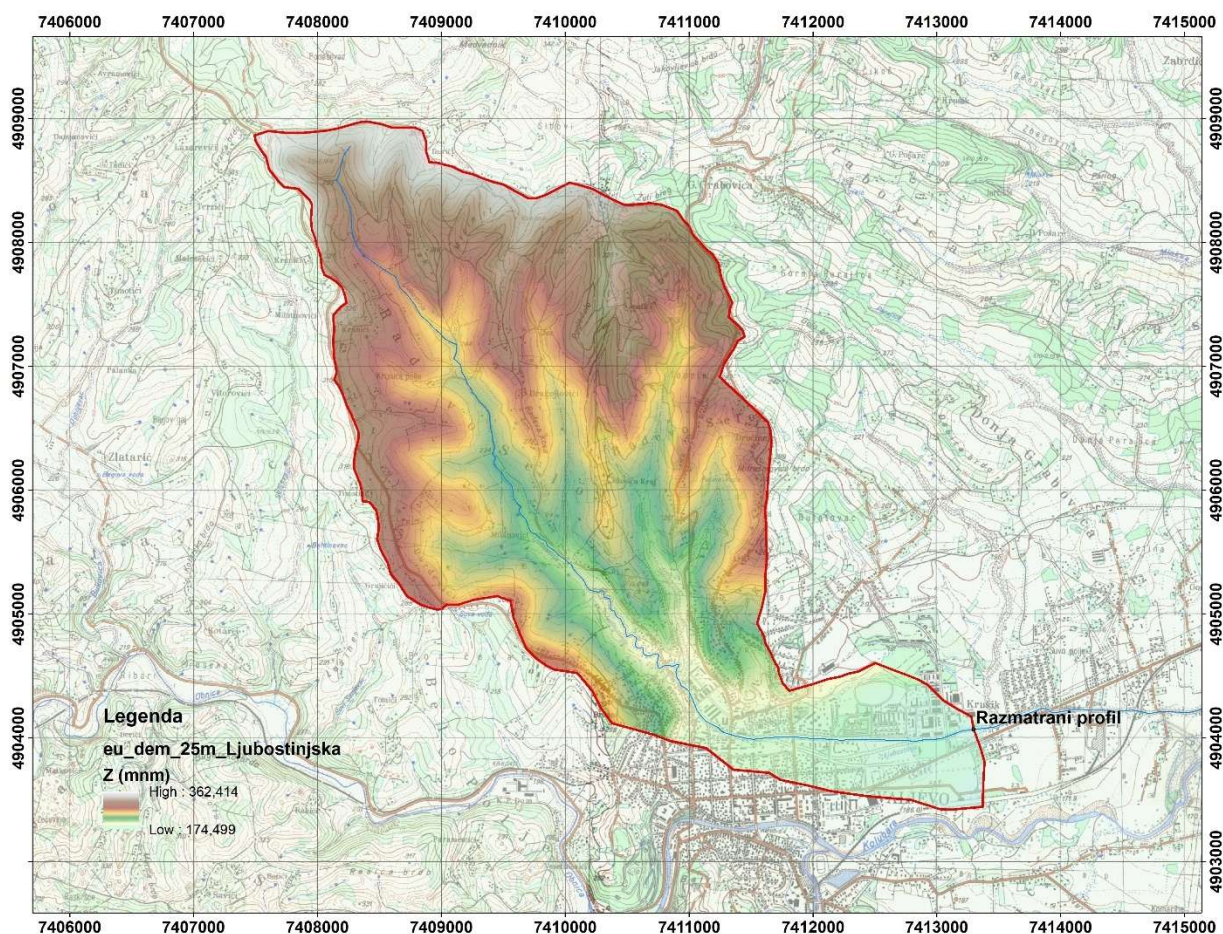
3. ПОДЛОГЕ

3.1. Топографске подлоге

За потребе анализа и прорачуна у овој хидролошко хидрауличкој студији прикупљене су и коришћене следеће подлоге:

- Дигитални модел терена на ширем подручју анализираниог слива $\Delta x=25m$,
- Топографске карте 1:25000 анализираниог слива,
- Карта основног земљишног покривача, педолошка карта, хидрогеолошка карта и др.

Ситуациони приказ слива реке Љубостиње до разматраног профила који је предмет изучавања је приказан на наредној слици.



Слика 6. Приказ ДЕМ -а (25x25m) на сливу реке Љубостиње до разматраног профила (ТК 1:25.000)

Са приказаног дигиталног модела терена и топографске карте слива реке Љубостиње до разматраног профила се може видети да су северозапани делови слива виши одн. горњи делови и да се дренажање воде дешава ка југоистоку.

У следећој табели су приказане основне хидролошке и морфолошке карактеристике слива Обнице до профила хидролошке станице Бело Поље (у наставку ХС Бело Поље) одн. слива реке Љубостиње на локацији разматраног профила за које се одређују вредности средњих, малих и великих вода.

Табела 1. Основне карактеристике Љубостиње код разматраног профила и Обнице до ХС Бело Поље

	A	Z _{sr}	P	T	L	L _c	I _{sliva}	I _{ur}
профил	(km ²)	(mnm)	(mm)	(°C)	(m)	(m)	(%)	(%)
Љубостиња код разматраног профила	14,67	258,69	840,8	10,50	8693	5207	9,76	0,884
ХС Бело Поље (Обница)	185,4	409,97	894,3	10,14				

где су:

A – површина слива

Z_{sr} – средња надморска висина слива

P – просечне падавине на сливу

T – просечне температуре ваздуха на сливу

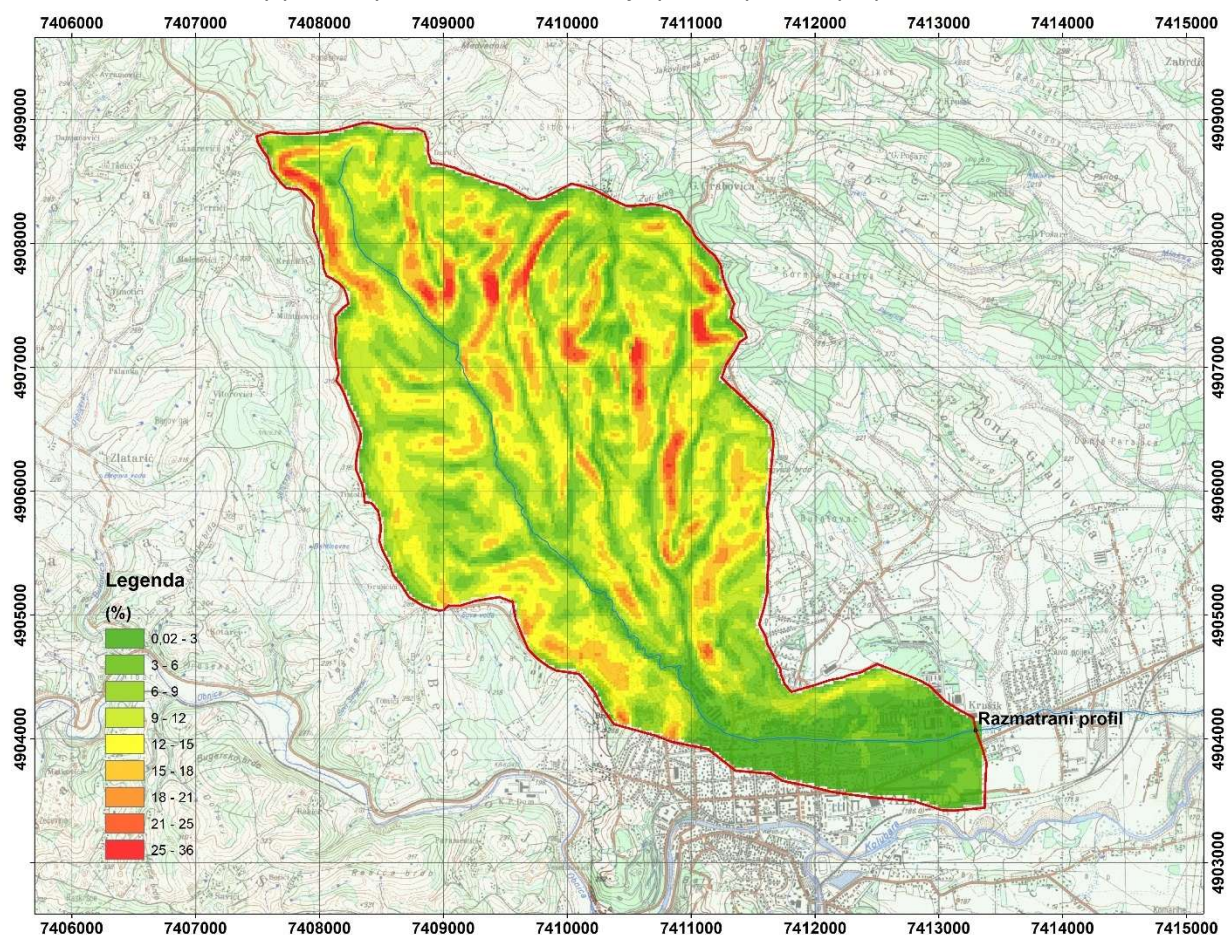
L – дужина водотока

L_c – дужина водотока до тачке на водотоку која је најближа тежишту слива

I_{sliva} – просечан пад падина слива

I_{ur} – уравнио пад водотока

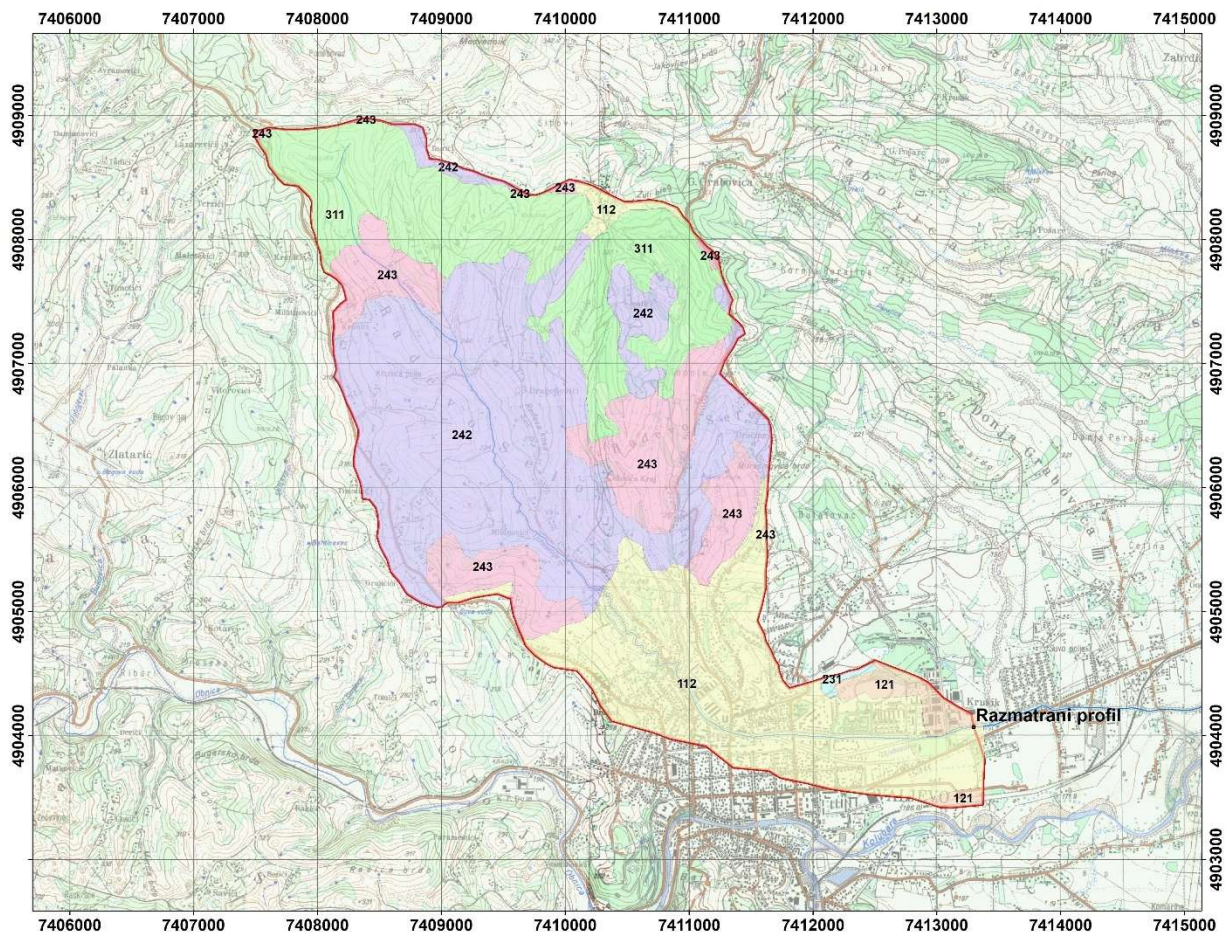
Површине сливова су дефинисане на основу топографских карти 1:25.000, дигиталног модела терена и коришћења апликације Google Earth. Средња надморска висина слива је одређена коришћењем дигиталног модела терена. Дужине и падови анализираних водотокова су одређене на бази топографских карти 1:25.000 и дигиталног модела терена. На наредној слици су приказани просечни нагиби падина на сливу реке Љубостиње до локације разматраног профила.



Слика 7. Просечни нагиби падина на сливу реке Љубостиње до разматраног профила

Падови на сливу реке Љубостиње до разматраног профила крећу у распону од 0 до 36%. Просечни падови падина слива реке Љубостиње до локације разматраног профила износе 9,76%.

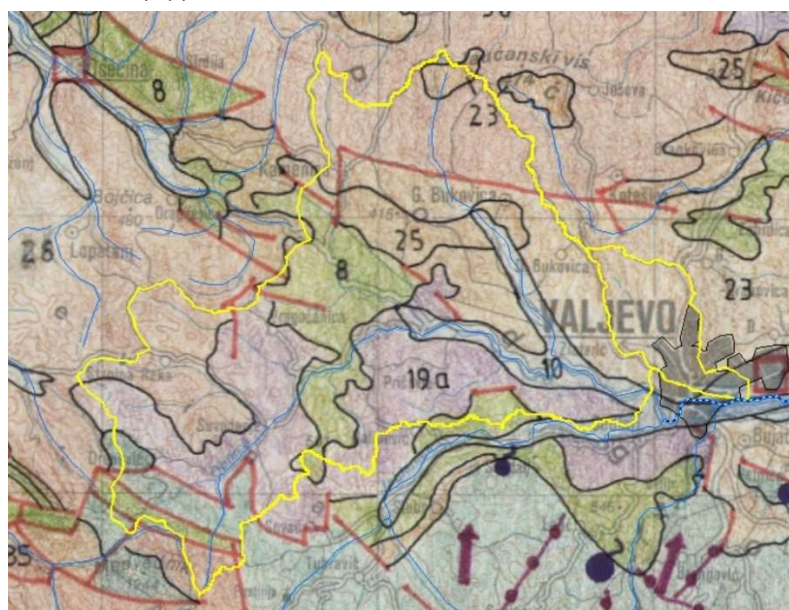
На наредној слици је приказан вегетациони покривач на анализираним сливу.



Слика 8. Начин коришћења земљишта (CLC 2018)

Са приказане слике (и Табела 12.) се може видети да на анализираном сливу реке Љубостиње до разматраног профила доминира комплекс култивисаних парцела 242 (37,4%), нецеловита урбана подручја 112 (24,7%), широколиснате шуме 311 (21,0%) и пољопривредно земљиште са већим подручјима природне вегетације 243 (14,6%).

На следећој слици је приказана хидрогеолошка карта ширег подручја слива реке Љубостиње до разматраног профила и Обнице до ХС Бело Поље.



Слика 9. Хидрогеолошка карта слива реке Љубостиње до разматраног профила и реке Обнице до ХС Бело Поље

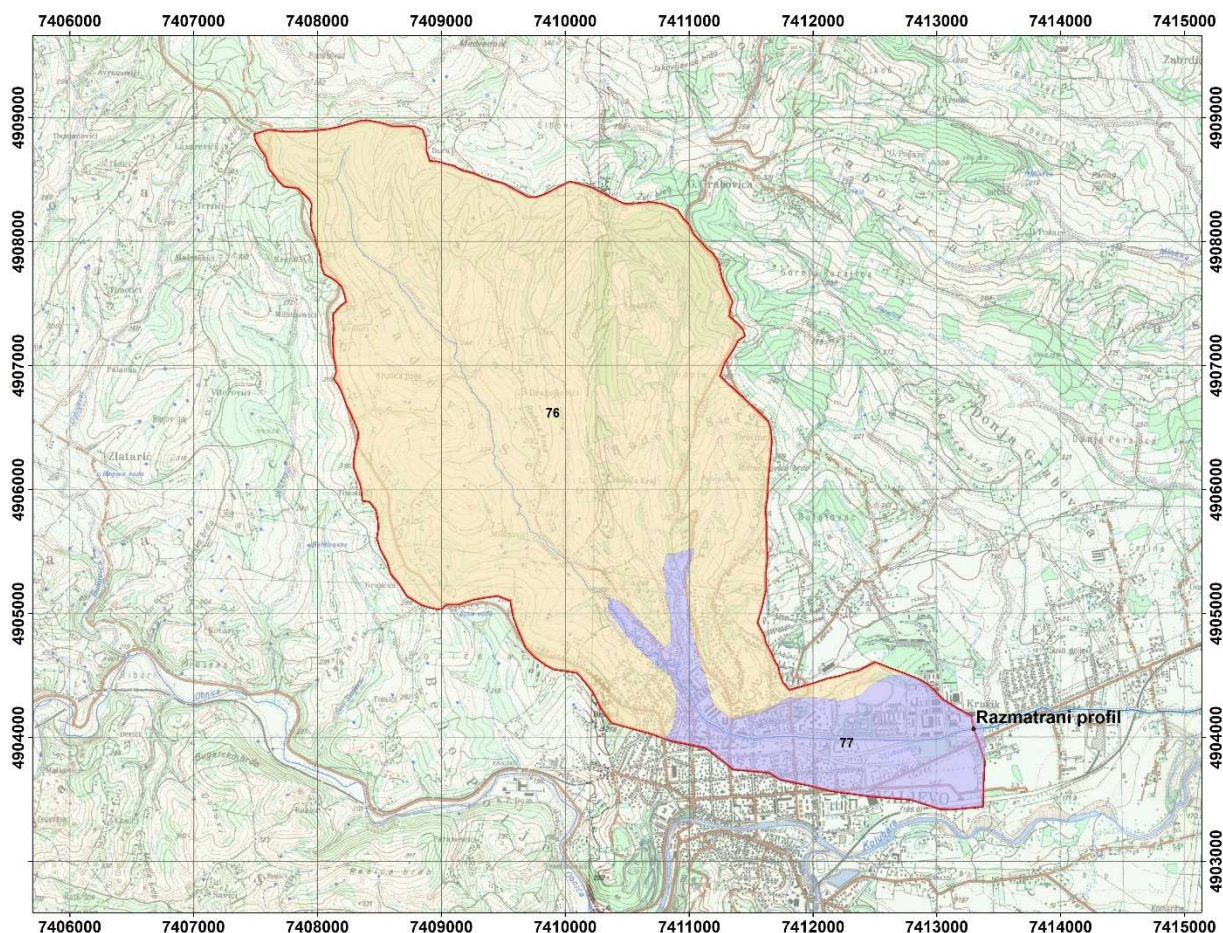
Хидрогеолошки слојеви на анализираном сливу реке Љубостиње до разматраног профила су претежно без водонепропусности у свим деловима слива.

