

ОДНОС ХЕМИЈСКЕ И МЕХАНИЧКЕ ВОДНЕ ЕРОЗИЈЕ У СЛИВУ МЛАВЕ

ПРЕДРАГ МАНОЈЛОВИЋ^{1*}, САЊА МУСТАФИЋ¹, БЕН МЛАДЕНОВИЋ²

¹ *Универзитет у Београду – Географски факултет, Студентски трг 3/3, Београд, Србија*

² *Висока техничка школа струковних студија, Немањина 2, Пожаревац, Србија*

Сажетак: У хидролошкој 2001/2002. години анализирани су узорци воде у сливу Млаве на хидролошком профилу Братинац. На њеном најниводнијем хидролошком профилу, до профила Братинац, узорци воде узимани су на сваких 5 дана за утврђивање растворених минералних материја и савакодневно за утврђивање концентрације слита. Утврђено је да је током анализираних периода пронос хемијски растворених материја био 2 пута већи од проноса слита.

Кључне речи: хемијски растворен нанос, суспендовани нанос, Млава, Источна Србија.

Увод

Хемијски, суспендовани, нанос и вучени нанос представљају три интегрална типа речног наноса. У савременим геоморфолошким, а посебно у другим истраживачким областима који третирају речни нанос (хидрологија, геологија, земљиште, инжењерске струке), највећа пажња посвећена је суспендованом наносу. Релативно мало радова у свету и Србији третира истовремено све три компоненте речног наноса. Прва истраживања која су за циљ имала утврђивање односа између проноса хемијски раствореног и суспендованог наноса на простору Србије вршена су у сливовима Тимока и Црнице (Манојловић П., Живковић Љ., 1991, Манојловић П., 1993), потом у сливовима Колубаре (Драгићевић С., 2002, 2009), Млаве (Младеновић Б., 2006) и Темштице (Мустафић С., 2006), а једина истраживања која су обухватила компаративну анализу сва три типа речног наноса вршена су у сливу Колубаре (Драгићевић С., 2002).

Који ће од наведених типова наноса доминирати зависи од локалних фактора средине. Према Chakrapani G.J. (Chakrapani G.J 2005, Chakrapani, G.J., Subramanian V., 1990) фактори који у највећој мери контролишу пронос суспендованог наноса су падавине, отицај и литолошки састав. На интензитет хемијске ерозије 89 % утиче водност, али се као значајни фактори или модификатори истичу тип стена, земљиште и клима (Манојловић П., 1992). Међутим, и други фактори имају мањи или већи значај на интензитет проноса речног наноса, укључујући локалну топографију терена, вегетациони покривач, начин коришћења земљишта, климатске промене и сл. Новија

*E-mail: peca@gef.bg.ac.rs

Овај рад је реализован у оквиру пројекта „Истраживање климатских промена на животну средину: праћење отицаја, адаптација и ублажавања“ (43007), подпројекта бр. 9: „Учесталост бујичних поплава, деградација земљишта и вода као последица глобалних промена“, који финансира Министарство за просвету и науку Републике Србије у оквиру програма Интегрисаних и интердисциплинарних истраживања за период 2011-2014. године.

истраживања указују на све већи утицај човека. Утицај људских активности, укључујући сечу шума, промене у начину коршћења земљишта, прављење земљаних тераса и сл., оставио је снажне последице на речне системе у медитеранском региону Европе (Hooke J.M., 2005). Такође, крчење природне вегетације и промена у начину коришћења земљишта или конверација земљишта утицале су на промене и проносу седиментног наноса широм света (Walling D.E., Fang D., 2003). Walling (Walling D.E., 2006) указује на смањење проноса наноса у неким рекама која је директна последица утицаја човека у смислу изградње водних акумулација (reservoir construction). Управо од наведених фактора средине зависи колики је удео одређеног типа наноса у њиховој укупној суми. Мањи удео суспендованог наноса у односу на хемијски може бити последица утицаја човека. Тако је у сливу реке Ебро изградња брана играла велику улогу у регулисању проноса суспендованог наноса. Са вредношћу од 69-93 t/km²/год, у односу на 1,2-5,1 t/km²/год хемијски нанос доминира у сливу ове реке (Negrel P. at all., 2007). Удео хемијског наноса може да варира од 30- 90 % (Tosiani T. at all), али да у укупној суми чини само 14,2 %, док суспендованом припада 85,7 % (Singh O. at all, 2008). Сасвим супротно, у планинским пределима вучени нанос издваја се као доминантан са учешћем од 50 %, док на суспендовани и хемијски одлази 35 %, односно 15 % (Schiefer E at all., 2010).

Слив Млаве је по многим својим, пре свега физичко-географским карактеристикама специфичан. Специфичност се огледа у геолошком саставу терена и водности слива, а нарочито хидролошким условима истраживачког периода. За слив Млаве генерално карактеристична је доминација малих вода (Никић З., 2003). Међутим, проучавана хидролошка година је нетипична са изразито повећаним отицајем у јуну и августу, а испод просечним отицајем у периоду од фебруара до маја. Заправо, највеће бујичне поплаве у сливу Млаве, и једна од највећих и у целој Србији, у првој деценији XXI века биле су у месецу јуну 2002. године (Милановић А., Урошев М., Милијашевић Д., 2010). Управо комбинација петролошког састава слива и хидролошке специфичности током опсервацијаког периода пројужају могућност утврђивања односа између хемијске и механичке водне ерозије, односно утврђивања доминантних фактора и услова који детерминишу однос између ова два типа речног наноса.

Географски положај слива Млаве

Слив Млаве налази се у северозападном делу Источне Србије и захвата површину од 1830 km². Настаје од Жагубичког врела или врела Млаве које избија у крајњем југоисточном делу Жагубичке котлине испод северних падина Бељанице на 314 m n.v. То је једна од дужих река Источне Србије, која се после тока од 120 km улива у Дунав. Најнизводнији хидрометријски профил налази се код села Братинац, источно од Пожаревца. До тог проф ила Млава захвата површину од 1749 km². Од притока су најзначајније Тисница, Крупаја, Јошаничка, Велика, Каменичка река и Витовница.

Најисточнија тачка слива налази на Хомољским планинама (Црни Врх) 21° 50' ИГД. Најзападнија тачка слива Млаве се налази на 21° 10' ИГД на Дунаву код Рама. Растојање између најзападније и најисточније тачке износи 65 km. Најсевернија тачка слива налази се код Рама на Дунаву на 44° 48' СГШ. Најјужнија тачка слива Млаве налази се на Бељаници - В. Треста, на 44° 05' СГШ. Растојање између најсеверније и најјужније тачке, односно у правцу север-југ, износи 81 km. Највише тачке у сливу су врх Бељаница 1336 m и Црни Врх 1037 m, а најнижа је код Рама на Дунаву 67 m. У регионалном погледу цео слив састоји се од три целине: Хомоље, Горња Млава и Стиг.

Методологија истраживања

На формирање рељефа у сливу Млаве доминантна је флувијална ерозија. У оквиру ње посебно се истиче пронос хемијски растворених материја и транспорт суспендованог материјала. У циљу утврђивања интензитета флувијале ерозије током хидролошке 2001/2002. године, узимани су узорци воде на најнизводнијем хидролошком профилу-Братинцу на сваких 5 дана за потребе утврђивања растворених минералних материја и свакодневно за утврђивање концентрација силта. Узорци су прво филтрирани, како би се одвојила течна од чврсте фазе. Филтрација је вршена вакум-пумпом са подпритиском од свега 20 mm воденог стуба. Коришћен је филтер папир Ватман, средње величине пора, који је пре и после филтрације сушен у сушионици, а затим стабилизован у ексикатору. Мерење тежине папира пре и после филтрације вршено је на дигиталној ваги, са прецизношћу од 0,1 mg.