Табела 2. *Хидрогеолошке класе на сливу реке Љубостиње до разматраног профила*

	ознака	хидрогеолошки слој	водопропусност
	23	глине, лапоровите глине, песковите и шљунковите глине	претежно без

Може се констатовати да на сливу Обнице до ХС Бело Поље осим класе 23 доминирају и класе 19а (кречњаци, песковити кречњаци, ређе пешчари, лапоровити кречњаци) и 8 (слојевити до танкослојевити кречњаци, доломити и доломитични кречњаци).

На следећој слици је приказана педолошка карта слива реке Љубостиње до разматраног профила.

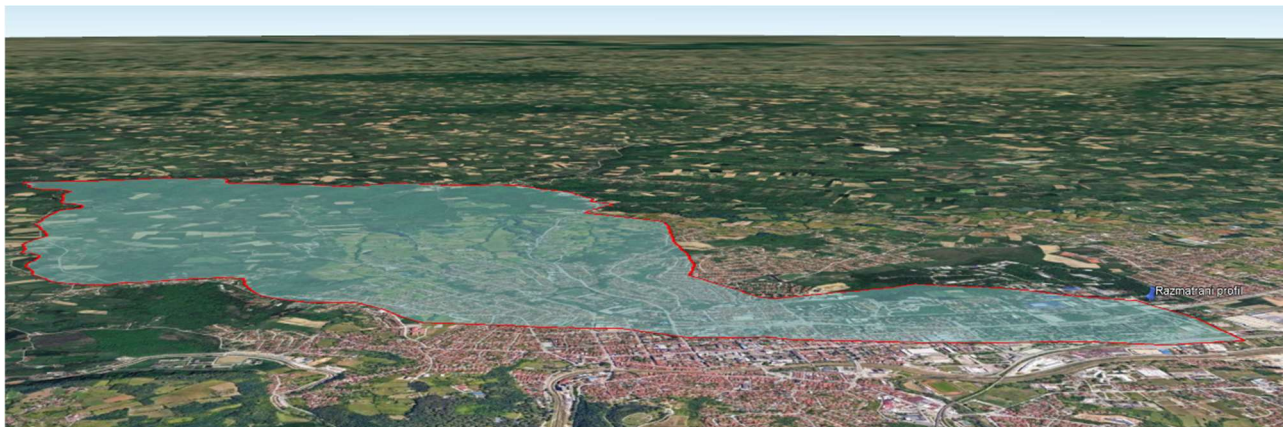


Слика 10. *Педолошка карта слива реке Љубостиње до разматраног профила*

За потребе анализе педолошког састава посматраног сливног подручја, коришћена је Педолошка карта Републике Србије размере 1:50.000 (Институт за педологију и агрохемију Београд-Топчидер, 1963). У педолошком смислу, на анализираном сливу реке Љубостиње до разматраног профила доминира еродирано - параподзоласто земљиште (86%) и алувијални нанос иловасти (14%).

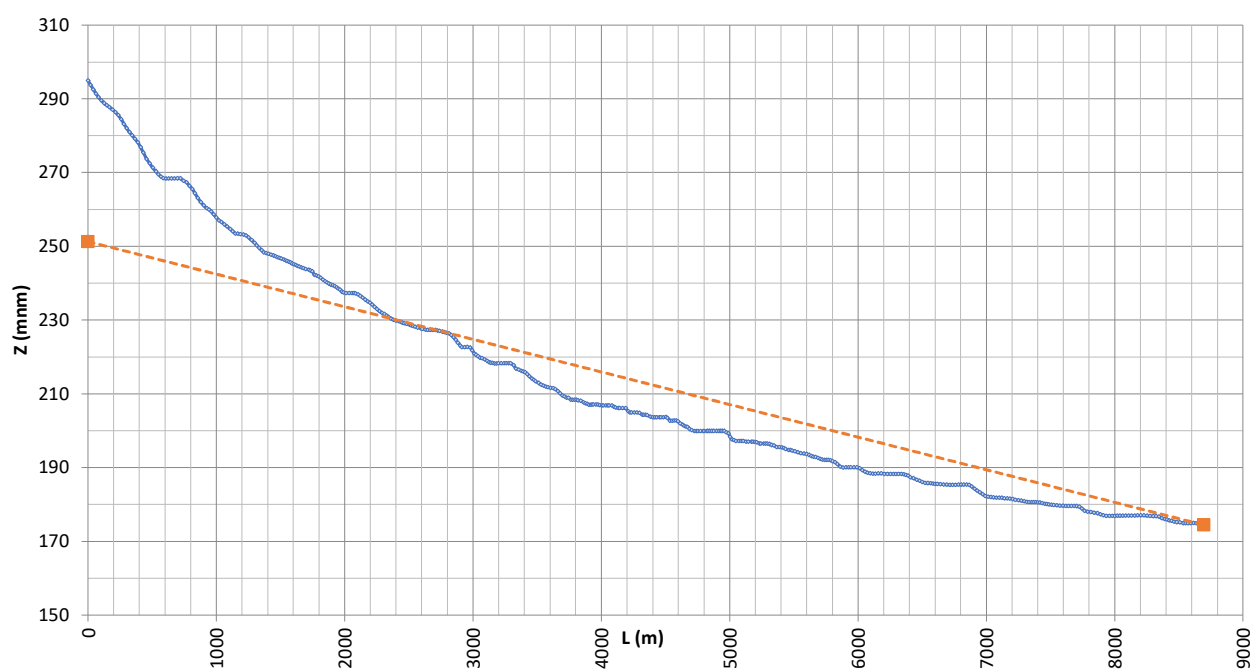
На предметном подручју, еродирано - параподзоласто земљиште је сврстано у Ц хидролошку групу земљишта, док је алувијални нанос иловасти сврстано у Б хидролошку групу земљишта.

На наредној слици је приказан слив реке Љубостиње до разматраног профила на подлози Google Earth.



Слика 11. Приказ слива реке Љубостиње до разматраног профила (Google Earth)

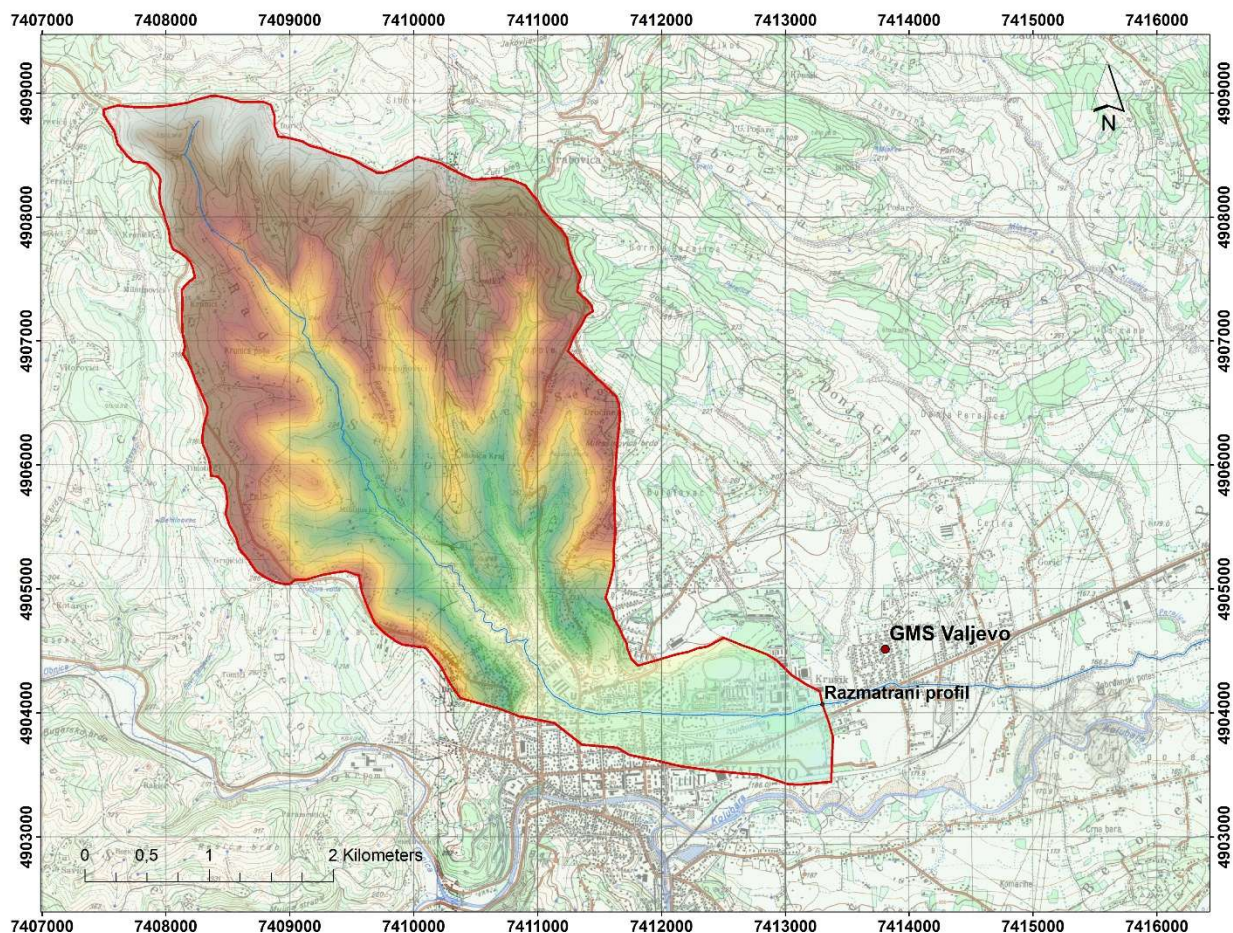
На наредној слици су приказани подужни профил најдужег тока и уравни пад реке Љубостиње до разматраног профила.



Слика 12. Приказ погужног профила и уравниотог пада реке Љубостиње до разматраног профила ($I_{ur}=0,884\%$)

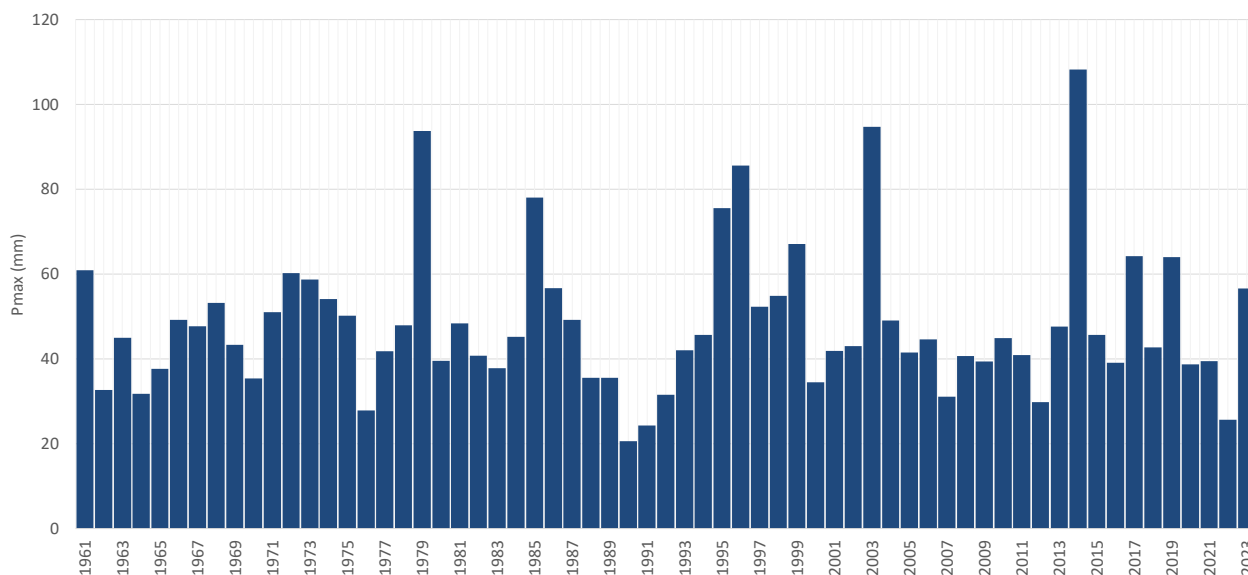
3.2. Хидролошке и метеоролошке подлоге

На следећој слици је ситуационо приказана ГМС Ваљево у односу на слив реке Љубостиње до разматраног профила (удаљена је 0,5 km од разматране локације).



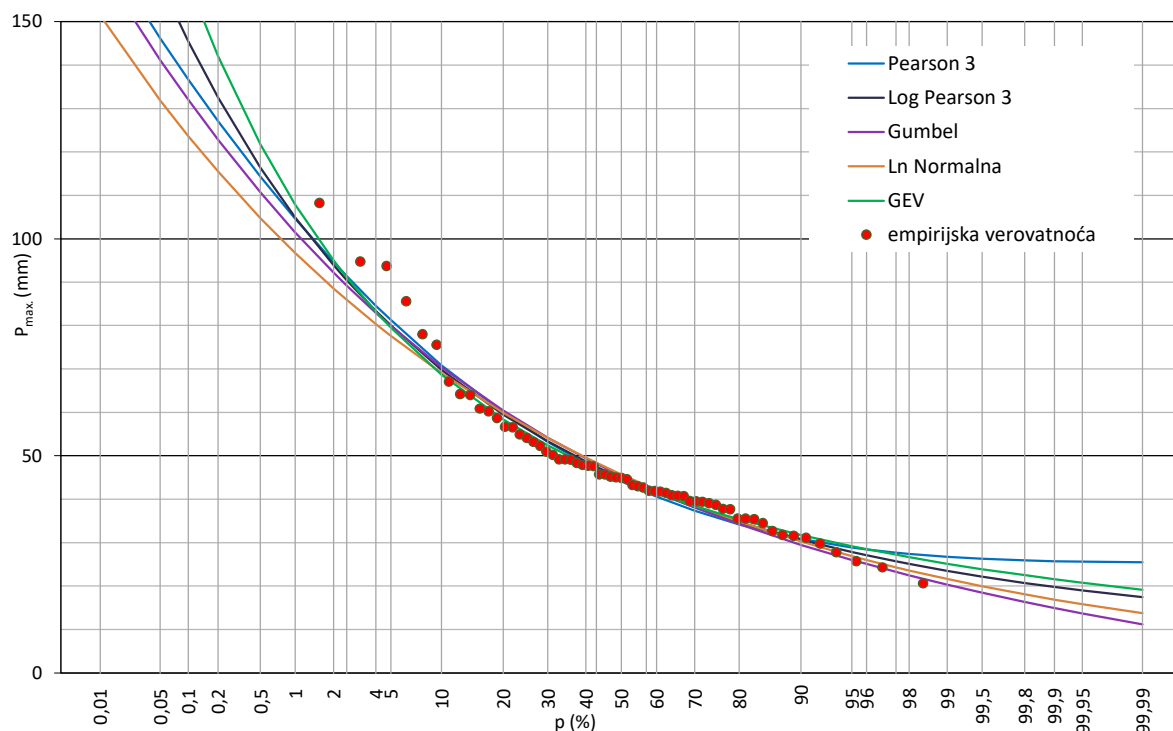
Слика 13. Ситуациони приказ ГМС Ваљево у односу на слив реке Љубостиње до разматраног профила

Метеоролошки подаци (P_{\max}) на ГМС Ваљево који су били расположиви подаци за период 1961-2023. На следећој слици су приказане максималне годишње дневне сума падавина на ГМС Ваљево (извор података РХМЗ Србије – Документација 29).



Слика 14. Приказ максималних годишњих дневних сума падавина на ГМС Ваљево

Рачунске вредности за вероватноће појаве максималних годишњих дневних сума падавина на ГМС Ваљево су приказане на следећој слици.



Слика 15. Рачунске вредности максималних годишњих дневних сума падавина на ГМС Ваљево за карактеристичне вероватноће појаве (1961-2023)

Рачунске вредности вероватноћа појаве максималних дневних падавина на ГМС Ваљево су дате у следећој табели.

Табела 3. Максималне дневне падавине на ГМС Ваљево ($Z=176$ тнм) за карактеристичне вероватноће појаве

p(%)	Ваљево
1	104,9
2	93,9
5	80,0
10	69,8

НТР криве, на основу којих су одређене редукционе криве за ГМС Ваљево су преузете из документације 15.

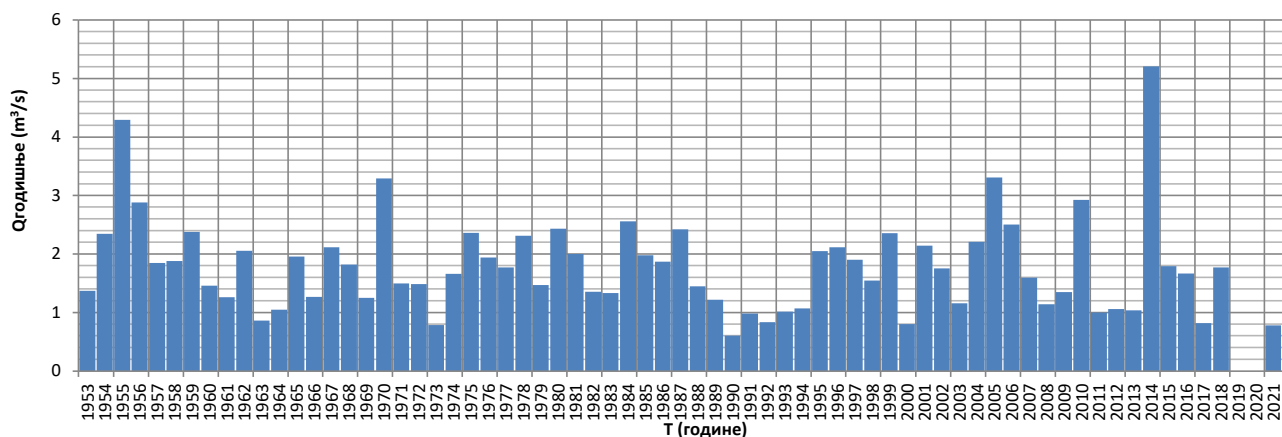
Извор хидролошких података (протоци воде) на ХС Бело Поље (Обница) је документација 13 и 23 односно одговарајуће обраде у оквиру ове студије ($Q_{\text{средње, вишегодишње}}=1,79 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{мин ср.мес 80\%}}=0,074 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{мин ср.мес 95\%}}=0,028 \text{ m}^3/\text{s}$).

4. ХИДРОЛОШКА АНАЛИЗА

4.1. Просечне вишегодишње воде реке Љубостиње до разматраног профила

За потребе дефинисања вишегодишњег режима протока реке Љубостиње до разматраног профила извршене су хидролошке анализе коришћењем методе аналогije, коришћењем карте специфичног отицаја и методом Лангбеин-а.

Станица аналог за хидролошке анализе на Љубостињи је ХС Бело Поље на реци Обници која је суседна река реке Љубостиње за коју су средњи вишегодишњи протикаји $1,79 \text{ m}^3/\text{s}$.



Слика 16. Приказ просечних годишњих протикаја на ХС Бело Поље (Обница) за период 1953-2021 (изостају подаци за 2019 и 2020. годину)

Дефинисање средњих вишегодишњих протикаја коришћењем методе аналогije

Методом аналогije се на основу аналогije са „репрезентативним“ изученим сливом, сличних карактеристика дефинишу средњи вишегодишњи протикаји на неизученом сливу.

За методу аналогije користи се следећа формула (Зеленхасић, 1991, документација 5):

$$Q_n = Q_a \cdot \frac{A_n}{A_a} \cdot \frac{Z_n}{Z_a} \cdot \frac{P_n}{P_a}$$

где су:

Q – просечан вишегодишњи протикај

A – површина слива (km^2)

Z – средња висина слива (mm)

P – просечне падавине на сливу (mm)

n – индекс који означава слив за који се рачуна протикај (непознато Q)

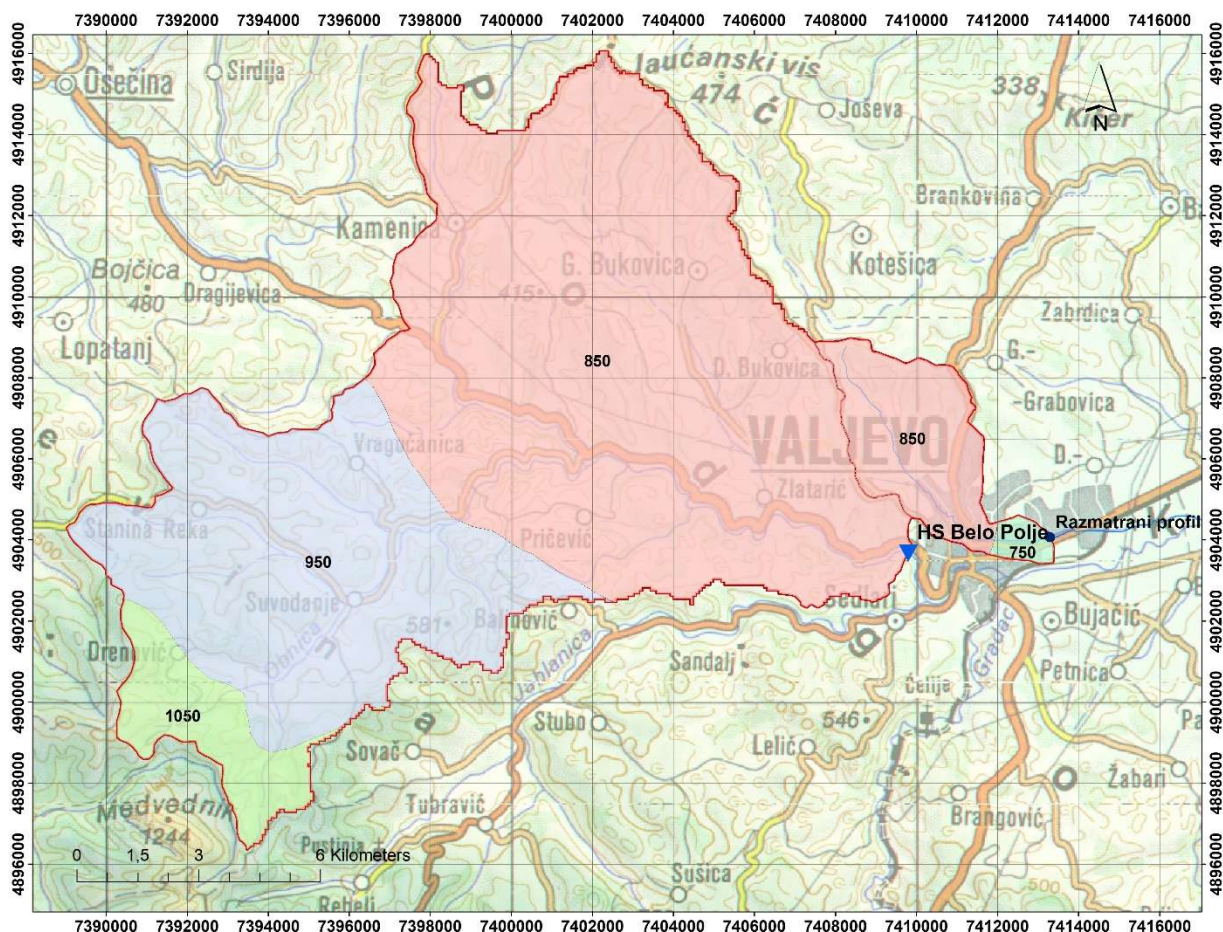
a – ознака за слив аналог (за који имамо мерене податке о протоку воде)

Метода аналогije је коришћена применом аналогije са слива реке Обнице, одн. ХС Бело Поље.

Просечне падавине на сливу су дефинисане коришћењем карте изохијета (План управљања водама за слив реке Дунав (Просечне вишегодишње суме падавина) (2014). Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд, документација 16).

Табела 4. Просечни вишегодишњи протоци на анализираним профилима на Обници (ХС Бело Поље) и Љубостиње до разматраног профила применом модела аналогije

профил	A	Zsr	P	Qsr
	(km^2)	(mm)	(mm)	(m^3/s)
Љубостиња код разматраног профила	14,68	258,69	840,8	0,084
ХС Бело Поље (Обница)	184,9	409,97	894,3	1,79



Слика 17. Карта изохијета на сливу Обнице до ХС Бело Поље и на сливу реке Љубостиње до разматраног профила

Дефинисање средњих вишегодишњих протика коришћењем карте специфичног отицаја

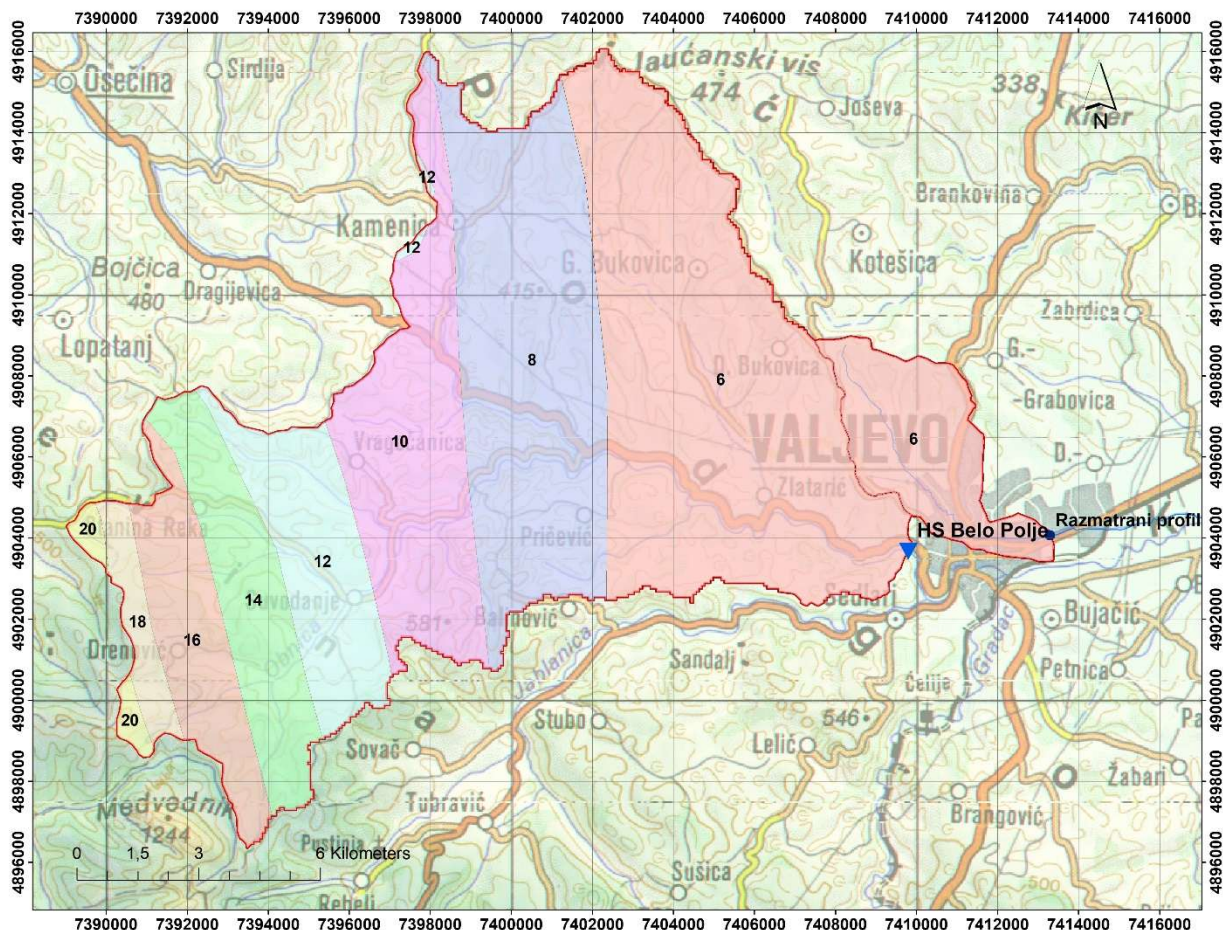
Анализа водности у вишегодишњем смислу је показала одлично слагање водности на сливу Обнице и водности добијене на основу карте специфичног отицаја (Документација 16). Разлика средњих вишегодишњих вредности на основу података добијених преко карте специфичног отицаја и података из РХМЗ Србије на ХС Бело Поље је 2,5%. Наведене анализе показују да је карта специфичног отицаја добар показатељ водности на анализираном подручју.

Табела 5. Специфично отицање на сливу реке Обнице до ХС Бело Поље

Отицај (l/s/km ²)	A (m ²)	Q (m ³ /s)
6	63408504	0,380
8	42301201	0,338
10	27555775	0,276
12	16381021	0,197
12	323824	0,004
14	15766121	0,221
16	13455518	0,215
18	4326900	0,078
20	1842693	0,037
	185361557	1,746

Табела 6. Специфично отицање на сливу реке Љубостиње до разматраног профила

Отицај (l/s/km ²)	A (m ²)	Q (m ³ /s)
6	14677537	0,088
Кориговано (*1,025)		0,090



Слика 18. Карта специфичног отицаја на сливу Обнице до ХС Бело Поље и на сливу реке Љубостиње до разматраног профила

Прорачун средњих вишегодишњих протицаја методом Лангбеин-а

Коришћена је метода *W. B. Langbein*-а у којој се користи температурни фактор E и одређује се према изразу:

$E = 10^{0.027 T + \theta}$ где је T просечна годишња температура ($^{\circ}\text{C}$).

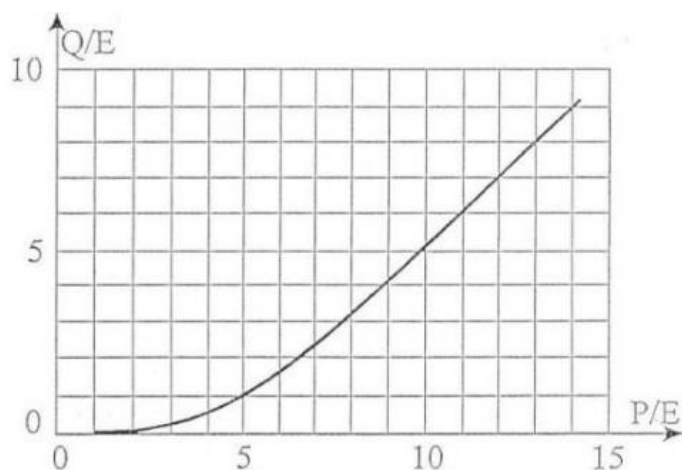
$$q = \frac{Q}{31,5} \text{ (l/s/km}^2\text{)}$$

$$Q_{sr} = 0,001 \cdot q \cdot A \text{ (m}^3\text{/s)}$$

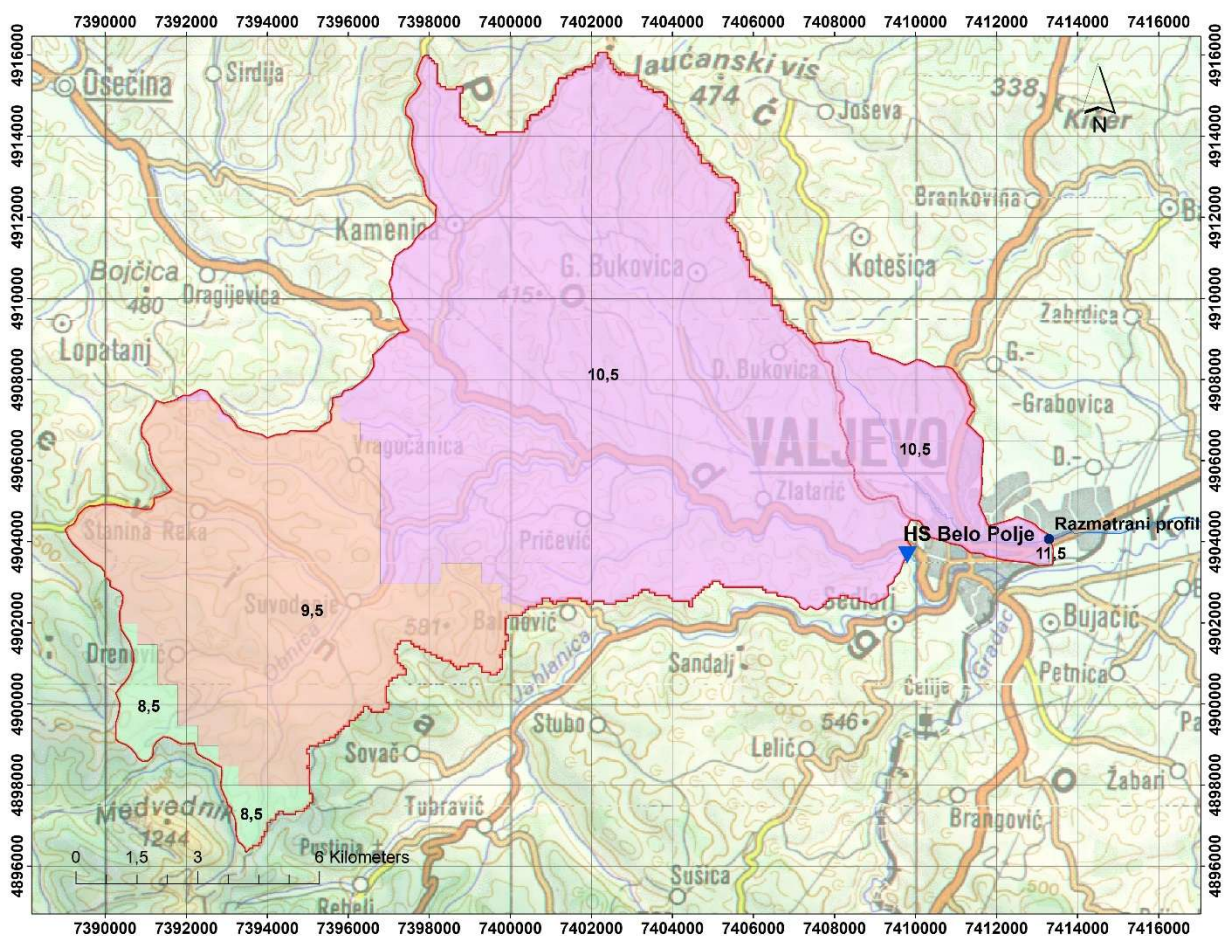
$$Q_{korig} = Q_{sr} \cdot K$$

Просечне температуре ваздуха и падавине на сливу потока су дефинисане на бази података са ГМС Ваљево. Просечне температуре ваздуха и падавине су одређене на бази изохијетске и изотермске карте Србије (Документација 16).

За одређивање просечног отицаја са слива *Langbein* је успоставио зависност $Q/E=f(P/E)$ која је графички представљена дијаграмом датим на следећој слици.



Слика 19. Зависност $Q/E=f(P/E)$ према моделу Лангбеин-а



Слика 20. Карта изотерми на сливу Обнице до ХС Бело Поље и на сливу реке Љубостиње до разматраног профила

Табела 7. Просечни вишегодишњи протоци воде на анализираним сливовима потока до разматраног профила и Обнице до ХС Бело поље ($\vartheta=0,835$)

профил	P (cm)	T (°C)	E (cm)	P/E	Q/E	H (cm)	q (l/s/km ²)	Q (m ³ /s)
Љубостиња код разматраног профила	84,08	10,5	13,137	6,400	1,968	25,856	8,199	0,120
ХС Бело Поље (Обница)	89,43	10,1	12,846	6,962	2,372	30,475	9,663	1,787

Средњи вишегодишњи протоци воде на профилу потока до разматраног профила

На основу анализа у претходна три подпоглавља овде је дефинисана вредност средњих вишегодишњих протока реке Љубостиње до профила код разматраног профила осредњавањем

вредности вишегодишњих протицаја добијених коришћењем методе аналогije, карте специфичног отицаја и методом Лангбеин-а. Резултати ових прорачуна су приказани у наредној табели.

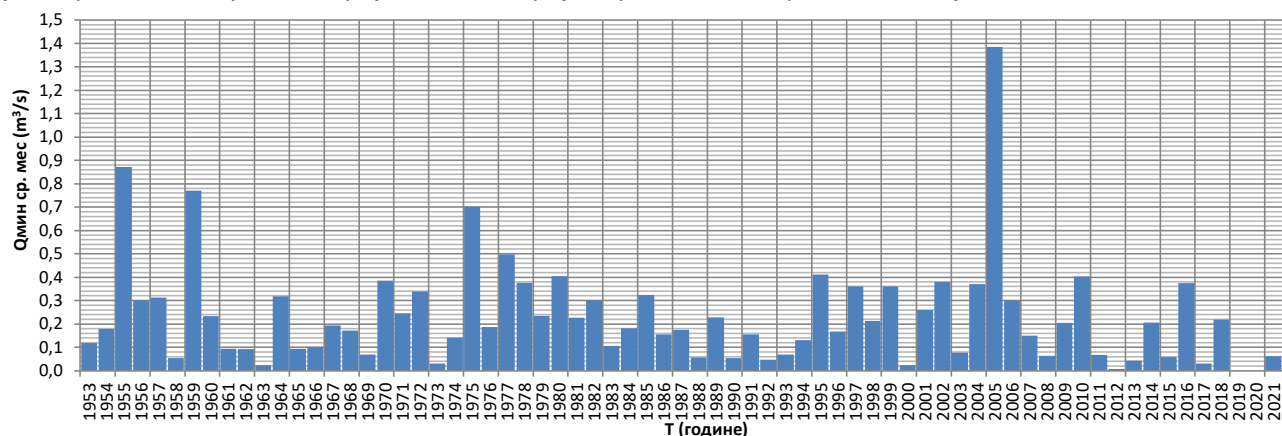
Табела 8. *Просечни вишегодишњи протоци на реци Љубостињи до разматраног профила (m^3/s)*

профил	водоток	$Q_{\text{аналогија}}$	$Q_{\text{спец.отицај}}$	$Q_{\text{Лангбеин}}$	$Q_{\text{средње}}$
код разматраног профила	река Љубостиња	0,084	0,090	0,120	0,098

У оквиру документације 14 за профил моста нешто низводније од анализираниог профила код разматраног профила је добијена вредност средњих вишегодишњих протицаја од $0,082 m^3/s$. У оквиру прорачуна је коришћена метода аналогije са реке Пештан (ХС Зеоке) која је значајније удаљена од реке Љубостиње (преко 40 km) одн. за овакав приступ се може констатовати да је мање тачан од приступа коришћеног у овој документацији.