Хемијски састав воде утврђиван је класичним поступцима аналитичке неорганске хемије у Лабораторији физичке географије Географског факултета у Београду. Утврђиване су концентрације макро-јона, тј. Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , SiO_2 , као и температура, рН и специфична електрична проводљивост. За одређивање концентрација претходно наведених макроелемената коришћене су следеће аналитичке методе: за одређивање концентрације калцијумовог, магнезијумовог и гидрокарбонатног јона коришћена је волуметријска метода; за одређивање концентрације натријумовог, калијумовог и хлоридног јона коришћена је потенциометријска метода са одговарајућим јон-селективним електродама (Cole-Parmer Potassium Ion Electrodes); за одређивање концентрације сулфата и силиката коришћена је спектрофотометријска метода

Независно од анализираних узорака вода, одређен је и пронос хемијски растворених минералних материја, као и силта за читаву хидролошку годину. Одговарајућим математичко-статистичким методама израчунат је нумерички модел транспорта наноса на основу расположивих података, тј. концентрације хемијски раствореног материјала, силта и протицаја. Његовом применом израчунат је пронос наведених типова наноса и за оне дане када узорци нису узимани. На тај начин добијени су релевантни свакодневни подаци о проносу растворених минералних материја и силта за цео истраживачки период.

Геолошки састав терена

У горњем делу слива, тачније до врела Млаве доминирају кречњаци Бељанице. Са десне стране Млава прима Тисницу, чији је слив једним делом усечен у кречњаке, а другим делом у кредни флиш и магматите. Највећи део Жагубичке котлине прекривен је неогеним седиментима, који су неотпорни на ерозију, како хемијску тако и механичку. У ширем простору Горњачке клисуре терен је изграђен од премских црвених пешчара, кредног флиша и андезита крепољинске зоне. У сливу Крупајске реке, поред кречњака, доминирају црвени пешчари. Низводно од Горњачке клисуре слив је изграђен од неогених седимената, представљеним пешчарима, глинама и глиновитим лапорцима.

Климатске карактеристике слива

На основу издвојених средњих дневних температура ваздуха у појединим месецима, сезонама и у току године, установљено је да је средња вишегодишња температура ваздуха 10,9 °C. Најхладнији месец је јануар, са средњом температуром од -0,1 °C, а најтоплији јул са 21,2 °C. Међутим, маритимни утицај огледа се у

тенденцији померања минимума на фебруар и максимума на август, као и томе да је јесен топлија од пролећа за 1°C. (Mladenović B., 2006). Висински температурни градијент на профилу Петровац-Црни врх износи 0,54 °C/100 m (Živković N., 2005).

С обзиром на географски положај, тј. одређени степен континенталности и орографских специфичности, слив Млаве припада умерено-континенталном поднебљу. Средња годишња висина падавина износи нешто више од 702 mm. Оне су тако распоређене да се плувиометријски режим одликује једним јасно израженим максимумом падавина почетком лета у јуну, и два минимума падавина, примарни у октобру, а секундарни у фебруару (Mladenović B., 2006). Висински градијент падавина различит је на простору слива. У доњем делу слива износи 54 mm/100 m, а у рејону средњег и горњег дела слива, тј. на профилу Горњак-Црни Врх преко 60 mm/100 m (Živković N., 2004)

У хидролошкој 2001/2002. години количина падавина, са просеком у целом сливу, била је 743,7 mm, дакле више од вишегодишњег просека. Међутим, неке станице су добиле изузетно велику количину падавина. Тако, Крепољин је примио 971,2 mm падавина. Мала количина падавина забележена је током зимских месеци (децембар, јануар и фебруар), што значи да је количина снега, па тиме и зимска ретенца била мала. Током пролећа била је у границама просека. Оно што ову годину издваја је велика кличина падавина током јуна 2002. године. Тада је средњи и низводни део слива добио изузетно велику количину падавина, која је била концентрисана на месец јун. Због тога су и протицаји тог месеца били веома велики, па је на појединим местима дошло и до поплава. Док је у мају пало 57,7 mm а у јулу 82,6 mm, током јуна у сливу је просечно доспело 122,1 mm.

То је било условљено продором циклона са северозапада. Како је планинска пречага Хомољских планина представљала препреку њиховом даљем кретању ка истоку, то се у централном делу слива излучила велика количина падавина. Станице које се налазе источно од поменутог планинског низа, па чак и Црни Врх, са највећом висином у сливу, нису примиле толику количину падавина.

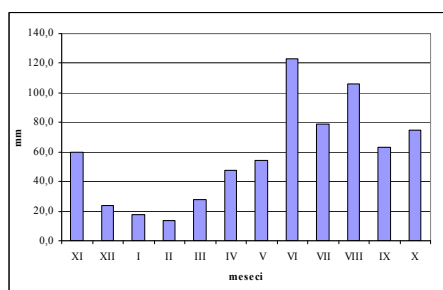


График 1. Средња количина падавина у сливу Млаве током јуна 202. године

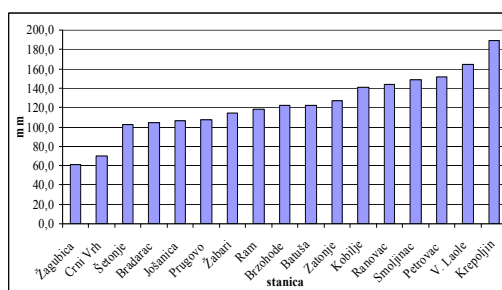


График 2. Количина падавина (mm) хидролошке 2001/2002. године.

С друге стране поједине метеоролошке станице које се налазе у централном делу слива примиле су екстремно велике количине падавина. Чак 6 станица добило је више од 140 mm падавина, да би околина Великог Лаола и Крепољина примиле и више од 160 mm падавина (Крепољин, 189,0 mm).

Посматрано по дневним вредностима, у Крепољину је током три дана у јуну (10,11,12) пало 40,2, 75,3 и 38,6 mm падавина респективно, што сумарно износи 154,1 mm. Слична ситуација је била и на осталим профилима у низводном делу слива.

Хидролошке карактеристике слива

Просечни 20-то годишњи протицај Млаве на профилу Братинац износи $10,3 \text{ m}^3/\text{s}$, док је у анализираној години он био $7,96 \text{ m}^3/\text{s}$. Карактеристика слива Млаве, генерално, је доминација малих вода. За део слива до врела Млаве, с обзиром на пукотински карактер издани, мале воде дефинисане су са вредношћу до $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$, док су за доњи сектор (профил Рашанац) мале воде дефинисане протицајем од $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (Никић З., 2003). Како је проучавана хидролошка година нетипична и изузетно влажна, са изразито повећаним протицајима, то је удео малих вода знатно нижи од вишегодишњег просека.

На профилу Бартинац средњи годишњи протицај износи $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$, којем одговара специфични отицај од $4,55 \text{ l/s/km}^2$. Минималне средњемесечне воде јавиле су се у септембру ($Q=4,06 \text{ m}^3/\text{s}$; $q=2,32 \text{ l/s/km}^2$) и јулу ($Q=4,15 \text{ m}^3/\text{s}$; $q=2,37 \text{ l/s/km}^2$), а максималне током летњег поводања у јуну месецу ($Q=22,3 \text{ m}^3/\text{s}$; $q=12,75 \text{ l/s/km}^2$). Однос између средњих месечних протицаја је 1:5,5. Максималан дневни протицај износио је $151,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (јун), а минималан $1,86 \text{ m}^3/\text{s}$ (август), тако да они стоје у односу 1:81.

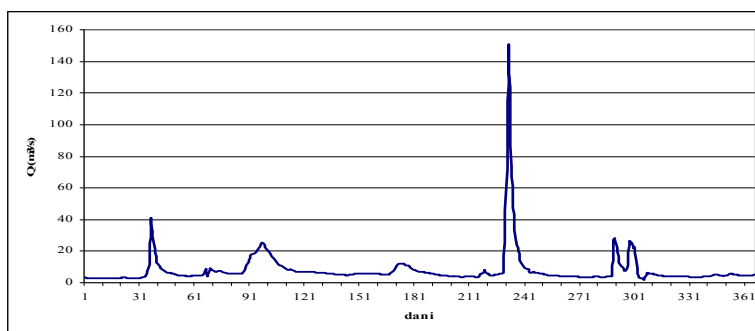


График 3. Хидрограф Млаве хидролошке 2001/2002. године.

Карактеристика хидролошке 2001/2002. године да највећи део године доминирају протицаји са медијалном вредношћу од $5,3 \text{ m}^3/\text{s}$ и четири изразита поводања. Сходно метеоролошким приликама они су се јавили крајем новембра и почетком децембра (29.11.-05.12.2001.) са средњим Q од $20,3 \text{ m}^3/\text{s}$ ($q=11,6 \text{ l/s/km}^2$). Други поводањ јавио се крајем јануара и почетком фебруара у трајању од 21 дан, са средњом вредношћу Q од $17,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ($q=9,8 \text{ l/s/km}^2$). Најизразитији поводањ десио се у складу са падавинама од 11-21. јуна 2002. године. Средњи Q износио је $50,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ($q=28,6 \text{ l/s/km}^2$). Унутар овог периода два дана су била са изразито високим отицајем од $100 \text{ m}^3/\text{s}$ и $151 \text{ m}^3/\text{s}$, што су и највећи протицаји у овој хидролошкој години. Последњи поводањ десио се од 09-21. августа 2002. године. У суштини то су била два мања поводања раздвојена са три дана. Средњи протицај овог периода износио је $17,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ($q=10,1 \text{ l/s/km}^2$). Зимски максимум протицаја условљен је знатном количином падавина и релативно високим температурама за ово доба године. Пролећни максимум условљен је примарним максимумом падавина, а летњи пљусковитим кишама.

Физичко-хемијске карактеристике анализираних узорак вода

Средња укупна минерализација анализираних текућих вода износи $399,1 \text{ mg/l}$, а креће се у распону $220,1 \text{ mg/l}$ до $476,2 \text{ mg/l}$. У укупној структури

минерализације доминантни катјони су Ca^{2+} (82,0 %) и Mg^{2+} (9,6 %), а потом Na^+ и K^+ са укупно 8,3 %. Од анијона доминира HCO_3^- са 89,2 %, док су SO_4^{2-} и Cl^- скоро подједнако заступљени са 4,9 %, односно 5,9 %. Дакле, воде слива Млаве припадају калцијумско-хидрокарбонатном типу вода средње минерализације. Овај, најнизводнији профил карактерише повећана променљивост температуре воде, као и благо повећана рН вредност од 7,8, која варира у распону од 7,5 до 8,2. У складу са повишеним рН вредности и концентрацијама Ca^{2+} и HCO_3^- јона је целогодишња инкрустивна вредност воде ($\text{SIc}=0.5$).

Средња годишња концентрација суспендованог материјала у води Млаве износила је 58,3 mg/l. У време малих вода била је готово занемарљива, јер је концентрација износила свега 2,5 mg/l. С друге стране, у време високих вода концентрација силта знатно је превазилазила концентрацију хемијски растворених материја и износила је чак 842,0 mg/l.

Односи између екстремних вредности концентрација РММ и силта су веома различити. За РММ однос екстрема је 1:2,2, а за силт 1:336,8. То упућује на малу варијабилност концентрације РММ3а ($\text{Cv}=9,9$). За разлику од коефицијента варијабилности укупне минерализације варијабилност концентрације силта је далеко већа ($\text{Cv}=165,9$). То значи да је на променљивост концентрације силта утицај водности далеко већи, и да тај тип ерозије има ексцесивни карактер. Услед велике варијабилности наведених концентрација знатно је упутније користити неку другу меру дисперзије, а то је медијана. Вредност медијане за силт износи 33,8 mg/l, а за хемијски растворени нанос 404,9 mg/l. Дакле, по питању концентрације на годишњем нивоу, суви остатак вишеструко доминира над суспендованим мартеријалом.

Однос протицаја и концентрација РММ и суспендованог наноса

У складу са опште прихваћеним моделом односа ТДС и концентрације силта с једне, и протицаја с друге стране, те варијабле приказане су графички кроз њихов регресиони модел. Однос ТДС и протицаја је антиподан, тј. што су протицаји већи то су концентрације макро јона ниже. Тај однос најбоље описује двоструко логаритамски модел облика $\log(Y)=a+b\log(X)$ који је у случају Млаве трансформисан у једнострано логаритамски модел. Коефицијент детерминације је високо значајан с обзиром на вредност од 0,78.

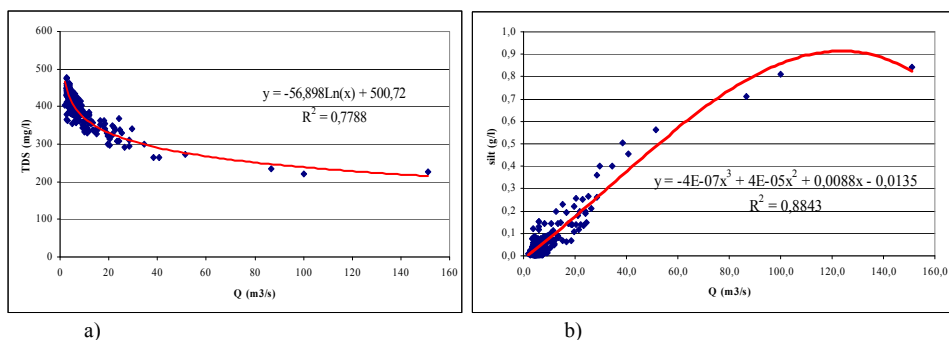


График 4. Однос између протицаја и концентрације РММ (а) и протицаја и концентрације силта (б)

У случају односа концентрације силта и протицаја тај однос је у сагласности – што су протицаји већи запажа се и повећање концентрације силта, али не у линеарном односу. У случају комплексног геолошког састава и протицаја као најприкладнији показала се полиномијална регресија трећег степена која у

аналитичком облику гласи $Y=a+b_1X+b_2X^2+b_3X^3$. Повезаност ових варијабли је одређена коефицијентом детерминације од 0,88.

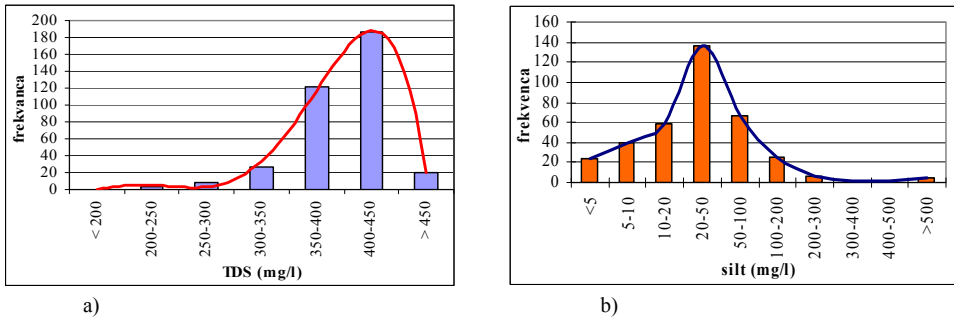


График 5. Дистрибуција фреквенци концентрације ТДС (а) и концентрације силта (б).