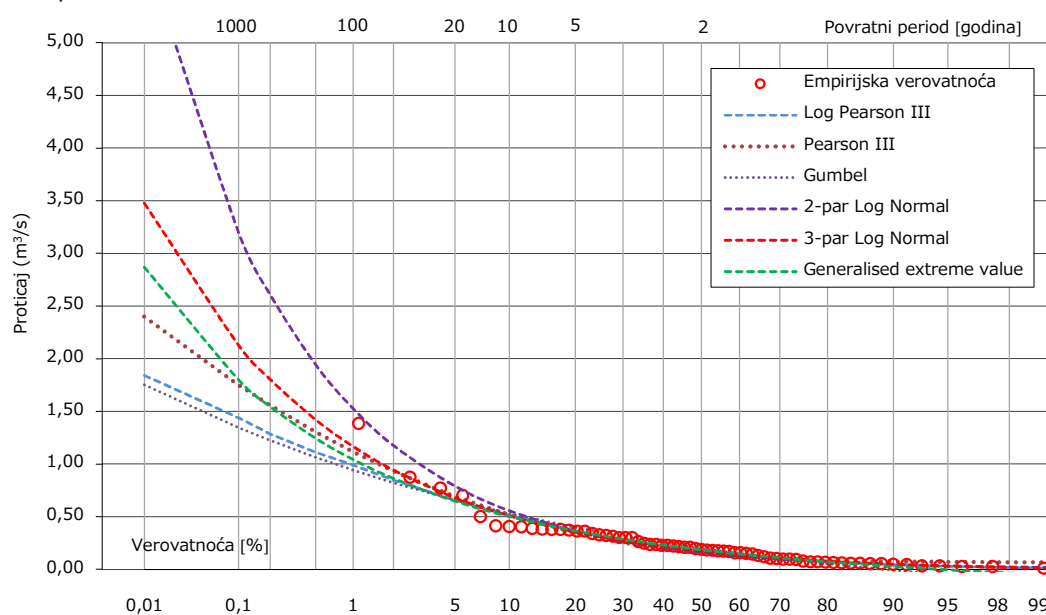
4.2. Мале воде реке Љубостиње до разматраног профила

За вредности минималних средње месечних протицаја на ХС Бело Поље (Обница) за период 1953-2021 је извршено тестирање теоријских и емпиријске расподеле вероватноћа појава.



Слика 21. *Приказ минималних средњих месечних протицаја на ХС Бело Поље (Обница) за период 1953-2021 (изостају подаци за 2019 и 2020. годину)*

Графички приказ прорачуна рачунских вредности за карактеристичне вероватноће појава је дат на следећој слици.



Слика 22. *Теоријске и емпиријске расподеле минималних средње месечних протицаја на ХС Бело Поље (Обница) за период 1953-2021*

Најбоље слагање теоријске расподеле је показала logPearson 3 расподела за коју су добијене следеће карактеристичне вредности: $Q_{\text{мин ср.мес 80\%}}=0,074 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{\text{мин ср.мес 95\%}}=0,028 \text{ m}^3/\text{s}$.

Према Правилнику о начину и мерилима за одређивање минимално одрживог протока који је објављен у службеном гласнику Р. Србије број 96/2023 од 2.11.2023. године, према коме се минимални одрживи проток ($Q_{\text{мол}}$) одређује се на основу еколошког протока ($Q_{\text{еп}}$) и протока за потребе низводних корисника ($Q_{\text{пнк}}$), на основу следеће формуле:

$$Q_{\text{мол}}(t) = Q_{\text{еп}}(t) + Q_{\text{пнк}}(t)$$

Еколошки проток одређује се у складу са ГЕП методом, на основу следећих вредности протока:

- просечни вишегодишњи проток у разматраном профилу ($Q_{\text{ср.год.}}$);
- минимални средњемесечни проток у разматраном профилу, обезбеђености 95% ($Q_{95\% \text{ мин, мес}}$);
- минимални средњемесечни проток у разматраном профилу, обезбеђености 80% ($Q_{80\% \text{ мин, мес}}$).

Уколико се располаже вишегодишњим серијама дневних протока, уместо минималних средњемесечних протока ($Q_{95\% \text{ мин, мес}}$ и $Q_{80\% \text{ мин, мес}}$) могу се користити одговарајуће вредности 30-дневних протока малих вода истих вероватноћа превазилажења: $Q_{95\% \text{ мин(30)}}$ и $Q_{80\% \text{ мин(30)}}$.

У хладном, односно ванвегетационом делу године (октобар-март), еколошки проток ($Q_{\text{еп}}$) одређује се на основу једне од три релације, у зависности од хидролошког режима водног тела површинске воде за које се врши прорачун, и то:

$$Q_{\text{еп}} = \begin{cases} 0,10 \cdot Q_{\text{ср.год.}} & \text{ако је } (Q_{95\% \text{ мин, мес}} \text{ или } Q_{95\% \text{ мин(30)}}) \leq 0,10 \cdot Q_{\text{ср.год.}} \\ (Q_{95\% \text{ мин, мес}} \text{ или } Q_{95\% \text{ мин(30)}}) & \text{ако је } 0,10 \cdot Q_{\text{ср.год.}} < (Q_{95\% \text{ мин, мес}} \text{ или } Q_{95\% \text{ мин(30)}}) < 0,15 \cdot Q_{\text{ср.год.}} \\ 0,15 \cdot Q_{\text{ср.год.}} & \text{ако је } (Q_{95\% \text{ мин, мес}} \text{ или } Q_{95\% \text{ мин(30)}}) \geq 0,15 \cdot Q_{\text{ср.год.}} \end{cases}$$

У топлом, односно вегетационом делу године (април-септембар), еколошки проток ($Q_{\text{еп}}$) одређује се на основу једне од три релације, у зависности од хидролошког режима водног тела за које се врши прорачун, и то:

$$Q_{\text{еп}} = \begin{cases} 0,15 \cdot Q_{\text{ср.год.}} & \text{ако је } (Q_{80\% \text{ мин, мес}} \text{ или } Q_{80\% \text{ мин(30)}}) \leq 0,15 \cdot Q_{\text{ср.год.}} \\ (Q_{80\% \text{ мин, мес}} \text{ или } Q_{80\% \text{ мин(30)}}) & \text{ако је } 0,15 \cdot Q_{\text{ср.год.}} < (Q_{95\% \text{ мин, мес}} \text{ или } Q_{80\% \text{ мин(30)}}) < 0,25 \cdot Q_{\text{ср.год.}} \\ 0,25 \cdot Q_{\text{ср.год.}} & \text{ако је } (Q_{80\% \text{ мин, мес}} \text{ или } Q_{80\% \text{ мин(30)}}) \geq 0,25 \cdot Q_{\text{ср.год.}} \end{cases}$$

У конкретном случају на профилу разматране локације на реци Љубостињи имамо следеће карактеристичне величине:

$$Q_{\text{ср.год.}}=0,098 \text{ m}^3/\text{s},$$

$$Q_{80\% \text{ мин, мес}}=0,003 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (применом модела аналогја са ХС Бело Поље (Обница))},$$

$$Q_{95\% \text{ мин, мес}}=0,001 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (применом модела аналогја са ХС Бело Поље (Обница))}.$$

на основу Правилника из новембра 2023. еколошки проток ($Q_{\text{еп}}$) износи:

$$\text{топли део године (април-септембар): } Q_{\text{еп}}=0,15 \cdot Q_{\text{ср.год.}}=0,0098 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{хладни део године (октобар-март): } Q_{\text{еп}}=0,10 \cdot Q_{\text{ср.год.}}=0,0147 \text{ m}^3/\text{s}$$

Вредност протицаја за потребе низводних корисника ($Q_{\text{пнк}}$) је динамичка категорија и променљива је током времена а одређује се посебно за сваки конкретан случај, у складу са издатим водним условима у поступку израде техничке документације потребне за добијање грађевинске дозволе.

4.3. Режим великих вода реке Љубостиње до разматраног профила

4.3.1. Прорачун услова отицања са слива

За потребе прорачуна меродавних великих вода на потоку до разматраног профила примењен је модел падавине-отицај који се заснива на теорији синтетичког јединичног хидрограма за детерминисање вршне ординате јединичног отицаја, као и на SCS методи за одређивање ефективних падавина.

SCS метода за ефективну кишу

Америчка агенција за заштиту земљишта (*Soil Conservation Service - SCS*, данас *National Resource Conservation Service - NRCS*) развила је метод за прорачун функције губитака кише. Основна поставка SCS методе за губитке кише је да је висина ефективне кише P_e увек мања или једнака укупној висини кише P , а да је вода упијена у земљиште након почетка отицаја I_a увек мања или једнака максималном капацитету тла S .

Количина воде коју земља упије пре него што почне отицај назива се почетним губитком I_a , тако да је максимална "потенцијална" ефективна киша једнака $(P - I_a)$. Претпоставка SCS методе је да су односи стварне и потенцијалне ефективне кише с једне стране, и стварних и потенцијалних губитака с друге, једнаки:

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{I}{S}$$

при чему важи да је: $P = P_e + I_a + I$. Из претходна два израза следи иницијална формула за прорачун ефективних падавина:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

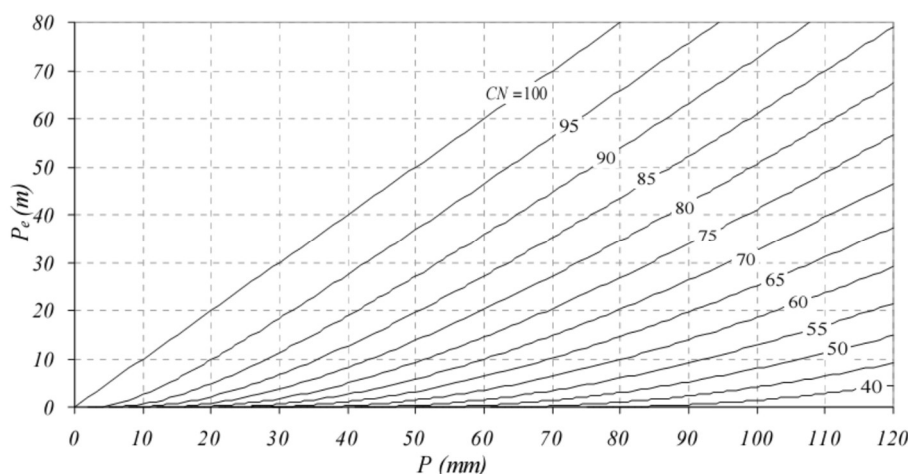
Проучавањем великог броја експерименталних сликова, у SCS су дошли до везе између почетног и максималног капацитета земљишта $I_a = 0.2S$. Коришћењем овог израза се добија следећа вредност ефективних падавина:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

Уместо капацитета земљишта S , уводи се тзв. број криве отицаја CN као параметар у горњој једначини. Број CN је без димензије и вредности му се крећу између 1 и 100, а његова веза са S је дата са:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

где се S добија у милиметрима. За непропусне и водене површине CN узима вредност 100, док је за природне површине $CN < 100$. Веза између P , P_e и CN представља SCS дијаграм, приказан на наредној слици. Овај дијаграм важи за нормалне услове отицаја.



Слика 23. Дијаграм односа укупне и ефективне кише по SCS методи

Одређивање хијетограма ефективне кише овде се обавља посредно, преко сумарне линије кише. За сваки временски интервал, ордината сумарне линије ефективне кише $P_e(t)$ добија се према датој једначини на основу ординате сумарне линије пале кише $P(t)$ или преко дијаграма на претходној слици за задат CN . При томе треба водити рачуна да укупна висина кише мора бити већа од почетних губитака, јер се не може изгубити више кише него што је пало. Дакле:

$$P_e = \begin{cases} \frac{(P(t) - 0.2S)^2}{(P(t) + 0.8S)}, & P > 0.2S \\ 0, & P \leq 0.2S \end{cases}$$

Са овако одређеном сумарном линијом ефективне кише, може се конструисати и хијетограм ефективне кише.

SCS метода - одређивање броја CN

Вредност криве отицаја CN заснива се на хидролошкој класи земљишта, начину коришћења земљишта, начину обраде и претходним условима отицања.

Према SCS, земљишта су подељена у четири хидролошке класе у зависности од потенцијалних услова отицања. Четири хидролошке класе земљишта су означене као А, Б, Ц и Д, где класа А има најмањи потенцијал отицања а класа Д највећи. Критеријуми за класификацију земљишта у хидролошке класе укључују минимални износ инфилтрације, дубину до водонепропусног слоја, нивоа подземних вода итд. У пракси се најчешће одређује на основу педолошког састава земљишта.

Број криве отицаја CN се одређује прво дефинисањем свих комбинација хидролошке класе земљишта и начина коришћења у целом сливном подручју, а потом се пондерисањем добија средња вредност за слив. Вредности броја CN за различите услове се могу наћи у литератури, нпр. *NRCS National Engineering Handbook* (2009).

На тај начин добијена вредност броја CN_2 односи се на просечне претходне услове отицања. Да би се обухватили неповољнији услови који најчешће владају при екстремним појавама великих вода (када се инфилтрационо-ретенциони капацитет слива сведе на минимум услед нпр. сатурације земљишта водом), у пракси се рачуна број CN за тзв. надпросечне услове отицаја (CN_3).

Метода синтетичког јединичног хидрограма

Јединични хидрограм се дефинише као хидрограм директног отицаја услед јединичне ефективне кише која је равномерно распоређена по површини слива и константног је интензитета током ефективног трајања.

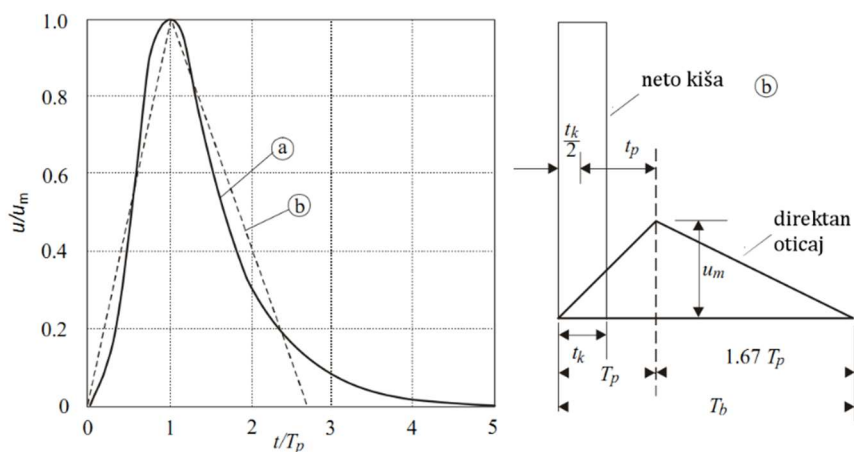
На неизученим сливовима се користе синтетички јединични хидрограми чија се конструкција заснива на транспозицији података са других сливова кроз регионалне везе између карактеристика слива и карактеристика хидрограма.

Код SCS бездимензионалног јединичног хидрограма, време се изражава у односу на време подизања хидрограма T_p , а ординате у односу на максималну ординату јединичног хидрограма u_m . Да би се овакав хидрограм применио, потребно је познавати време подизања T_p , док се максимална ордината u_m одређује из услова да површина испод будућег јединичног хидрограма буде једнака запремини отицаја.

Време подизања хидрограма T_p може се изразити помоћу времена кашњења слива t_p :

$$T_p = t_p + \frac{t_k}{2}$$

где је t_k трајање кише. Време кашњења t_p се најчешће одређује или посредством физичких карактеристика слива или проценом времена концентрације слива.



Слика 24. Синтетички јединични хидрограм по SCS: а) криволинијски јединични хидрограм и б) апроксимација троуглом

У пракси се често користи модификација синтетичког хидрограма коју су предложили Брајковић и Јовановић (Јовановић, 1989). Према овој модификацији, време опадајуће гране хидрограма T_r , као и база хидрограма T_b , нису фиксирани већ износе:

$$T_r = rT_p \text{ и } T_b = (1 + r) T_p$$

где је r константа за дати слив и зависи од величине слива и намене површина на сливу.

Време кашњења слива t_p које одређује време подизања хидрограма T_p , одређује се из регионалне зависности: $t_p = at_k + t_0$ где су сва времена изражена у часовима. Сматра се да параметар a зависи од површине слива, а параметар t_0 од физичких карактеристика слива. Величина t_0 се рачуна према следећој формули :

$$t_0 = 1,06 \cdot \left(\frac{L_t}{I_{ur}}\right)^{0,47}$$

где су:

L_t - дужина главног тока (km)

L_c - дужина главног тока од профила испуста до тежишта слива (km)

I_{ur} - уравнио пад тока (%)

Параметар t_k - трајање кише, за које се добија максимални отицај, одређује се поступком оптимизације, одн. рачунају се различите вредности t_k да би се добила вредност која даје максималну вредност ординате хидрограма (вршног протицаја).

Максимална ордината протицаја (изражена у m^3/s) се рачуна као:

$$Q = \frac{2 \cdot A \cdot P_e}{T_b \cdot 60} \max$$

где су: A - површина слива (km^2), P_e - ефективне падавине (mm) и T_b - база хидрограма тј. време од почетка до краја троугаоног хидрограма (min). База хидрограма је сума времена подизања хидрограма T_p и времена опадања хидрограма T_r .