Иако је аритметичка средина укупне минерализације 399 mg/l, из приложеног графика очигледно је да се највећи број података ($n=186$) налази у класи 400-450 mg/l. Расподела података нагиње f -расподели са јаком асиметријом на десно. С друге стране, расподела фраквенци концентрације силта приближнија је нормалној. Доминантна класа је 20-50 mg-l, са 136 података.

Дистрибуција проноса хемијског и суспендованог наноса према класама протицаја

Млава је из слива изнела укупно 136826 t материјала, од тога 46701,6 t припада суспендованом наносу, али и готово 2 пута више (90124,2 t) хемијски раствореном наносу. У односу на површину слива то даје специфичну ерозију од 26,7 t/km²/god за суспендовани нанос, односно 51,5 t/km²/god респективно за хемијски нанос. Са повећавањем протицаја повећава се и пронос наноса, али проценат повећања проноса силта и растворених минералних материја није једнак. То је, наравно, резултат приказаног односа протицаја и датих концентрација. У највећем делу године пронос растворених материја већи је од проноса силта. То једино није случај у време максималних поводња, када је концентрација силта била изузетно висока (842 mg/l), а хемијски растворених материја екстремно ниска (227 mg/l).

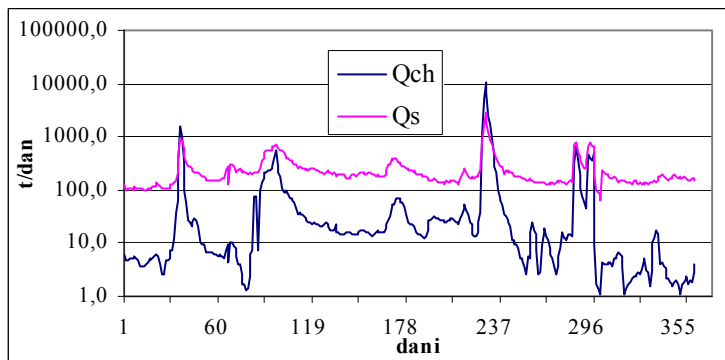


График 6. Годишња расподела проноса хемијског (Q_{ch}) и суспендованог наноса (Q_s).

Утврђивањем односа хемијске и механичке водне ерозије према водности, протицаји су сврстани у 7 класа. Пренос силта закључно са класом протицаја до $20 \text{ m}^3/\text{s}$ је готово безначајан (19,3 %), али зато последње две класе високих вода, чине 80,7 % целогодишњег преноса тог материјала. Сасвим је обрнуто са преносом растворених материја, када је у распону протицаја $20 \text{ m}^3/\text{s}$ изнето из слива 76,4 % материјала, а у највишим класама протицаја знатно мање, тј. 23,6 % годишње суме преноса РММ. С друге стране, из табеле се може сагледати да је пренос хемијски растворених материја уједначенији у односу на пренос силта по свим класама протицаја.

Детаљнији увид у расподелу учешћа преноса растворених минералних материја и силта по класама протицаја може се сагледати на основу збирне суме преноса ова два типа речног наноса. Ови односи омогућавају утврђивање који тип наноса доминира у зависности од количине отицајне воде. Посматрано по класама удео хемијске ерозије поступно опада од 25:1 за најниже класе Q мање од $3 \text{ m}^3/\text{s}$ и до односа 1,1:1 у класи Q 20,01-50,0 m^3/s . Тек у класи већој од $50 \text{ m}^3/\text{s}$ хемијска ерозија чини мањи удео укупне суме наноса. Конкретно 23,3 % припада хемијском, а 76,7 % преносу силта.

Табела 1. Дистрибуција преноса хемијског (Q_{ch}) и суспендованог наноса (Q_s) према класама протицаја (Q).

klasa Q (m^3/s)	n	% Q	Q_{ch} (t)	Q_s (t)	% годишње ΣQ_{ch}	% годишње ΣQ_s	$\Sigma Q_{ch} + Q_s$ (t) za klase Q	% Q_{ch}	% Q_s	Q_{ch} / Q_s
< 3,0	25	6,8	2563,5	102,3	2,8	0,2	2665,9	96,2	3,8	25,0
3,01-5,0	135	37,7	20528,6	1426,0	22,8	3,1	21954,6	93,5	6,5	14,4
5,01-7,0	106	29,0	21295,8	1850,4	23,6	4,0	23146,1	92,0	8,0	11,5
7,01-10,0	40	10,9	10542,6	1338,8	11,7	2,9	11881,4	88,7	11,3	7,9
10,01-20,0	34	9,3	13926,1	4306,6	15,5	9,2	18232,8	76,4	23,6	3,2
20,01-50,0	19	5,2	13438,6	11859,5	14,9	25,4	25298,1	53,1	46,9	1,1
> 50,0	4	1,1	7829,0	25818,0	8,7	55,3	33647,0	23,3	76,7	0,3
Σ	366		90124,2	46701,6	100	100	136825,8	65,9	34,1	1,9

График који боље од табеларних података показује однос између протицаја и интензитета механичке и хемијске ерозије приказан је на графiku 7. Пренос силта одговара експоненцијалној криви, док се пренос хемијски растворених материја подвргава полиномијалној регресији трећег степена. То је потпуно у супротности са односом одговарајућих концентрација и протицаја. Концентрација РММ према протицају дефинисана је логаритамском регресијом, а концентрација силта и протицаја полиномијалном регресијом трећег степена.

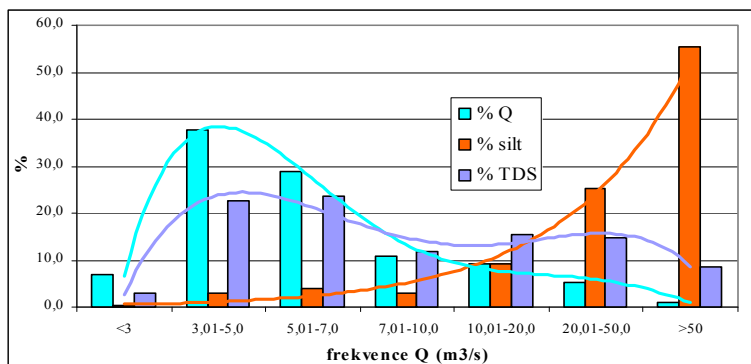


График 7. Процентуални удео протицаја, преноса хемијског и суспендованог наноса

за дате класе Q.

Регресиони модел за пронос хемијског наноса по класама Q:

$$y(Q_{ch}) = -0,6541x^4 + 11,756x^3 - 73,429x^2 + 177,94x - 108,59 ; R^2 = 0,98$$

Регресиони модел за пронос суспендованог наноса по класама Q:

$$y(Q_s) = 0,2337e^{0,774x} ; R^2 = 0,86$$

Откуд то да су регресије промениле тип? Одговор је у протицају, односно његовој расподели на дате класе. Тачан увид у однос између проноса хемијског и суспендованог наноса може се сагледати само преко њихове расподеле у одговарајућим класама протицаја.

У садејству са одговарајућим класама протицаја, однос између хемијске и механичке водне ерозије је потпуно различито дистрибуиран.

Код хемијског наноса његова доминација у одговарајућим класама протицаја дефинисана је полиноминалном регресијом. То значи да са повећањем водности учесталост проноса РММ прво расте до класе Q од 5 m³/s, а затим непрекидно опада са тенденцом достизања асимптоте за највише класе протицаја. С друге стране, са повећавањем водности учесталост проноса суспендованог наноса има непрекидни узлазни тренд.

Ефекат хистерезис петље

Компарацијом података о концентрацијама суспендованог наноса и протицаја може се утврдити како су концентрације наноса дистрибуиране у односу на протицај. Један од показатеља везе између концентрације силта и протицаја је утврђивање постајања хистерезис петље. Идентификација различитих типова хистерезис кругова веома је значајна, јер указују на близину локације извора седимената, као и на доминантне факторе који активирају седиментациони извор. То значи да различити облици хистерезис петљи, заправо, указују на доминантне факторе услова процеса отицања, који има за последицу транспорт денудационог материјала до речних токова. Који ће облик крива да покаже зависи од многих фактора срдине. Поред падавина и извора седиментног материјала, облик петље може да контролише и величина слива (Zabaleta A., et al., 2007; Soler M., Latron J., Gallart F. 2008), али у највећој мери влажност земљишта (Klein, M., 1984).

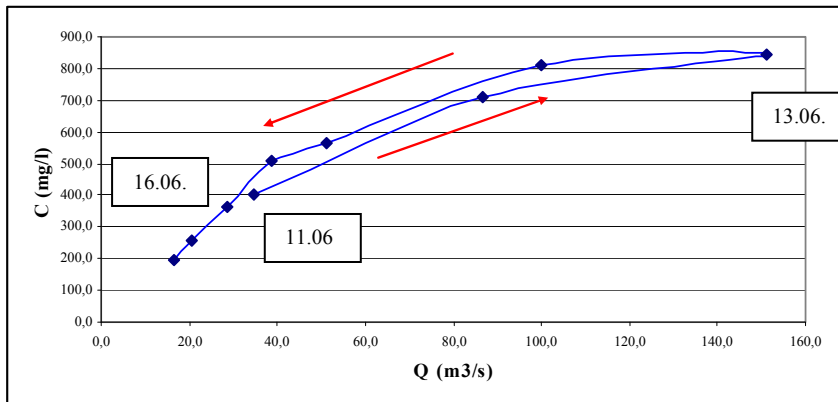


График 8. Хистерезис петља за период 11-19.06.2002. године.

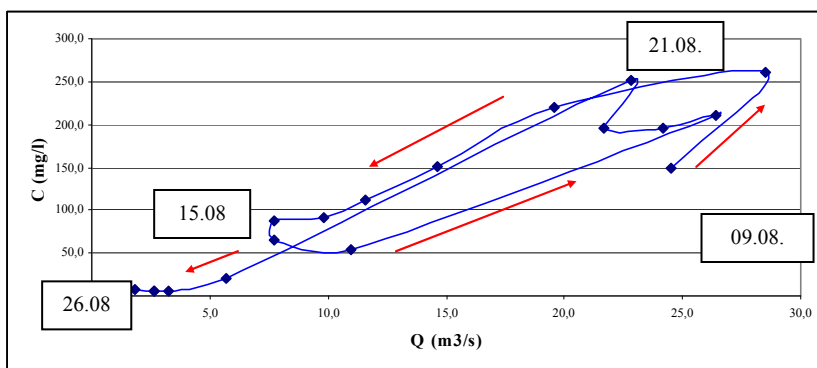


График 9. Двострука хистерезис петља за период 09-26.08.2002. године.

Како су концентрације суспендованог наноса релативно мале током већег дела истраживачког периода, утврђивање постојања одређеног типа хистерезис петље биће разматрано у два периода, односно за време трајања јунског и августовског поплавног таласа. Од пет врста петљи (Williams, G.P., 1989) за ова два периода констативана је само једна, а то је *хистерезис петља супротног смера казальке на сату*.

Ова крива типична је за услове када је земљиште презасићено влагом на ширем простору слива, што доприноси транспорту наноса са ширег подручја. Под утицајем изузетно високих падавина долази до презасићености земљишта влагом, чиме је подстакнуто интензивно отицање независно од топографских катактеристика терена (Seeger M. et al., 2004).

У условима када је седиментни флуks пореклом је из ерозивног подручја које је на већој удаљеност од мерне станице, што значи да су седиментни услови инкорпорирани на простору целог слива, поплаве трају дуже. Овакав случај је управо био за време јунског и августовског поплавног таласа. Јунски поплазни талас трајао је 11 дана, а августовски 13 дана. Како се на оба приложена графика може видети, *високе концентрације силта јављају се после појаве највећег протицаја*. Оваква расподела концентрација суспендованог наноса према вредностима протицаја показује да је *путовање седимената до речног тока дуго и да се седименти транспортују из области које су од њега далеко*. Другим речима, интензивно отицање било је присутно на површини целог слива, што је условило интензиван флувио-денудациони процес, који је резултирао повећаним концентрацијама силта у речном току, а самим тим великим проносом суспендованог наноса.

Временска расподела проноса хемијског и суспендованог наноса

Далеко значајнији податак о односу хемијске и механичке ерозије добија се када се сагледају криве односа кумулативног процента времена и кумулативног обима еродованог материјала и количине отицајне воде. Како је концентрација хемијски раствореног материјала виша од просечне концентрације силта, то не чуди што је Млава за 50 % времена из слива изнела 30 % годишње количине хемијског наноса материјала. За исто време из слива је изнето свега 2,5 % суспендованог наноса. Овим вредностима годишње расподеле наноса одговара 25 % вредности годишњег отицаја. Постојаност, односно мала варијабилност концентрације сувог остатка, огледа се и у малој закривљености криве. Како је механичка водна ерозија ексцесивна, у почетку нагиб њене криве проноса је малог нагиба, али касније, са драстичним повећавањем

протицаја у односу на остали, највећи део године, вртоглаво расте. Из тог разлога, за последњих 10 % времена из слива је изнето 86 % суспендованог наноса а хемијског свега 30 %.

За време 4 поменути поводња, која су трајала 14,2 % годишњег времена, протекло је 44 % воде, а изнето је укупно 53,2 % сумарног наноса. са аспекта појединачног удела оба типа речног наноса, за овај временски период пронето је 34,4 % годишње суме хемијског наноса, а 89,4 % годишње суме суспендованог наноса.

Међутим, у оквиру четири поплавна таласа, пронос хемијски растворених материја био је већи од проноса силта у три случаја. Изизетак представља јунски поплазни талас у коме је доминирао пронос силта, који је 2,5 пута већи од проноса хемијског наноса.

Сагледано са годишњег нивоа поплазни јунски талас од 11 чинио је 3 % времена пронето је 65,6 % годишњег силта, а само 13,4 % годишњег износа хемијски растворених материја.

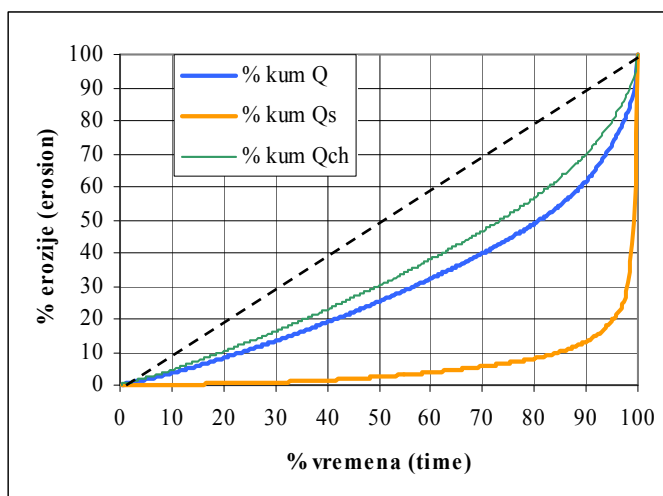


График 10. Однос кумулативног времена, количине отицајне воде (Q), проноса хемијски раствореног наноса (Q_{ch}) и проноса суспендованог наноса (Q_s)

Закључак

У највећем делу године пронос хемијски растворених материја већи је од проноса силта. То једино није случај у време максималних поводња, када је концентрација силта била изузетно висока, а хемијски растворених материја екстремно ниска. Дакле, у сливу Млаве, у условима хетерогеног геолошког састава и водности, хемијска ерозија је интензивнија од механичке водне ерозије. У укупној суми на годишњем нивоу пронос хемијски раствореног наноса учествује 65,9 %, а суспендовани са 34,1 %, тако да је однос између ова два типа речног наноса 1:1,9. У односу на површину слива то чини специфичну хемијску ерозију од $51,5 \text{ t/km}^2/\text{god}$, механичку од $26,7 \text{ t/km}^2/\text{god}$.