Анализа киша јаког интензитета

Падавине, као улазни параметар у модел падавине-отицај, коришћене су у облику зависности "максимална висина кише - трајање - вероватноћа појаве" (Н-Т-Р криве) за кише јаког интензитета а кратког трајања. За потребе ове хидролошке анализе, коришћени су подаци са главне метеоролошке станице Ваљево ($\phi=44^{\circ}19'N$; $\lambda=19^{\circ}55'E$; $h=176$ mnm) као најближе главне метеоролошке станице (Документација 29). За дефинисање интензитета јаких киша на сливном подручју коришћена су својства редукционих кривих јаких киша, одређена на основу осматрања на ГМС Ваљево. Редукционе криве јаких киша формиране су према зависности:

$$\Psi_p(\tau) = \frac{P_{max,p}(\tau)}{P_{max,dn,p}}$$

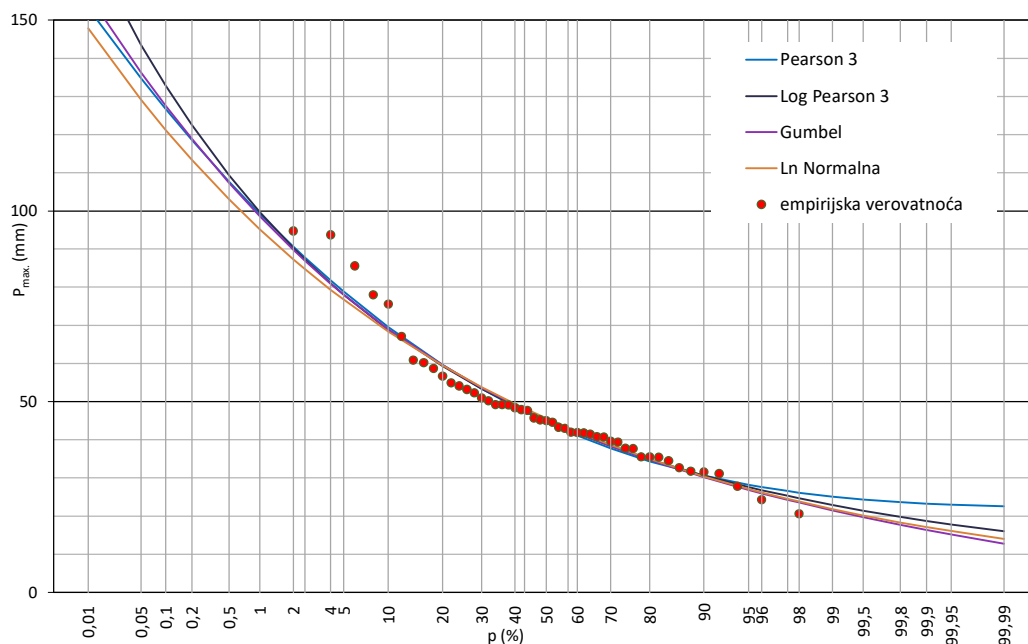
За формирање редукционих кривих коришћен исти период обраде и за ординате краткотрајних падавина и за максималне дневне падавине (1961-2009). Максимална висина кише краћег трајања одређена је за сваки интервал времена τ и вероватноћу појаве p према изразу:

$$P_{\tau,p} = P_{max,dn,p} \cdot \Psi(\tau)$$

где $P_{max,dn,p}$ представља максималну дневну кишу вероватноће појаве p на посматраном сливном подручју за укупан период обраде, док је $\Psi(\tau)$ ордината редукционе криве јаких киша.

Како би се иновирала НТР крива (из Документације 15) узимајући у обзир и мерења падавина у периоду од 2010. до 2023. године, извршена је статистичка анализа максималних дневних падавина за укупан период осматрања од 1961. до 2023. године.

Извршена је статистичка обрада низа годишњих максималних дневних падавина. Након испитивања слагања теоријских и емпиријских функција расподеле, усвојена је Gumbel расподела.



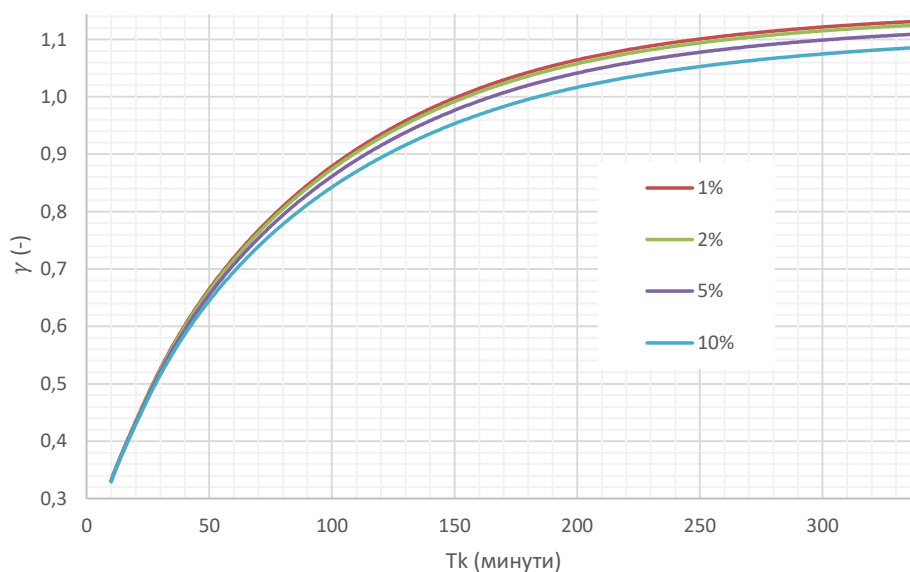
Слика 25. Рачунске вредности P_{max} на ГМС Ваљево (1949-2009)

Табела 9. Рачунске вредности P_{max} на ГМС Ваљево за два анализирана периода (Gumbel)

	1%	2%	5%	10%
1961-2009	98,5	89,8	78,0	69,0
1961-2023	101,5	92,2	79,9	70,4

Табела 10. Редукционе криве јаких киша за ГМС Ваљево (1961-2023)

τ (min)	ψ (τ)			
	1%	2%	5%	10%
10	0,281	0,281	0,280	0,279
20	0,384	0,383	0,381	0,379
30	0,476	0,474	0,470	0,465
60	0,670	0,666	0,657	0,645
120	0,885	0,879	0,865	0,844
240	1,045	1,038	1,022	0,997
360	1,086	1,080	1,065	1,041



Слика 26. Редукционе криве јаких киша за ГМС Ваљево (1961-2023)

4.3.2. Резултати прорачуна великих вода на Љубостињској реци код разматраног профила

За прорачун меродавних падавина су коришћени метеоролошки подаци из поглавља 3.3 и 4.3.1.

Ефективне падавине одређене су по моделу SCS, коришћењем кривих CN. Број криве CN за наведено сливно подручје одређен је на основу педолошког састава земљишта, начина његове обраде и стања биљног покривача.

Средња вредност CN на сливу Обнице до ХС Бело Поље је дефинисана на бази већег броја појединачних епизода (Документација 30).

Табела 11. Дефинисане вредности CN на сливу реке Обнице до ХС Бело Поље

code	A (m ²)	c (%)	CN2	вегетација на сливу	S	S2s	CN2s	CN3	CN3*c	S	S*c
112	651945	0,4%	73,5	Нецеловита урбана подручја	91,4	80,7	75,9	89,3	0,3	30,6	0,1
211	3470829	1,9%	64,4	Ненаводњавано обрадиво земљиште	140,3	123,9	67,2	83,8	1,6	49,1	0,9
231	676781	0,4%	75,0	Пашњаци	84,7	74,8	77,3	90,0	0,3	28,1	0,1
242	6092881	33,0%	61,8	Комплекс култивисаних парцела	156,9	138,5	64,7	82,1	27,0	55,5	18,3
243	81008775	43,8%	61,1	Претежно пољопривредно земљиште са већим подручјима природне вегетације	161,8	142,9	64,0	81,5	35,7	57,5	25,2
311	37893504	20,5%	60,4	Широколисне шуме	166,8	147,3	63,3	81,0	16,6	59,5	12,2
312	86926	0,0%	72,0	Четинарске шуме	98,8	87,2	74,4	88,4	0,0	33,3	0,0
321	161434	0,1%	65,0	Природни травнати предели	136,8	120,8	67,8	84,2	0,1	47,7	0,0
184879074 100%					81,7 56,87						

Вредности CN за слив Љубостиње су одређене на бази дефинисаних CN за сваку појединачну класу CLC 2018 на сливу реке Обнице до ХС Бело Поље.

Табела 12. Одређивање вредности CN на сливу реке Љубостиње до разматраног профила

code	A (m ²)	c (%)	CN2	вегетација на сливу	S	S2s	CN2s	CN3	CN3*c	S	S*c
112	3619726	24,66%	70,51	Нецеловита урбана подручја	106,2	99,43	71,87	86,85	21,42	38,47	9,49
121	302960	2,06%	85,20	Индустријске или комерцијалне јединице	44,1	41,30	86,01	94,50	1,95	14,77	0,30
231	34046	0,23%	75,00	Пашњаци	84,7	79,24	76,22	89,45	0,21	29,96	0,07
242	5491267	37,41%	62,97	Комплекс култивисаних парцела	149,3	139,77	64,50	81,91	30,64	56,10	20,99
243	2144895	14,61%	63,00	Претежно пољопривредно земљиште са већим подручјима природне вегетације	149,2	139,64	64,53	81,93	11,97	56,04	8,19
311	3084859	21,02%	62,00	Широколисне шуме	155,7	145,70	63,55	81,22	17,07	58,75	12,35
14677752 100%					83,26 51,38						

Приказ оптимизационог поступка одређивања вредности Q_{\max} за $p=1\%$, $p=2\%$, $p=5\%$ и $p=10\%$ је дат у следећој табели.

Табела 13. Приказ процеса оптимизације прорачуна великих вода за $p=1\%$, $p=2\%$, $p=5\%$ и $p=10\%$ (варирање t_k – трајање кише) на сливу реке Љубостиње до разматраног профила

p	(%)	1							
t_k	(min)	154	155	156	157	158	159	160	161
P	(mm)	100,2	100,3	100,5	100,7	100,9	101,0	101,2	101,4
P_{ef}	(mm)	57,2	57,4	57,5	57,7	57,8	57,9	58,1	58,2
t_p	(min)	3,87	3,88	3,88	3,89	3,89	3,90	3,90	3,91
T_p	(min)	5,16	5,17	5,18	5,20	5,21	5,22	5,24	5,25
T_b	(min)	11,60	11,63	11,66	11,69	11,72	11,75	11,78	11,81
Q_{max}	(m³/s)	40,525	40,528	40,531	40,532	40,531	40,530	40,528	40,524

p	(%)	2							
t_k	(min)	157	158	159	160	161	162	163	164
P	(mm)	89,6	89,7	89,9	90,0	90,1	90,3	90,4	90,6
P_{ef}	(mm)	48,1	48,2	48,4	48,5	48,6	48,7	48,8	49,0
t_p	(min)	3,89	3,89	3,90	3,90	3,91	3,91	3,92	3,92
T_p	(min)	5,20	5,21	5,22	5,24	5,25	5,26	5,28	5,29
T_b	(min)	11,69	11,72	11,75	11,78	11,81	11,84	11,87	11,90
Q_{max}	(m³/s)	33,818	33,821	33,823	33,824	33,824	33,823	33,821	33,818

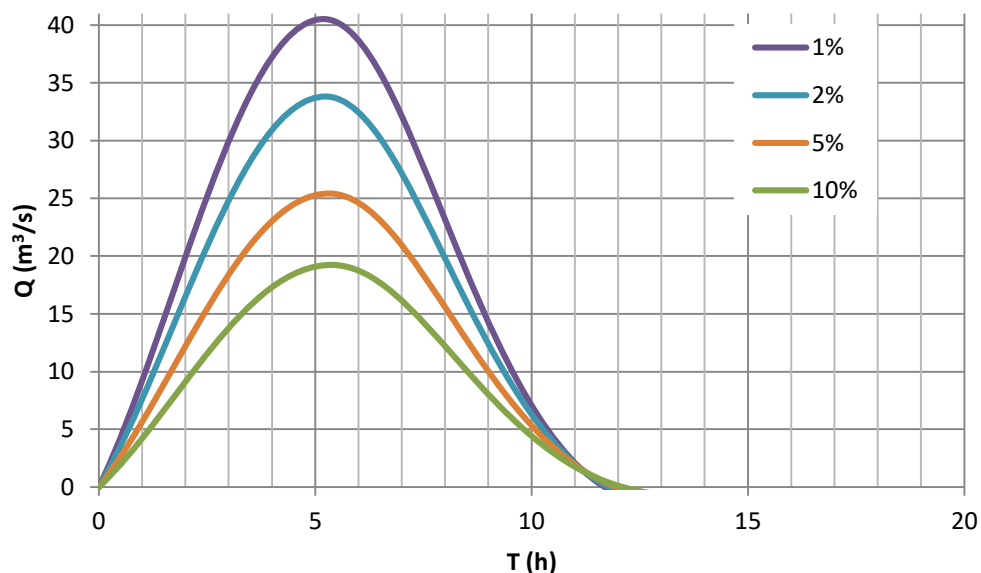
p	(%)	5							
t_k	(min)	163	164	165	166	167	168	169	170
P	(mm)	75,8	75,9	76,0	76,1	76,2	76,3	76,5	76,6
P_{ef}	(mm)	36,7	36,8	36,9	37,0	37,1	37,2	37,3	37,3
t_p	(min)	5,28	5,29	5,30	5,32	5,33	5,34	5,36	5,37
T_p	(min)	11,87	11,90	11,93	11,96	11,99	12,02	12,05	12,08
T_b	(min)	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,68	0,68	0,68
Q_{max}	(m³/s)	25,410	25,411	25,412	25,412	25,411	25,410	25,408	25,405

p	(%)	10							
t_k	(min)	167	168	169	170	171	172	173	174
P	(mm)	64,8	64,9	65,0	65,1	65,2	65,3	65,4	65,5
P_{ef}	(mm)	28,1	28,1	28,2	28,3	28,4	28,4	28,5	28,6
t_p	(min)	5,33	5,34	5,36	5,37	5,38	5,40	5,41	5,42
T_p	(min)	11,99	12,02	12,05	12,08	12,11	12,14	12,17	12,20
T_b	(min)	0,69	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67
Q_{max}	(m³/s)	19,244	19,246	19,247	19,248	19,248	19,248	19,247	19,246

Сprovedеним поступком прорачуна добијени су максимални протицаји за вероватноће појаве $p=1\%$, $p=2\%$, $p=5\%$ и $p=10\%$ односно за повратне периоде од 100, 50, 20 и 10 године.

Табела 14. Резултати прорачуна пикова великих вода на сливу реке Љубостиње до разматраног профила

p(%)	$P_{dn,p}$	P_e	q_{spec}	T_p	T_b	V	T_r	Q_{max}
	(mm)	(mm)	(m³/s/km²)	(h)	(h)	(10⁶m³)	(h)	(m³/s)
1	104,9	57,65	2,76	5,20	11,69	0,8531	6,50	40,53
2	93,9	48,48	2,30	5,24	11,78	0,7174	6,55	33,82
5	80,0	36,98	1,73	5,32	11,96	0,5472	6,65	25,41
10	69,8	28,36	1,31	5,38	12,11	0,4197	6,73	19,25



Слика 27. Резултати прорачуна великих вода на сливу реке Љубостиње до разматраног профила

У оквиру документације 14 (2012. година) за профил моста нешто низводније од анализираног профила код разматраног профила је добијене су вредности великих вода $Q_{1\%} = 58,2 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{2\%} = 50,8 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{5\%} = 41,5 \text{ m}^3/\text{s}$ и $Q_{10\%} = 34,6 \text{ m}^3/\text{s}$. У оквиру прорачуна је коришћен $CN=93$ (без приказа прорачуна), што је поприлично велика вредност. Вредност уравниога пада Љубостиње од 0,97% је већа вредност од вредности одређене у оквиру ове студије (0,884%).

У оквиру документације 28 (2022. година) дефинисана је вредност $Q_{1\%} = 43 \text{ m}^3/\text{s}$ за мост који се налази око 550 m низводно од разматране локације.

4.4. Рекапитулација хидролошких анализа и прорачуна

За потребе ове студије одн. за потребе градње објекта прикључног гасовода и мерно регулационе станице Крушик на профилу реке Љубостиње код КП 2751 КО Ваљево (град Ваљево) извршене су метеоролошке анализе на ГМС Ваљево и одређивање редукционе криве за слив реке Љубостиње до разматраног профила на бази података са ГМС Ваљево. Прикупљени су и подаци о максималним годишњим падавинама на ГМС Ваљево. Затим су дефинисане вредности средњих, малих и великих вода на реци Љубостињи код разматраног профила. У овом поглављу се презентују само резултати средњих, малих и великих вода који се дају као меродавни за потребе хидрауличких прорачуна реке Љубостиње на профилу код разматраног профила.

4.4.1. Средње воде

У поглављу 4.1 су извршени прорачуни средњих годишњих протока вода на реци Љубостињи до разматраног профила. Средњи вишегодишњи проток воде на профилу реке Љубостиње до разматраног профила износи **0,098 m³/s**.

4.4.2. Мале воде

Према Правилнику о начину и мерилима за одређивање минимално одрживог протока који је објављен у службеном гласнику Р. Србије број 96/2023 од 2.11.2023. године, минимални одрживи проток ($Q_{\text{моп}}$) се одређује се на основу еколошког протока ($Q_{\text{еп}}$) и протока за потребе низводних корисника ($Q_{\text{пнк}}$). Еколошки проток ($Q_{\text{еп}}$) износи:

- топли део године (април-септембар): $Q_{\text{еп}} = 0,0098 \text{ m}^3/\text{s}$
- хладни део године (октобар-март): $Q_{\text{еп}} = 0,0147 \text{ m}^3/\text{s}$

Вредност протицаја за потребе низводних корисника ($Q_{\text{пнк}}$) је динамичка категорија и променљива је током времена а одређује се посебно за сваки конкретан случај, у складу са издатим водним условима у поступку израде техничке документације потребне за добијање грађевинске дозволе.

4.4.3. Велике воде

У поглављу 4.3 су извршени прорачуни великих вода којим су дефинисане велике воде на реци Љубостињи код разматраног профила. Резултати прорачуна су приказани у наредној табели.

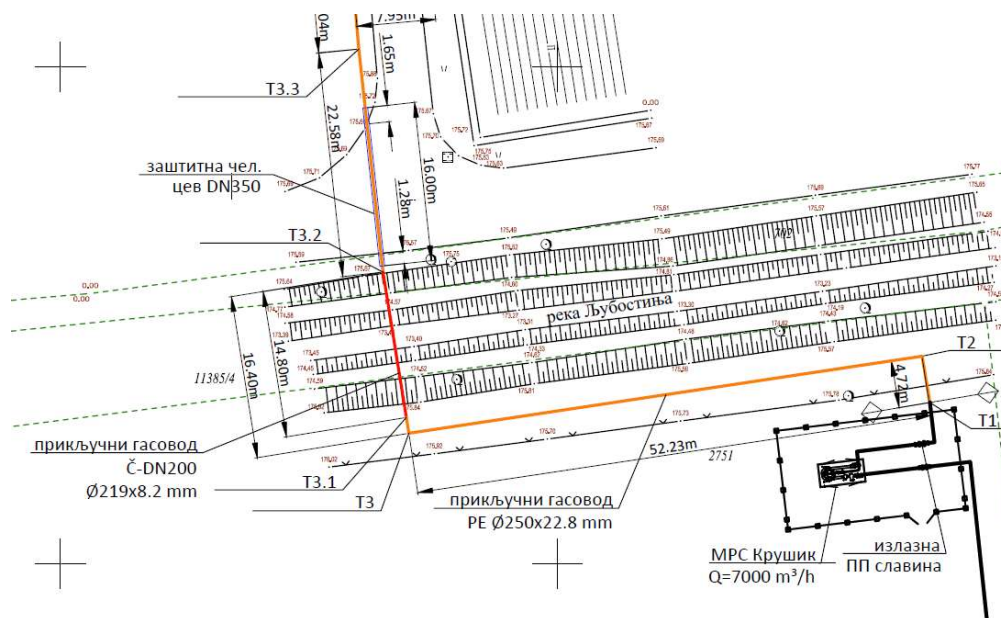
Табела 15. Приказ рачунских вредности великих вода одређене вероватноће појаве на потоку код разматраног профила (m^3/s)

Профил / р(%)	1	2	5	10
река Љубостиња код разматраног профила	40,53	33,82	25,41	19,25

5. ХИДРАУЛИЧКА АНАЛИЗА

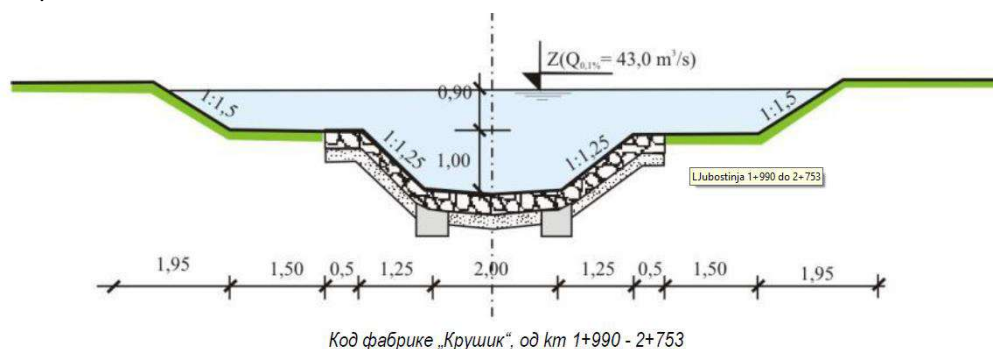
5.1. Увод

Задатак хидрауличке анализе је да дефинише хидраулички режим реке Љубостиње у непосредној близини локације на којој је планирана изградња цевног моста. Предметна деоница реке Љубостиње је регулисана двогубим коритом, а локација пројектованог моста налази се око 2100 метара од ушћа Љубостиње у Колубару.