Компаративном анализом оба типа речног наноса за исте класе протицаја, утврђено је да дистрибуција проноса хемијског и суспендованог наноса није једнака. Анализом односа хемијског и суспендованог наноса према класама протицаја утврђена је следећа правилност: идући од нижих ка вишим класама протицаја удео хемијског проноса постепено опада, док удео проноса силта расте. У најнижој класи

водности, у којој је протицај мањи од $3 \text{ m}^3/\text{s}$, пронос хемијски раствореног наноса је 25 пута већи од проноса суспендованог наноса. С друге стране за време трајања протицаја чије су вредности веће $50 \text{ m}^3/\text{s}$ пронос суспендованог наноса је 3,3 пута већи од проноса хемијског.

С обзиром да су се изузетно високи протицаји јавили неколико пута годишње, доминација суспендованог наноса у тим условима указује на експесиван карактер механичке водне ерозије. Тако у одређеним деловима године пронос суспендованог наноса представља велики удео у његовом укупном годишњем оптерећењу. Таква ситуација била је за време поплавног таласа од 11-19. јуна 2002. године. У том периоду који је трајао 3 % времена пронето је 65,6 % од укупне годишње суме суспендованог наноса.

Успостављањем зависности између коцентрација силта и протицаја, за време екстремних метеоролошко-хидролошких услова, утврђено је да је током два најизразитија поплавна таласа током јуна и августа за слив Млаве карактеристична *хистерезис петља супротна кретању казаљке на сату*. Идентификација овог типа петље указује да за време трајања екстремних догађаја извор и транспорт суспендованог наноса, који је инкорпориран у речни ток, успостављен са ширег подручја слива. То је нарочито значајно за даљу идентификацију појава других догађаја који могу имати негативне последице по окружење, као што је случај активирања клизишта. У условима на који указује ова врста петљи, а у сагласности са геолошком подлогом, може се очекивати активирање клизишта на ширем простору, односно на територији која захвата веће површине.

Литература

- Chakrapani, G.J., 2005. Factors controlling variations in river sediment loads. *Current Science* ,88, 569–575.
- Chakrapani, G.J., Subramanian V. (1990): Factors controlling sediment discharge in the Mahanadi River Basin, India. *Journal of Hydrology*, Volume 117, Issues 1-4, 169-185
- Dragičević S., (2002): Bilans наноса у сливу Kolubare. Univerzitet у Beogradu - Geografski fakultet, Beograd
- Dragičević S., (2009): Dominantni erozivni procesi у сливу Kolubare.
- Hooke J.M. (2005): *Human impacts on fluvial system in the mediterranean region.*
- Klein, M. (1984): Anti-clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms. *Catena*, 11, 251–257
- Manojlović P. (1993): Речна ерозија у горњим делу слива Crnice. *Glasnik Srpskog geografskog društva*, sv. LXXIII, br. 1, 3-14
- Manojlović P., Gavrilović Lj. (1991): Uпоредна analiza проноса suspendovanog и hemijskog наноса у сливовима Belog и Crnog Timoka. *Glasnik Srpskog geografskog društva*, sv. LXXI, br. 2, 45-56
- Manojlović P., (1992): Hemijska ерозија као геоморфолошки процес - теоријски, аналитички и методолошки аспект. PMF-Geografski fakultet, Beograd
- Milanović A., Urošev M., Milijašević D. (2010): Poplave у Srbiji у periodu 1999-2009. godina - hidrološka analiza и mere zaštite од poplava. *Glasnik Srpskog geografskog društva*, sv. XC, br. 1, 93-121
- Mustafić S. (2006): Eрозија у сливу Temštica. Magistarski rad. Univerzitet у Beogradu - Geografski fakultet, Beograd,
- Negrel P., Roy S., Petelet-Giraud E., Millot R., Brenot A. (2007): Long-term fluxes of dissolved and suspended matter in the Ebro River Basin (Spain). *Journal of Hydrology* , 342, 249– 260
- Nikić Z., (2003): Hidrogeološka analiza formiranja и regionalizacija malih voda. Zadužbina Andrejević. Beograd
- Schiefer E., Hassan M.A., Menounos B., Pelpola C.P., Slaymaker O. (2010): Interdecadal patterns of total sediment yield from a montane catchment, southern Coast Mountains, British Columbia, Canada. *Geomorphology* 118, 207–212
- Seeger M., Errea M.P., Begueria S., Arnaez J., Marti C., Garcia-Ruiz J.M. (2004): Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. *Journal of Hydrology*, 288, 299–311
- Singh O., Sharma M.C, Sarangi A., Singh P. (2008): Spatial and temporal variability of sediment and dissolved loads from two alpine watersheds of the Lesser Himalayas. *Catena*, 76, 27–35
- Soler M., Latron J., Gallart F. (2008), Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountainous Mediterranean area (Vellcebre, Eastern Pyrenees). *Geomorphology*, 98, 143-152
- Tosiani T., Loubet M., Viers J., Valladon M., Tapia J., Marrero S., Yanes C., Ramirez A., Dupre B. (2004): Major and trace elements in river-borne materials from the Cuyuni basin (southern Venezuela): evidence for organo-colloidal control on the dissolved load and element redistribution between the suspended and dissolved load. *Chemical Geology*, 211, 305–334
- Walling D.E. (2006): Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology* 79, 192–216
- Walling D.E., Fang D. (2003): Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39, 111-126
- Williams, G.P., (1989): Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology* ,111, 89–106
- Zabaleta A., Martinez M., Uriarte J. A., Antiguada I. (2007). Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. *Catena*, 71, 179-190

CHEMICAL AND MECHANICAL WATER EROSION RATIO IN THE MLAVA RIVER BASIN

PREDRAG MANOJLOVIĆ^{1**}, SANJA MUSTAFIĆ¹, BEN MLADENović²

¹*University of Belgrade- Faculty of Geography, Studentski trg 3/3, Belgrade, Serbia*

²*High Technical School of Engineering and Applied Science, Nemanjina 2, Požarevac, Serbia*

Abstract: In the hydrological year of 2001/2002, the water samples in the Mlava Basin were analysed. On its most downstream hydrometric profile, to the Bratinac profile, the water samples were taken every 5 days for TDS and every day for concentration suspended sediment. It was found that during the analysed period, the transport of chemically dissolved matters was 2 times higher than the silt deposit transport.

Key words: chemical dissolved, suspended sediment load, Mlava River, Eastern Serbia.

Introduction

Chemical deposit, silt deposit and tractional deposit represent three integral types of river deposit. In contemporary geomorphology, and especially in other research areas that deal with river deposit (hydrology, geology, land, engineering profession), the greatest attention has been paid to the silt deposit. Relatively few papers in the world and in Serbia consider simultaneously all three components of river deposit. The first studies that were aimed at determining the ratio between the transport of chemically dissolved and silt deposit in Serbia were carried out in the basins of the Timok and Crnica (Manojlović P., Živković Lj., 1991, Manojlović P., 1993), then in the basins of the Kolubara (Dragičević S., 2002, 2009), Mlava (Mladenović B., 2006) and Temštica (Mustafić S., 2006), the only study that included a comparative analysis of all three types of river deposit were carried out in the Kolubara Basin (Dragičević S., 2002).