Слика 28. Положај пројектованог цевног моста у односу на реку Љубостињу

Према водним условима издатим од стране Јавног водопривредног предузећа Србијаводе у циљу израде техничке документације за изградњу друмског моста на реци Љубостињи у Ваљевоу на катастарским парцелама бр. 11384/1, 2755/3, 2884/2, 698/2 и 698/19 све у КО Ваљево (бр. 11439/3 од 27.12.2022. године) који се налази око 550 метара узводно од разматране локације, корито реке Љубостиње је двогубо, ширине у дну је 2м, нагиб косина минор корита 1 : 1.25 и мајор корита 1:1,5. Обложено је само минор корито и то каменом у цементном малтеру. Корито је димензионисано на $Q_{0.1\%} = 43 \text{ m}^3/\text{s}$.



Слика 29. Карактеристични профил реке Љубостиње у зони моста (извор: Водни услови ЈВП Србијавода бр. 11439/3 од 27.12.2022. године)

5.2. Метод прорачуна линије нивоа

У водотоку, у природним условима, успоставља се неједнолик и неустаљен хидраулички режим. Неједнолики течјења, односно променљивост карактеристика хидрауличког режима по дужини тока, је условљена променама морфолошких карактеристика речног корита (уздужног пада и попречног пресека), док је неустаљеност течјења, пре свих великих вода, проузрокована променама хидролошког режима током времена.

Протицање великих вода карактерише просторна променљивост морфолошких параметара (подужног пада и попречног пресека речног корита), што значи да се течјење одвија у условима неједноликог хидрауличког режима. Због релативно малог пада природног корита, мањем од критичног, протицање воде на локалитету посматране деонице се одвија у условима мирног хидрауличког режима. С друге стране, променљивост хидролошког режима (нивоа и протицаја воде), условила је неустаљен хидраулички режим.

За прорачуне хидрауличког режима примењен је класичан метод анализе устаљеног течјења у кориту призматичне форме, и то у форми једнодимензионалног модела. Детерминисање линија нивоа воде и осталих карактеристика хидрауличког режима (површина протицајних профила, ширина водног огледала, хидрауличких радијуса, брзина течјења, вучних сила итд) у условима карактеристичних протицаја воде, се заснивало на примени једначине Шези-Манинга:

$$Q = \left[\frac{1}{n_{gl}} \cdot A_{gl} \cdot R_{gl}^{(2/3)} \cdot \sqrt{I_{gl}} \right] + \sum_{i=1}^k \left[\frac{1}{n_{in,i}} \cdot A_{in,i} \cdot R_{in,i}^{(2/3)} \cdot \sqrt{I_{in,i}} \right]$$

у којој су:

Q – протицај воде (m³/s)

n – Манингов коефицијент рапавости (m^{-1/3}s)

A – површина протицајног профила (m²)

R – хидраулички радијус (m)

I – пад енергије тока (m/m)

Индекси параметара имају значење:

gl – главно корито

in – инундација

k – број инундација

Хидраулички прорачуни су поред провере пропусне моћи водотока обухватали и проверу хидрауличког режима, помоћу Фрудовог броја, за чији прорачун је примењен израз:

$$Fr = \frac{Q^2 B}{g A^3}$$

у коме су:

Q – протицај (m³/s)

B – ширина водног огледала (m)

A – површина протицајног профила (m²)

g – убрзање Земљине теже (m/s²)

Вредност Фрудовог броја Fr=1 одговара критичној дубини тока, вредност Fr<1 индицира миран режим и вредност Fr>1 указује на силовит режим.

Прорачун хидрауличког режима је обухватао прорачун линија нивоа воде и прорачун морфолошких (површина протицајног профила, ширина водног огледала и хидрауличког радијуса) и хидрауличких (брзина и вучна сила) параметара режима. Прорачуни линија нивоа воде и морфолошких и хидрауличких параметара режима су рађени за дефинисане хидролошке услове.

Хидраулички прорачуни су рађени употребом програмског пакета HEC-RAS. Рачунска процедура је заснована на решавању линијске енергетске једначине, у којој се губици енергије обухватају кроз губитке на трење (преко Манинговог коефицијента) и локалне губитке због ширења/сужевања тока (преко коефицијента којим се множи брзинска висина). Динамичка једначина се користи за деонице са прелазним режимом, на којима се јавља хидраулички скок, као и при прорачуну течења у зони мостова и ушћа.

5.3. Хидраулички отпор корита за велике воде

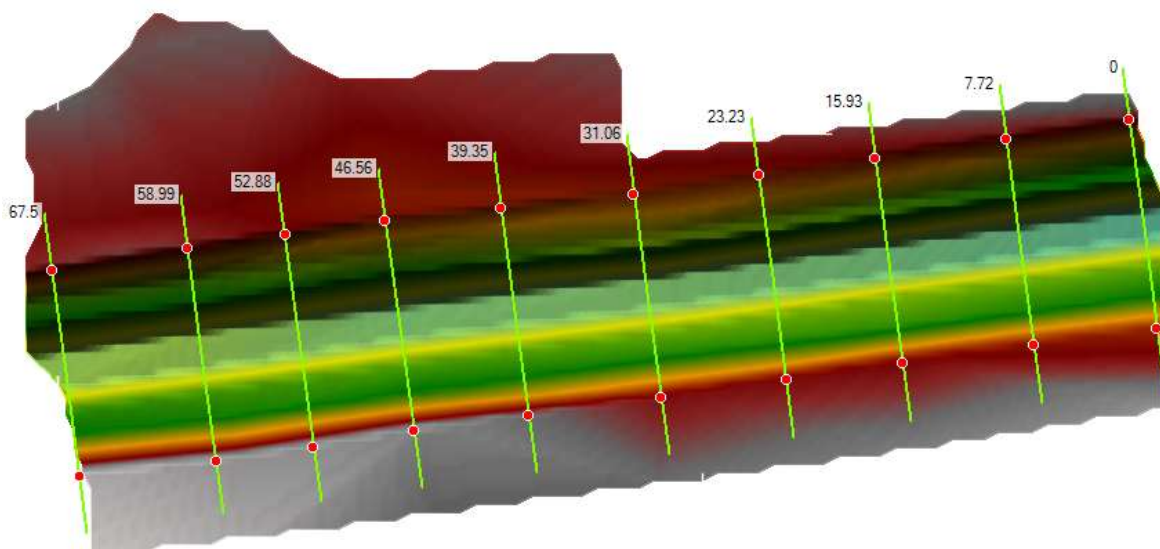
Хидраулички прорачуни на деоници обухваћеној анализом су рађени са рапавошћу, односно отпором речног корита дефинисаним помоћу Манинговог коефицијента, чије су вредности одређене на основу препорука у литератури (“Регулација река”, Грађевински факултет, Београд, 2022), у зависности од сагледаних карактеристика (одлика речног наноса, вегетације, непризматичности речног корита, променљивости облика и димензија попречног пресека дуж тока, меандрирања трасе, деформација речног корита изражених процесима ерозије и засипања, промена основних хидролошких параметара – водостаја и протицаја воде итд).

Хидраулички прорачуни су вршени са Манинговим коефицијентима рапавости за регулисано корито у постојећем стању $n_{gl} = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ и инундације (вегетација) $n_{in} = 0,050 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Напомиње се да се дуж реке на разматраној деоници и на левој и на десној обали налази зелени појас који се у истој нивелацији налази испред пута (на левој обали) односно паркинга и објекта на десној обали.

5.4. Геометријски модел корита

Геометријски модел постојећег корита посматране деонице реке Љубостиње формиран је на основу снимљених попречних профила корита водотока, инундације и постојећих објеката. У ужој зони локације пројектованог моста снимљен је већи број геодетских тачака које су обухватиле шири потез потока у дужини од око 70 метара (укупно 6 снимљених профила). Од снимљених тачака формиран је дигитални модел терена (ДМТ), на основу којег су формиран одговарајући попречни профили тока на растојању од 6-10 метара (укупно 10 профила) који су коришћени за формирање хидрауличног модела.

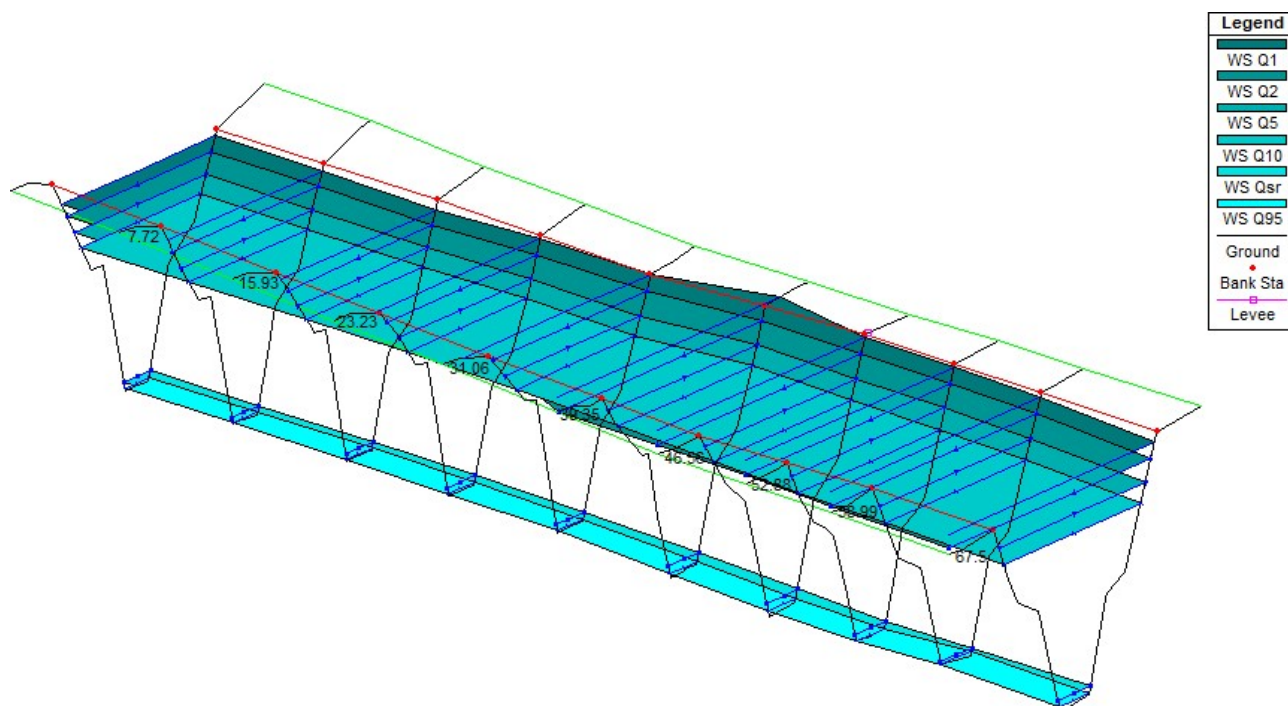
Усвојена је релативна стационажа тока која почиње од најнизводнијег снимљеног профила, на локацији $X=7413393$, $Y=4904081$. Ситуациони приказ са распоредом снимљених профила коришћених у хидрауличком прорачуну са дигиталним моделом терена дат је на слици 30.



Слика 30. Распоред рачунских попречних профила и дигитални модел терена

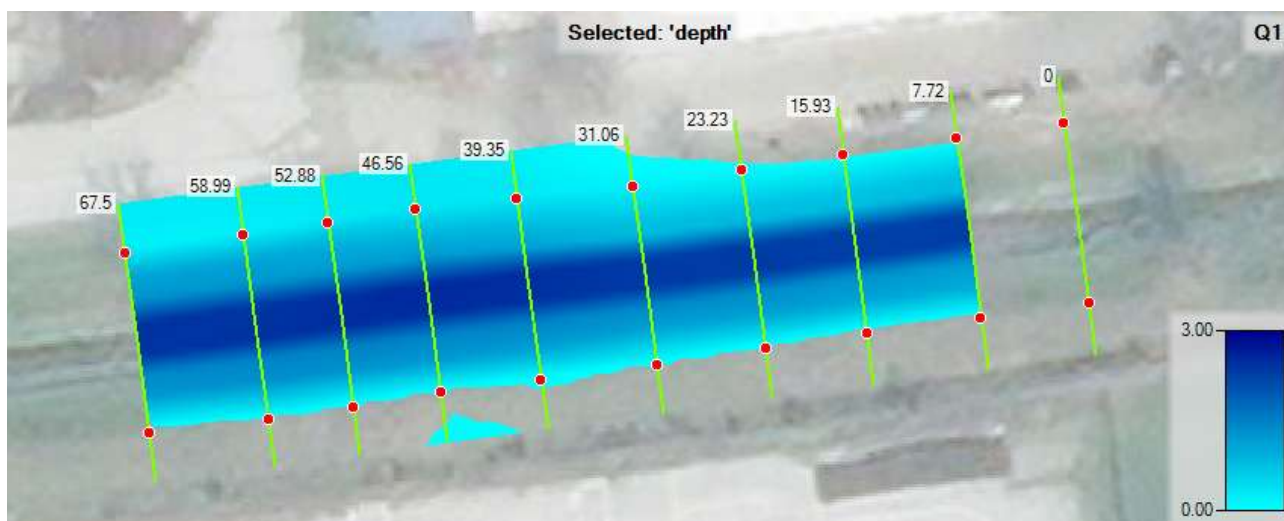
5.5. Резултати

Сprovedени су прорачуни којима су одређени хидрауличко-морфолошки параметри тока на свим профилима на разматраној деоници потока, за рачунске велике воде повратног периода од 100, 50, 20 и 10 година и средње и мале воде. Детаљни резултати дати су у прилозима у виду линија нивоа воде на подужном профилу, попречним профилима и табеларно (табела 17). На слици 31 су резултати приказани у виду линија нивоа на тродимензионалном приказу усвојене геометрије корита потока за различите вероватноће појаве великих вода.

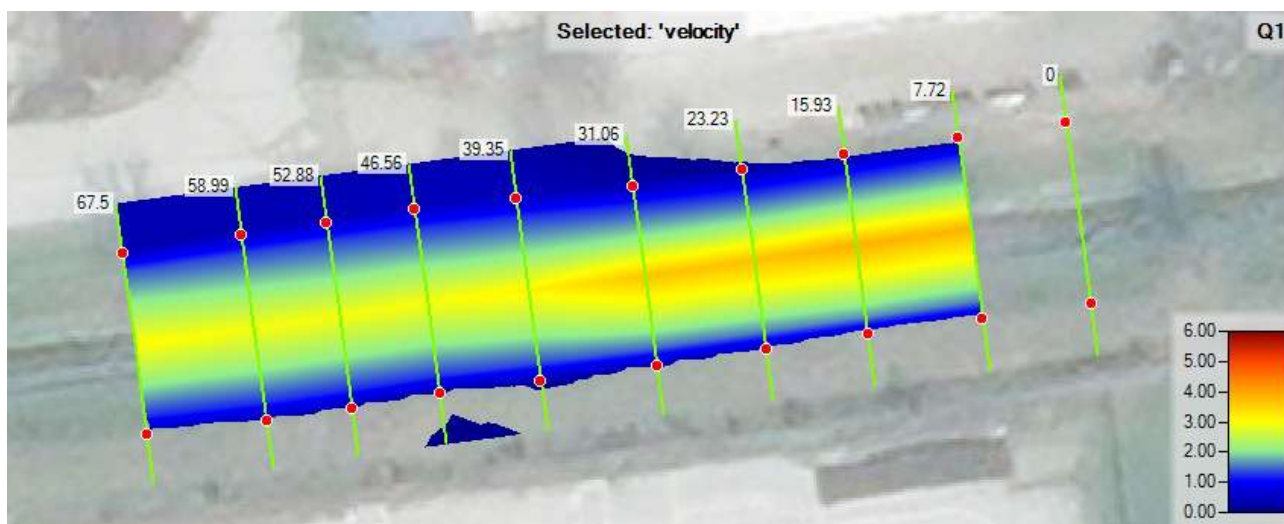


Слика 31. Тродимензионални приказ усвојене геометрије корита реке Љубостиње у зони пројектованог цевног моста, са резултатима прорачуна у виду нивоа воде за различите вероватноће појаве велике воде, као и мале и средње воде

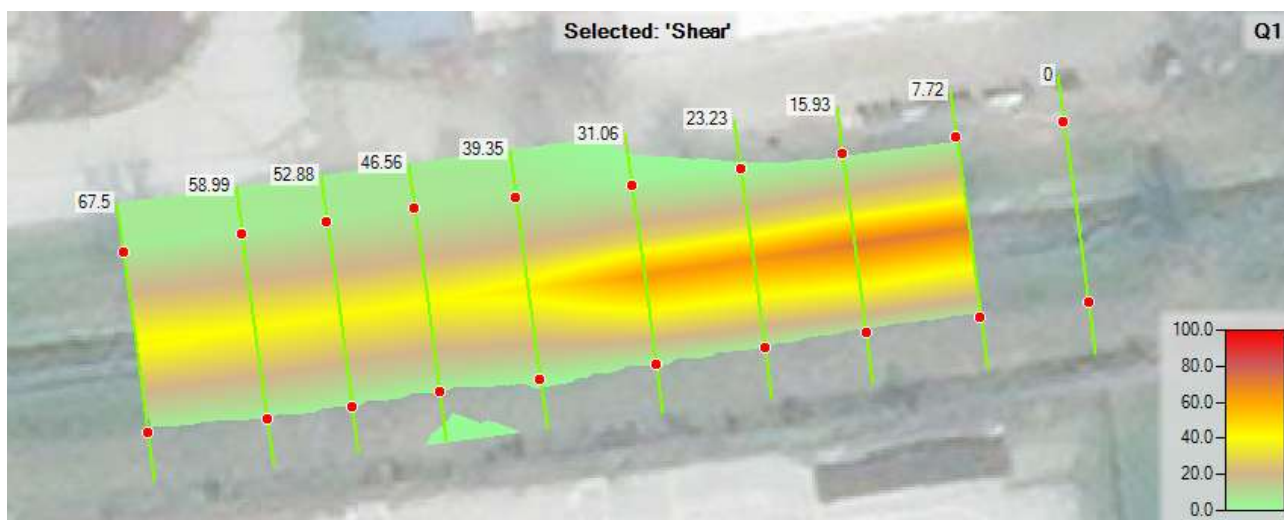
За велике воде вероватноће појаве једном у сто година, дат је приказ плавне зоне и дубине воде (слика 32), као и просторни распоред брзина течења (слика 33) и вучне силе (слика 34).