Which of the mentioned types of deposits will dominate depends on local factors of the environment. According to Chakrapani G.J. (Chakrapani G.J., 2005, Chakrapani G.J., Subramanian V., 1990), factors that largely control the transport of silt deposit are precipitation, runoff and lithological composition. The intensity of chemical erosion is affected 89% by water level, but as significant factors or modifiers stand out type of rocks, soil, and climate (Manojlović P., 1992). However, other factors have a lesser or greater importance on the intensity of river deposit transport, including the local topography of the terrain, vegetation cover, land use, climate change and so on. Recent studies point to the increasing influence of the man. Impact of human activities, including logging, changes in the land use, creation of the terrain terraces and the like, left strong consequences on the river systems in the Mediterranean region of Europe (Hooke J.M., 2005). Also, clearing of natural vegetation and changes in the land use or land conversion caused changes in the transport of sediment deposit around the world (Walling D.E., Fang D., 2003). Walling (Walling D.E., 2006) points to reduction of deposit transport in some rivers, which is the direct consequence of human impacts in terms of construction of water reservoirs (reservoir construction). Namely, from the mentioned environmental factors depends how big the share of one particular type of deposit is in their total sum. A minor proportion of the silt deposit in relation to the chemical may be due to human influence. Thus, in the basin of the River Ebro, the dam construction played a major role in regulating the silt deposit transport. With

E-mail: peca@gef.bg.ac.rs

This paper is part of the project "The Research on Climate Change Influences on Environment: Influence Monitoring, Adaptation and Mitigation" (43007), subproject No. 9: "Torrential Floods Frequency, Soil and Water Degradation as the Consequence of Global Changes", financed by Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia as part of the Integrated and Interdisciplinary Researches programme for the period from 2011 to 2014.

a value of 69-93 t/km²/year, compared to 1.2 to 5.1 t/km²/year, the chemical deposit dominates the basin of this river (Negrel P. at all., 2007). Share of the chemical deposit can range from 30 – 90 % (Tosiani T. at all), but in the total amount represents only 14.2 %, while 85.7 % belongs to the silt (Singh O. at all, 2008). Quite the contrary, in the mountainous areas, the tractional deposit stands out as the dominant one with the share of 50 %, while the silt and chemical are represented by 35 %, that is, 15 % (Schiefer E. at all., 2010).

The Mlava Basin is in many ways, primarily in physical-geographical characteristics, specific. Specificity is reflected in the geological structure of the terrain and water level of the basin, and in particular, hydrological conditions of the research period. The Mlava Basin is generally characterized by a predominance of low waters (Nikić Z., 2003). However, the studied hydrological year is very unusual with extremely increased runoff in June and August and below average runoff in the period from February to May. In fact, the biggest floods in the Mlava Basin, and one of the largest in the whole of Serbia, in the first decade of the twenty-first century, were in the month of June 2002 (Milanović, A., Urošev M., Milijašević D., 2010). Precisely the combination of petrological composition of the basin and hydrological characteristics during the observation period offers the possibility of determining the ratio between the chemical and mechanical water erosion, that is, establishing the dominant factors and conditions that determine the ratio between the two types of river deposit.

Geographical position of the Mlava Basin

The Mlava Basin is located in the northwestern part of eastern Serbia covering an area of 1830 km². It arises from Žagubičko spring, or the Mlava spring, that emerges in the southeastern part of the Žagubička Valley below the northern slopes of Beljanica at 314 m above sea level. It is one of the longer rivers in Eastern Serbia, which, after the course of 120 km empties into the Danube. The most downstream hydrometric profile is located near the village Bratinac, east of Požarevac. Until this profile, the Mlava covers an area of 1749 km². The most important of the tributaries are the Tisnica, Krupaja, Jošanička, Velika, Kamenička River and Vitovnica.

The easternmost point of the basin is located on the Homolje Mountains (Crni Vrh) at 21° 50' of the east geographical longitude. The westernmost point of the Mlava Basin is at 21° 10' of the east geographical longitude on the Danube at Ram. The distance between the westernmost and easternmost point is 65 km. The northernmost point of the basin is located on the Danube at Ram at 44° 48' of the north geographical latitude. The southernmost point of the Mlava Basin is located on Beljanica - V. Tresta at 44° 05' of the north geographical latitude. The distance between the northernmost and southernmost points, that is, the north-south direction is 81 km. The highest points in the basin are Beljanica top at 1336 m and Crni Vrh at 1037 m, and the lowest is at Ram on the Danube at 67 m. In regional terms, the entire basin consists of three parts: Homolje, Gornja Mlava and Stig.

Research Methodology

The formation of the relief in the Mlava Basin is dominated by fluvial erosion. In its scope, the transport of chemically dissolved substances and the silt deposit transport stand out. In order to determine the intensity of the fluvial erosion during the hydrological year of 2001/2002, periodically, every 5 days, the water samples were taken at the most downstream hydrological profile - Bratinac. The samples were first filtered in order to separate liquid from the solid phase. Filtration was carried out with a vacuum pump under the pressure of only 20 mm of water column. A filter paper Watman was used, of medium pore size, which was before and after filtration dried in a dryer, and then stabilized in a desiccator. Weighing paper before and after filtration was performed on a digital scale with a precision of 0.1 mg.

The chemical composition of water was determined by conventional methods of analytical inorganic chemistry in the Laboratory of Physical Geography at the Faculty of Geography, University of Belgrade. Concentrations of the macro-ions, i.e., Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺,

Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, SiO₂ were determined, as well as temperature, pH, and specific electric conductivity. To determine the concentration of the above mentioned macro elements, the following analytical methods were used: to determine the concentration of calcium, magnesium and hydrocarbonate ions the volumetric method was used; to determine the concentration of sodium, potassium and chloride ions the potentiometric method with corresponding ion-selective electrodes (Cole-Parmer Potassium Ion Electrodes) was used; To determine the concentration of sulfates and silicates the spectro photometric method was used.

Irrespective of the analysed water samples, the transport of chemically dissolved minerals and silt was also determined for the whole hydrological year. By corresponding mathematical and statistical methods, the numerical model of the deposit transport was calculated based on the available data, i.e., the concentration of chemically dissolved materials, silt and runoff. By its application, the transport of the mentioned types of deposits was also calculated for those days when samples were not taken. Thus, the relevant daily data were obtained for the transport of dissolved minerals and silt for the whole research period.

Geological structure of the terrain

The upper part of the basin, more precisely to the Mlava spring, is dominated by limestone of Beljanica. On the right side, the Mlava receives the Tisnica, which basin is partly cut into the limestone, and partly in the Cretaceous flysch and magmatites. Most of the Žagubička Valley is covered by Neogene sediments, which are not resistant to erosion, both chemical and mechanical. In the broader area of the Gornjačka Gorge, the terrain is built of Permian red sandstone, Cretaceous flysch and andesite of the Krepoljinska zone. The Krupajska River Basin, besides limestone, is dominated by red sandstone. Downstream of the Gornjačka Gorge, the basin is made of Neogene sediments, mentioned sandstones, clays and clayey marls.

Climatic characteristics of the basin

On the basis of selected average daily air temperatures in certain months, seasons and during the year, it was found that the average perennial air temperature is 10.9 °C. The coldest month is January, with an average temperature of -0.1 °C, and the warmest month is July with 21.2 °C. However, the maritime influence is reflected in the tendency of shifting the minimum to February and the maximum to August, and that autumn is warmer than spring for 1 °C. (Mladenović B., 2006). Altitudinal temperature gradient on Petrovac-Crni Vrh profile is 0.54 °C/100 m (Živković N., 2005).