Слика 32. Плавна зона (Q1%) са приказом дубина (у m)

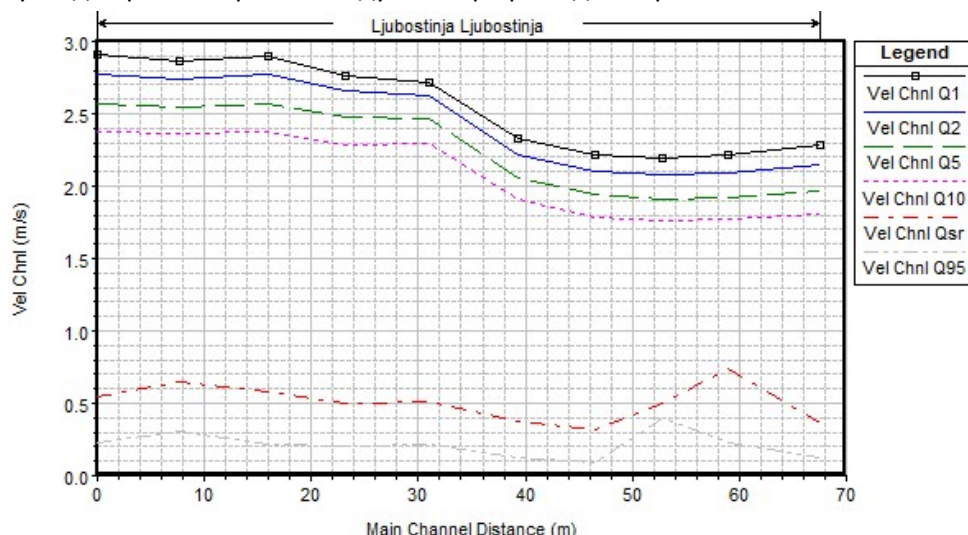


Слика 33. Просторни распоред брзина (Q1%) (у m/s)



Слика 34. Просторни распоред вучне силе (у N/m²)

Резултати показују да би у начелу регулисано корито реке Љубостиње у зони пројектованог цевног моста требало да може несметано да прихвати стогодишње велике воде које износе $Q_{1\%}=40,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Хидраулички модел показује да у постојећем стању услед неуједначене геометрије попречног профила дуж разматране деонице, као и неуједначеног подужног пада дна, може доћи до мањих изливања рачунских великих вода на узводним профилима разматране деонице (профил 0+047). Ово указује на неопходност одржавања корита првенствено у виду одношења исталоженог материјала ради обезбеђивања уједначеног подужног пада дна корита (видети подужни профил у прилогу 5.6.1). Резултати показују да се у кориту реке Љубостиње при великим водама образују брзине које износе од 2 до 3 m/s. Уочава се повећање брзине (до 3 m/s) у низводној зони разматране деонице, првенствено услед неравномерности подужног профила дна корита.



Слика 35. Промена средње брзине дуж тока

Локацији будућег цевног моста одговара профил на стационачи 0+059 разматраног дела корита, где су ради прегледности дате срачунате вредности нивоа воде.

Табела 16. Резултати прорачуна нивоа воде за меродавне протоке у профилу 0+059 (локација пројектованог цевног моста)

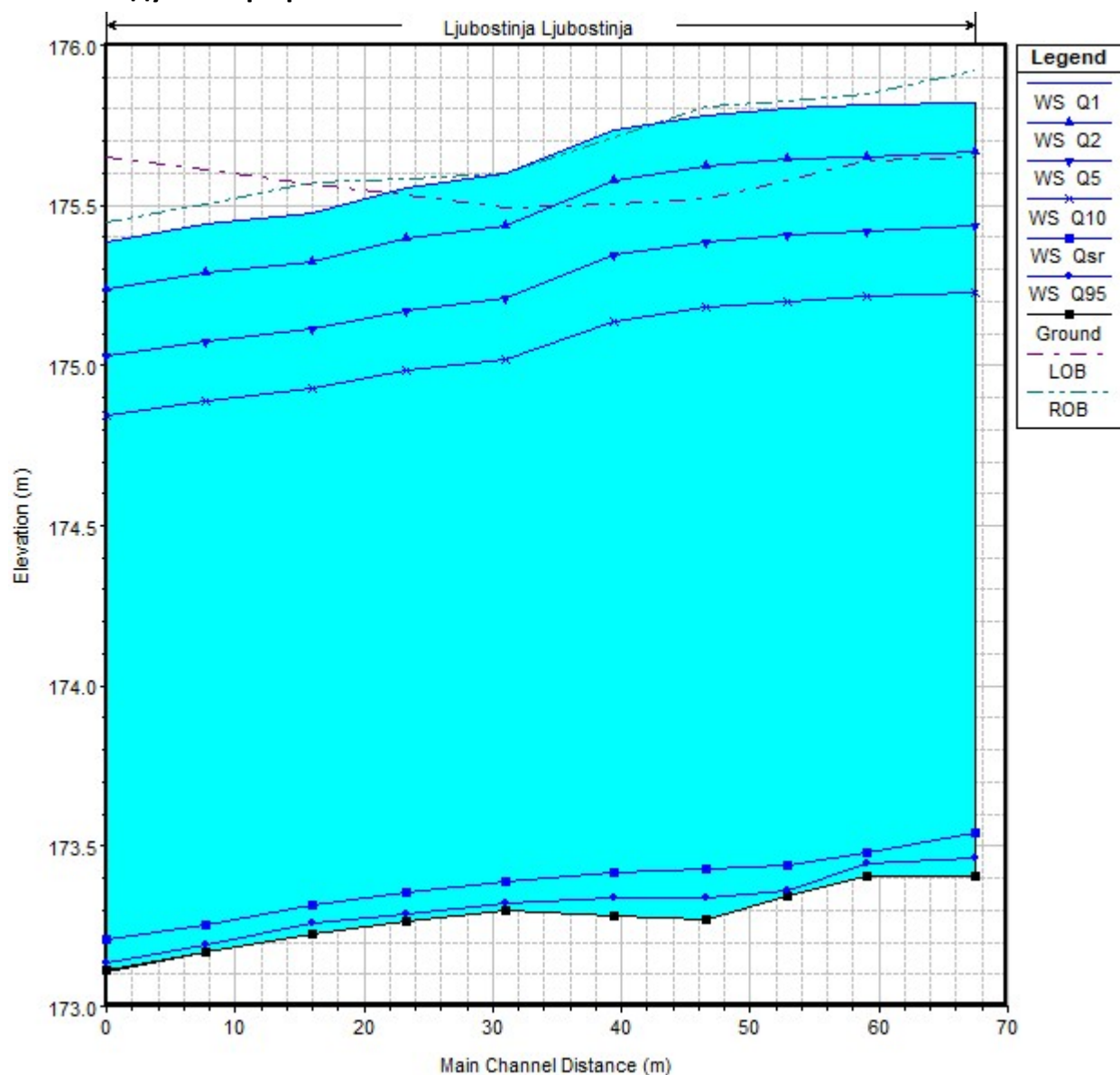
	Q (m ³ /s)	Z (mm)
Q1%	40.53	175.81
Q2%	33.82	175.65
Q5%	25.41	175.42
Q10%	19.25	175.21
Qsr	0.098	173.48
Qmin	0.010	173.44

Напомиње се да се срачунате вредности односе на постојеће (снимљено) стање корита. Уколико се чишћењем корита обезбеди уједначен пад дна дуж деонице, нивои воде у зони пројектованог моста ће бити мало нижи.

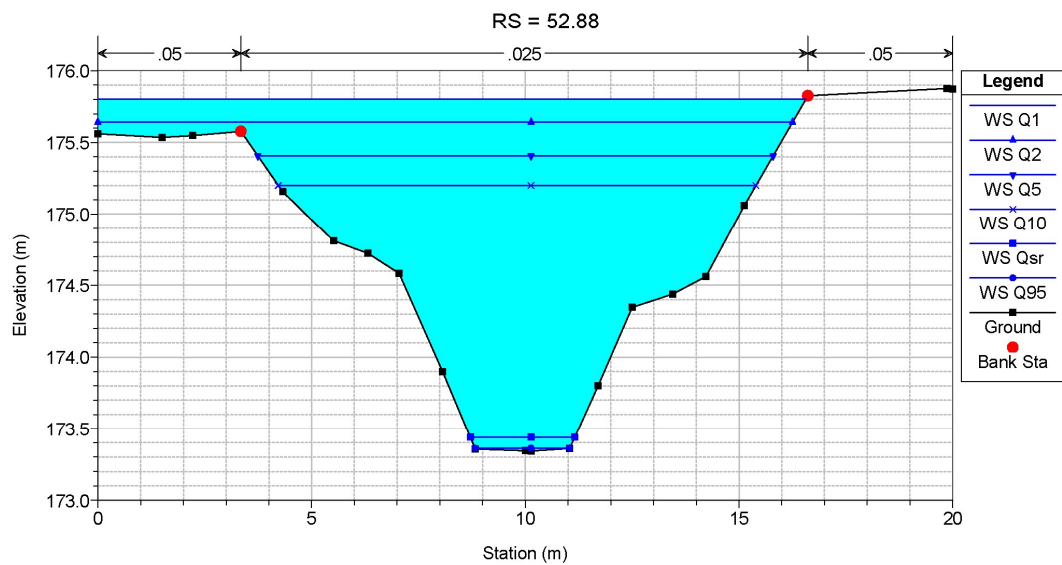
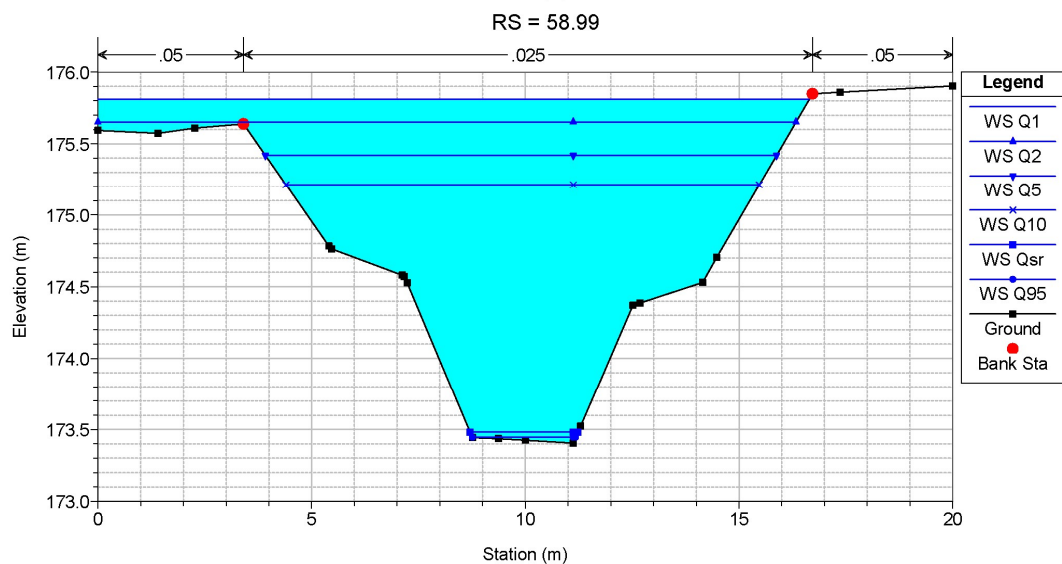
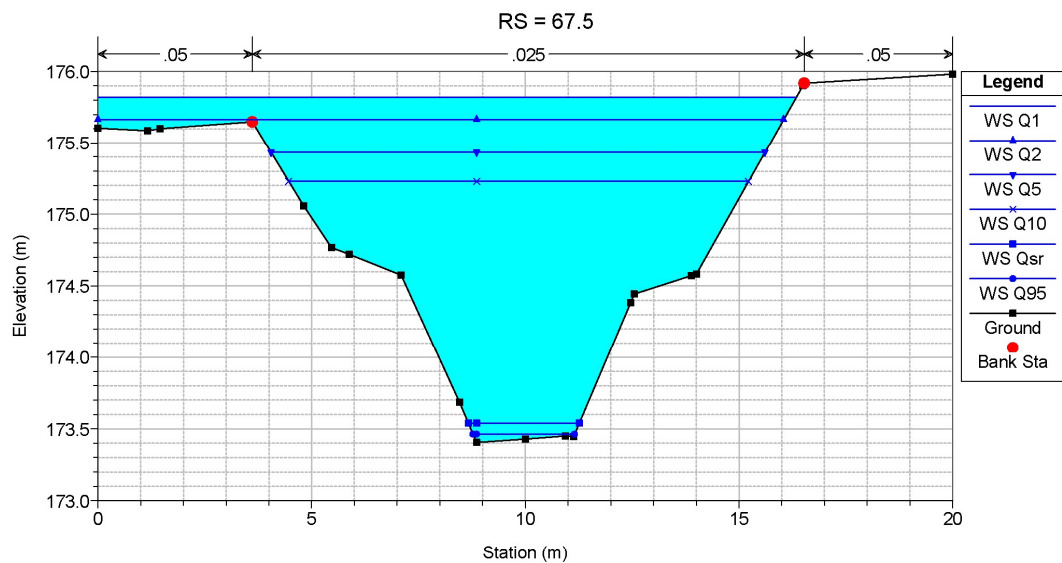
Напомиње се такође да је ова хидрауличка анализа урађена са основним циљем провере пропусности постојећег регулисаног корита реке Љубостиње у зони пројектованог цевног моста, али да није рачуната пропусност у зони мостова (који су бројни како узводно тако и низводно од разматраног профила) који могу негативно утицати на нивое великих вода.

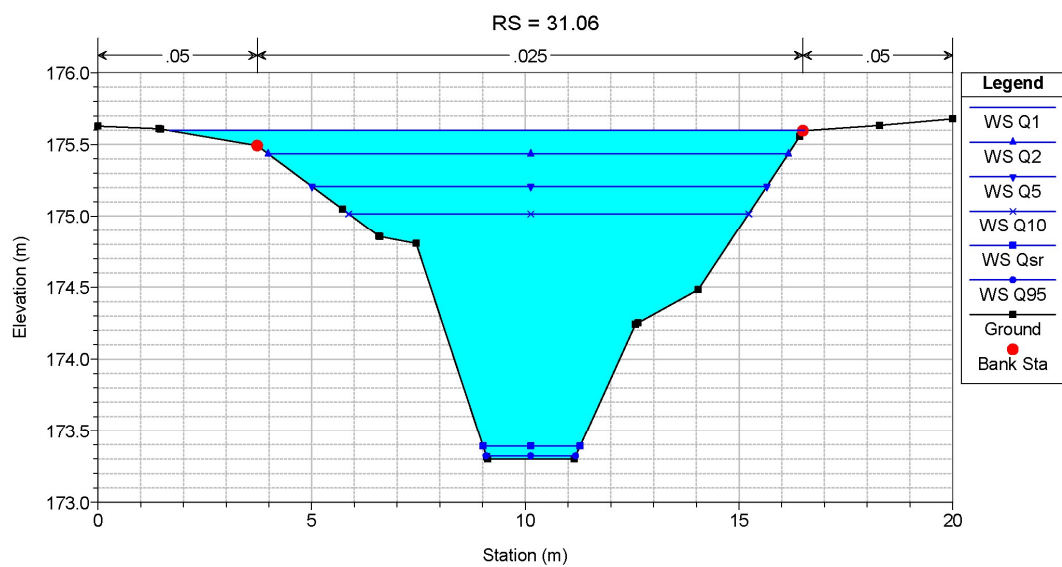
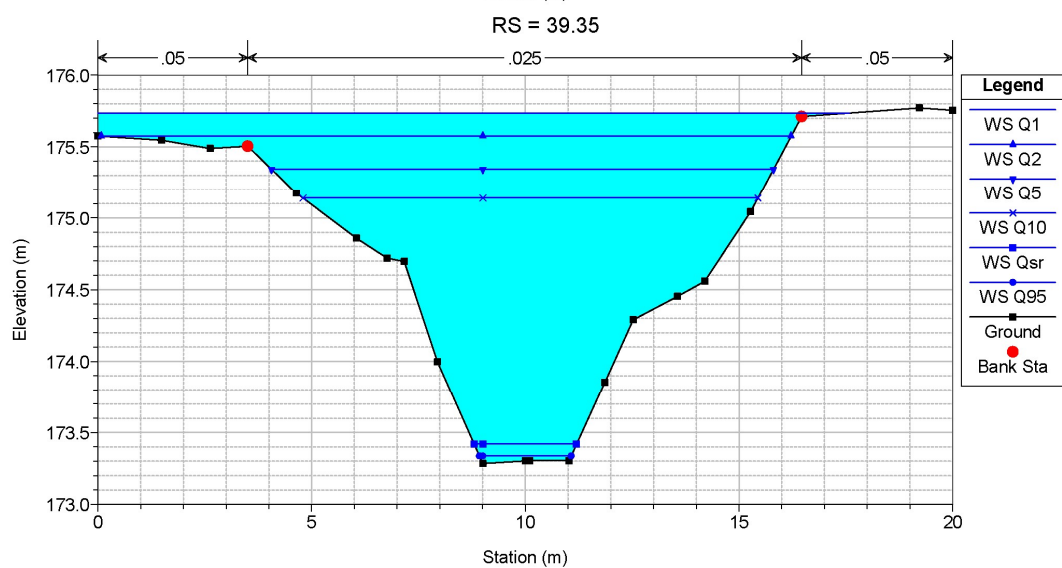
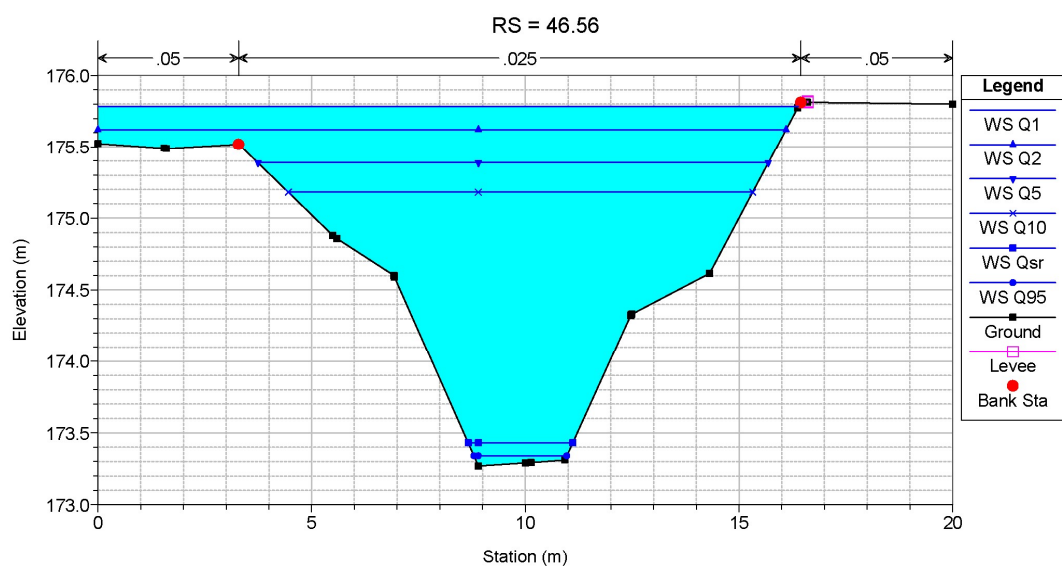
5.6. Прилози хидрауличке анализе

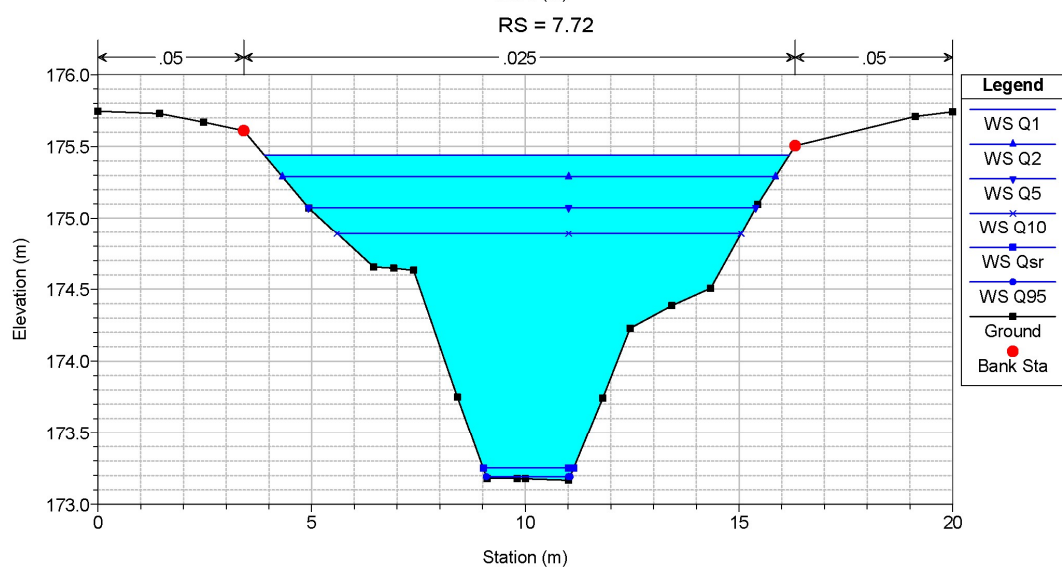
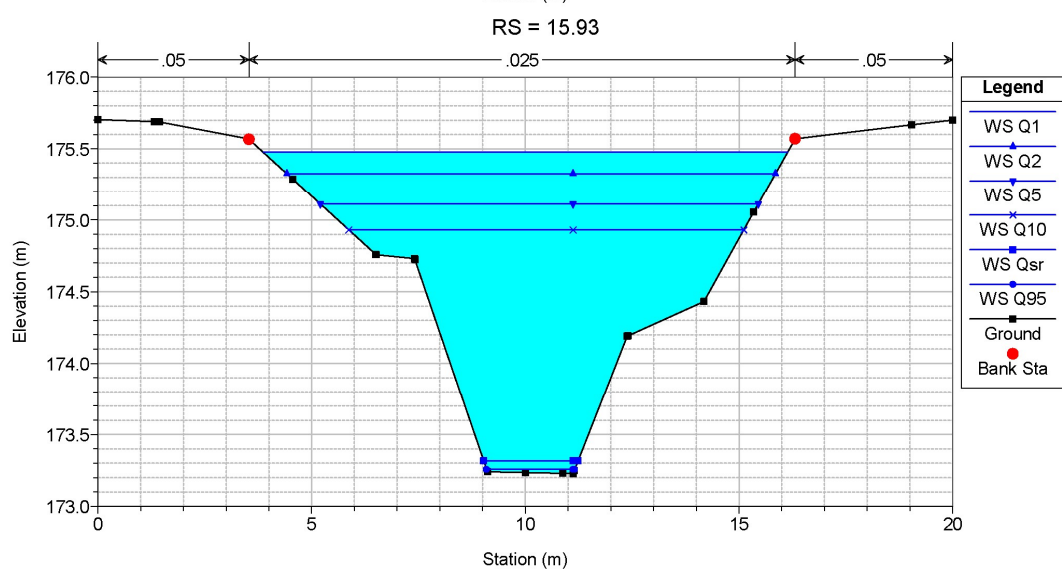
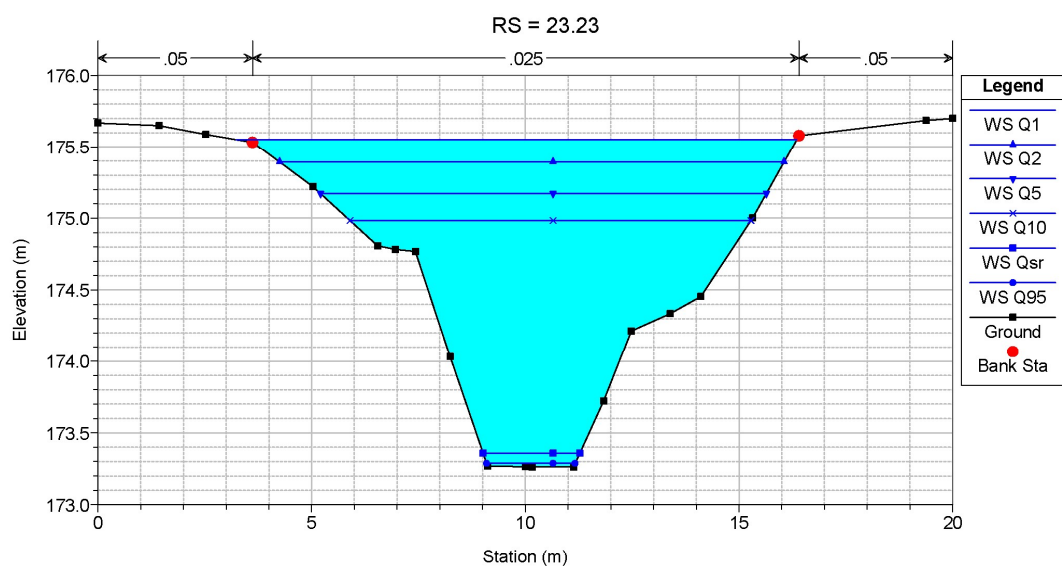
5.6.1. Подужни профил

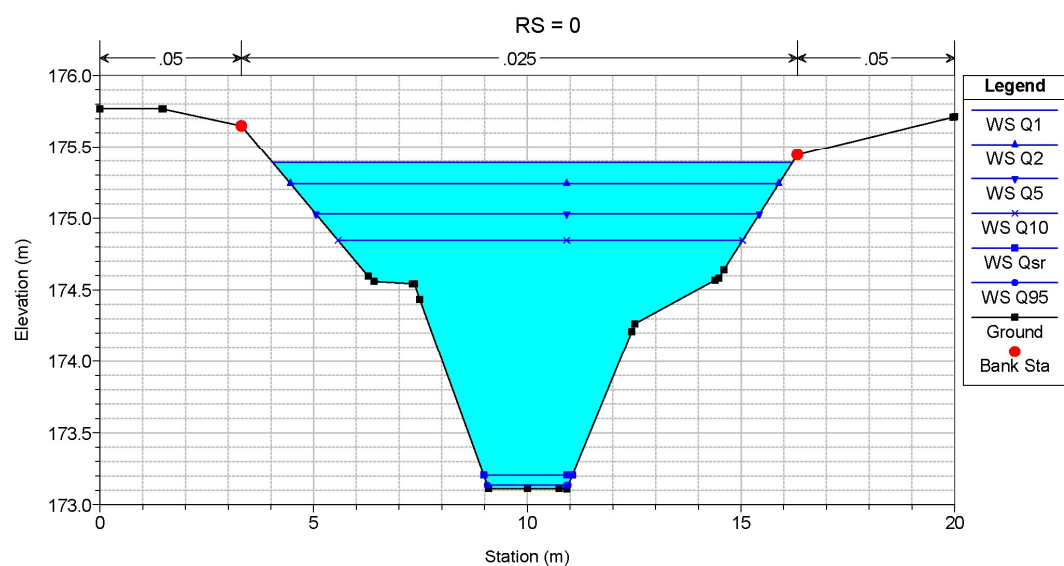


5.6.2. Попречни профили









5.6.3. Табеларни приказ резултата

Табела 17. Резултати хидрауличног прорачуна разматране деонице реке Љубостиње до разматраног профила

СТАЦ	Q	кота дна	ниво	кота линије енергије	нагиб линије енергије	средња брзина у кориту	површина протиц, профила	ширина воденог огледала	Фрудов број
(m)	(m³/s)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m²)	(m)	(-)
67.5	40.5	173.41	175.82	176.08	0.002363	2.28	18.4	16.3	0.62
67.5	33.8	173.41	175.66	175.90	0.002386	2.15	15.9	16.0	0.61
67.5	25.4	173.41	175.43	175.63	0.002331	1.96	12.9	11.6	0.59
67.5	19.3	173.41	175.23	175.40	0.002319	1.81	10.7	10.8	0.58
67.5	0.1	173.41	173.54	173.55	0.001794	0.37	0.3	2.6	0.36
67.5	0.0	173.41	173.46	173.46	0.000918	0.13	0.1	2.4	0.22
58.99	40.5	173.41	175.81	176.06	0.002238	2.21	18.9	16.6	0.60
58.99	33.8	173.41	175.65	175.88	0.002285	2.10	16.3	16.3	0.60
58.99	25.4	173.41	175.42	175.61	0.002248	1.92	13.2	12.0	0.58
58.99	19.3	173.41	175.21	175.37	0.002251	1.77	10.9	11.1	0.57
58.99	0.1	173.41	173.48	173.51	0.016928	0.74	0.1	2.5	1.01
58.99	0.0	173.41	173.44	173.45	0.006446	0.22	0.0	2.4	0.53
52.88	40.5	173.34	175.80	176.05	0.002170	2.19	19.2	16.6	0.59
52.88	33.8	173.34	175.64	175.86	0.002214	2.08	16.6	16.3	0.59
52.88	25.4	173.34	175.41	175.59	0.002214	1.91	13.3	12.1	0.58
52.88	19.3	173.34	175.20	175.36	0.002225	1.76	10.9	11.2	0.57
52.88	0.1	173.34	173.44	173.45	0.004465	0.50	0.2	2.4	0.56
52.88	0.0	173.34	173.36	173.37	0.039277	0.40	0.0	2.2	1.20
46.56	40.5	173.27	175.78	176.03	0.002234	2.22	19.0	16.4	0.60
46.56	33.8	173.27	175.62	175.85	0.002292	2.10	16.4	16.1	0.60
46.56	25.4	173.27	175.39	175.58	0.002312	1.94	13.1	11.9	0.59
46.56	19.3	173.27	175.18	175.34	0.002255	1.79	10.8	10.9	0.57
46.56	0.1	173.27	173.43	173.44	0.001019	0.32	0.3	2.4	0.28
46.56	0.0	173.27	173.34	173.34	0.000313	0.09	0.1	2.2	0.14
39.35	40.5	173.28	175.74	176.01	0.002584	2.33	18.0	17.6	0.64
39.35	33.8	173.28	175.58	175.83	0.002708	2.22	15.4	16.1	0.65
39.35	25.4	173.28	175.34	175.56	0.002749	2.05	12.4	11.7	0.64
39.35	19.3	173.28	175.14	175.32	0.002738	1.91	10.1	10.6	0.62
39.35	0.1	173.28	173.42	173.43	0.001725	0.38	0.3	2.4	0.36
39.35	0.0	173.28	173.34	173.34	0.000820	0.13	0.1	2.2	0.21
31.06	40.5	173.30	175.60	175.97	0.004225	2.72	15.0	14.9	0.80
31.06	33.8	173.30	175.44	175.79	0.004510	2.63	12.9	12.2	0.82
31.06	25.4	173.30	175.21	175.52	0.004540	2.47	10.3	10.6	0.80
31.06	19.3	173.30	175.02	175.29	0.004400	2.30	8.4	9.4	0.78
31.06	0.1	173.30	173.39	173.40	0.004480	0.51	0.2	2.3	0.56
31.06	0.0	173.30	173.32	173.33	0.004387	0.21	0.1	2.1	0.45

СТАЦ	Q	кота дна	ниво	кота линије енергије	нагиб линије енергије	средња брзина у кориту	површина протиц, профила	ширина воденог огледала	Фрудов број
(m)	(m³/s)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m²)	(m)	(-)
23.23	40.5	173.26	175.55	175.94	0.004444	2.76	14.7	13.1	0.82
23.23	33.8	173.26	175.39	175.75	0.004521	2.66	12.7	11.8	0.82
23.23	25.4	173.26	175.17	175.48	0.004452	2.47	10.3	10.4	0.80
23.23	19.3	173.26	174.98	175.25	0.004346	2.29	8.4	9.4	0.77
23.23	0.1	173.26	173.36	173.37	0.004125	0.50	0.2	2.3	0.54
23.23	0.0	173.26	173.29	173.29	0.004108	0.21	0.1	2.1	0.44
15.93	40.5	173.23	175.48	175.90	0.005020	2.90	14.0	12.3	0.87
15.93	33.8	173.23	175.33	175.72	0.005021	2.77	12.2	11.4	0.86
15.93	25.4	173.23	175.11	175.45	0.004958	2.57	9.9	10.3	0.83
15.93	19.3	173.23	174.93	175.22	0.004809	2.37	8.1	9.2	0.81
15.93	0.1	173.23	173.32	173.33	0.006475	0.58	0.2	2.2	0.66
15.93	0.0	173.23	173.26	173.26	0.004942	0.22	0.1	2.1	0.47
7.72	40.5	173.17	175.44	175.86	0.004850	2.87	14.1	12.3	0.85
7.72	33.8	173.17	175.29	175.67	0.004887	2.74	12.3	11.5	0.85
7.72	25.4	173.17	175.07	175.41	0.004951	2.55	10.0	10.5	0.83
7.72	19.3	173.17	174.89	175.18	0.004915	2.37	8.1	9.5	0.82
7.72	0.1	173.17	173.25	173.27	0.008668	0.64	0.2	2.1	0.76
7.72	0.0	173.17	173.19	173.20	0.013867	0.31	0.0	2.0	0.76
0	40.5	173.11	175.39	175.82	0.005001	2.91	13.9	12.2	0.87
0	33.8	173.11	175.24	175.63	0.005003	2.77	12.2	11.4	0.86
0	25.4	173.11	175.03	175.36	0.005003	2.57	9.9	10.4	0.84
0	19.3	173.11	174.85	175.13	0.005003	2.38	8.1	9.5	0.82
0	0.1	173.11	173.21	173.22	0.005000	0.55	0.2	2.1	0.59
0	0.0	173.11	173.14	173.14	0.005004	0.23	0.0	1.9	0.48

6. Литература

1. Soil Conservation Service (1985). National engineering handbook, Supplement A, Sect.4, Chapter 10. US Department of Agriculture (USDA), Washington, D.C.
2. Регулација река – Радови и грађевине, Миодраг Б. Јовановић, (2022), Грађевински Факултет, Београд
3. Јовановић С. (1989). Хидрологија Техничар 6, Грађевински приручник, ИРО "Грађевинска књига", Београд
4. Петковић Т., Прохаска С. (1990). Методе за прорачун великих вода, Део 2 - Проблеми вода на хидролошки неизученим профилима, Грађевински календар, Београд
5. Зеленхасић Е., Руски М. (1991). Инжењерска хидрологија, Београд
6. Плавшић Ј. (2001). Увод у хидрологију, Грађевински Факултет, Београд
7. Прелиминарна процена ризика од поплава за територију Републике Србије, (2019). Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд
8. Прохаска С., Ристић В. (2002). Хидрологија кроз теорију и праксу, Рударско-геолошки факултет, Београд
9. NRCS (2002). National Engineering Handbook: Part 630 Hydrology. USDA
10. Прохаска, С. (2003). Хидрологија 1 Рударско–геолошки факултет Универзитета у Београду; Институт за водопривреду „Јарослав Черни“; Републички хидрометеоролошки завод Србије
11. Ђукић В. (2005). Прорачун инфилтрације воде у незасићено земљиште, Шумарски факултет, Београд
12. Прохаска, С. (2008). Хидрологија 2, Рударско–геолошки факултет Универзитета у Београду
13. Водопривредна основа Србије, хидролошке подлоге (2009). Институт за водопривреду „Јарослав Черни“; Републички хидрометеоролошки завод Србије
14. Хидролошка анализа Љубостиње (2012), Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд
15. Прохаска С., Бартош Дивац В. (2014). Интезитети јаких киша у Србији Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд
16. План управљања водама за слив реке Дунав (Просечне вишегодишње вредности температура ваздуха, Просечне вишегодишње суме падавина, Хидрогеологија) (2014). Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд
17. Прохаска С., Бартош Дивац В., Илић А. (2020). Велике воде Србије на профилима хидролошких станица Институт за водопривреду „Јарослав Черни“, Београд
18. Регулација река 2 – речна хидраулика и морфологија, Миодраг Б. Јовановић, (2021), Грађевински Факултет, Београд
19. <https://a3.geosrbija.rs/>
20. Soil & Water Assessment Tool <https://swat.tamu.edu/>
21. Службени гласник града Ваљева година XLIII Број 1 Свеска 2 4. фебруар 2022.
22. <http://meteomanz.com/sy5?l=1&ind=13278&m1=12&y1=2023>
23. https://www.hidmet.gov.rs/latin/hidrologija/povrsinske_godisnjaci.php
24. https://www.hidmet.gov.rs/latin/meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php
25. European Climate Assessment & Dataset project <https://www.ecad.eu//dailydata/predefinedseries.php>
26. <https://www.kolubarske.rs/sr/vesti/valjevo/7702/>
27. ЈВП Србијаводе, Обавештење о непотпуности поднетог захтева за издавање водних услова, Број: 10262/5, 14.11.2022. године
28. Водни услови ЈВП Србијаводе за изградњу друмског моста на реци Љубостињи у Ваљеву на катастарским парцелама бр. 11384/1, 2755/3, 2884/2, 698/2 и 698/19 све у КО Ваљево, Број:11439/3, 27.12.2022
29. Максималне годишње дневне сума падавина на ГМС Ваљево - РХМЗ Србије по рачуну 168/04, ТАШ Група (предмет 925-2-59/2025)
30. Петровић Ј., 1996. Упоредна анализа максималних протицаја на малим рекама методама параметарске и статистичке хидрологије, Магистарски рад, Грађевински факултет Универзитета у Београду