Considering its geographical position, i.e., determined degree of continentality and orographic peculiarities, the Mlava Basin belongs to moderate-continental climate. Average annual precipitation is a little more than 702 mm. They are so arranged that the pluviometric regime is characterized by an obvious maximum precipitation in early summer in June, and two minimums of precipitation, the primary in October, and the secondary in February (Mladenović B., 2006). Altitudinal gradient of precipitation varies in the basin area. In the lower part of the basin is 54 mm/100 m, in the region of the middle and upper parts of the basin, i.e., on the Gornjak- Crni Vrh profile over 60 mm/100 m (Živković N., 2004).

In the hydrological year of 2001/2002, the amount of precipitation, with an average in the whole basin, was 743.7 mm, which was more than the perennial average. However, some stations got an extremely large amount of precipitation. Thus, Krepoljin received 971.2 mm of precipitation. Small amount of precipitation was recorded during the winter months (December, January and February), which means that the amount of snow, and thus the winter retention was low. During the spring, it was about average. What makes this year stand out is the large amount of precipitation during June 2002. During that month the middle and downstream part of the basin received extremely large amount of precipitation, which was concentrated in June. For this reason the discharge of that month was very large, and in some places led to flooding. While in May excreted 57.7 mm, and in July 82.6 mm, during June approximately 122.1 mm of precipitation reached the basin.

This was caused by the penetration of cyclones from the northwest. As the mountainous midriff of the Homoljske Mountains represented an obstacle to their further movement towards the east, it was the central part of the basin where large amounts of precipitation excreted. Stations located east of the mentioned mountain range, and even the Crni Vrh, with the highest altitude in the basin, did not receive that much rain.

Graph 1 Average amount of precipitation in the Mlava Basin during June 2002

Graph 2 Amount of precipitation (mm) during the hydrological year of 2001/2002

On the other hand, certain meteorological stations located in the central part of the basin received extremely large amounts of precipitation. Up to 6 stations received more than 140 mm of precipitation, while the area of Veliko Laole and Krepoljin received more than 160 mm of precipitation (Krepoljin, 189.0 mm).

Looking at the daily values, in Krepoljin during three days in June (10, 11, and 12) excreted 40.2, 75.3, and 38.6 mm of precipitation respectively, which made the total of 154.1 mm. A similar situation was on the other profiles in the downstream part of the basin.

Hydrological characteristics of the basin

The average 20 year discharge of the Mlava on the profile of Bratinac is 10.3 m³/s, while in the analysed year it was 7,96 m³/s. Characteristic of the Mlava Basin, in general, is the dominance of low waters. For part of the basin to the Mlava spring, given the crack nature of aquifers, low waters were defined with a value of up to 0.36 m³/s, while for the lower sector (profile Rašanac), low waters were defined by discharge of 1 m³/s (Nikić Z., 2003). As the studied hydrological year was atypical and very moist, with a significantly increase in the discharge, so low waters had much lower share than the perennial average.

On the profile of Bratinac, the average annual discharge is 7.9 m³/s, to which corresponds the specific runoff of 4.55 l/s/km². The minimal average monthly waters occurred in September (Q = 4.06 m³/s, q = 2.32 l/s/km²) and in July (Q = 4.15 m³/s, q = 2.37 l/s/km²), and the maximal during the summer flood in June (Q = 22.3 m³/s, q = 12.75 l/s/km²). The ratio between the average monthly discharges is 1:5.5. The maximal daily discharge was 151.0 m³/s (June), and the minimal 1.86 m³/s (August), so that they are in the ratio of 1:81.

Graph 3. Hydrograph of the Mlava for the hydrological year of 2001/2002

The characteristic of the hydrological year of 2001/2002 is that the greatest part of the year was dominated by discharges of the average value of 5.3 m³/s and four distinct floods. According to meteorological conditions, they occurred in late November and early December (29.11.-05.12.2001) with average Q of 20.3 m³/s (q=11.6 l/s/km²). Another flood occurred in late January and early February and lasted 21 days, with the average Q value of 17.2 m³/s (q=9.8 l/s/km²). The most distinctive flood occurred in accordance with the precipitation in the period from 11-21 June 2002. The average Q was 50.0 m³/s (q=28.6 l/s/km²). Within this period, two days had a very high discharge rate of 100 m³/s and 151 m³/s, which were the largest discharges in this hydrological year. The last flood occurred from 09-21 August 2002. In essence, there were two minor floods separated by three days. The average discharge of this period was 17.7 m³/s (q=10.1 l/s/km²). The winter peak discharge was influenced by substantial amount of precipitation and relatively high temperatures for this time of year. The spring maximum was caused by primary maximum of precipitation, and summer rains and showers.

Physical-chemical characteristics of the analysed water samples

Average total mineralization of the analysed running water is 399.1 mg/l, and ranges from 220.1 mg/l to 476.2 mg/l. The overall structure of the mineralization is dominated by the following cations Ca²⁺ (82.0%) and Mg²⁺ (9.6%), followed by Na⁺ and K⁺ with a total of 8.3%.

Anion HCO_3^- dominated with 89.2%, while the SO_4^{2-} and Cl^- are almost equally represented with 4.9% and 5.9%. Therefore, the Mlava Basin waters belong to calcium-hydrocarbon water type of the average mineralization. This, the most downstream profile is characterized by increased variability in water temperature, as well as slightly increased pH value of 7.8, which varies in the range of 7.5 to 8.2. The whole year incrustive value of the water ($\text{Sic}=0.5$) is in accordance with the increased pH values and concentrations of Ca^{2+} and HCO_3^- ions.

The average annual concentration of suspended material in the Mlava water was 58.3 mg/l. At the time of low waters it was almost negligible, because the concentration was only 2.5 mg/l. On the other hand, during the high-water the silt concentration significantly exceeded the concentration of chemically dissolved substances and was even 842.0 mg/l.

Ratios between the extreme values of the DM concentration and silt are very different. For the DM, the extreme ratio is 1:2.2, and silt 1:336,8. This illustrates the lack of variability of the TDS concentration ($\text{Cv}=9.9$). Unlike the coefficient of variation of the total mineralization, the variability in silt concentration is much higher ($\text{Cv}=165.9$). This means that the water level has far greater impact on the variability in the silt concentration, and that this type of erosion has an excessive character. Due to the high variability of these concentrations, it is much more advisable to use a different measure of dispersion, which is the median. The median value for the silt is 33.8 mg/l, and for the chemically dissolved deposit is 404.9 mg/l. So, in terms of concentration per year, dry residue multiply dominates over silt.

Ratio between discharges and concentrations of the TDS and suspended sediment

In accordance with the generally accepted model of ratios between the TDS and concentrations of silt on one side, and the discharge on the other hand, these variables are shown graphically in their regression model. The TDS and discharge ratio is antipodal, i.e., when discharges are greater, the macro-ions concentrations are lower. This ratio is best described by a double logarithmic model form $\log(Y)=a+b\cdot\log(X)$, which in the case of the Mlava is transformed into a unilateral logarithmic model. The coefficient of determination is highly significant given the value of 0.78.

Graph 4. Ratio between the discharge and TDS concentration (a) and the discharge and silt concentration (b)

In the case of the silt concentration and discharge ratio, this ratio is consistent – the higher discharges lead also to increased concentrations of silt, but not in a linear ratio. In the case of complex geological composition and discharges, the polynomial regression of the third degree proved to be the most appropriate, which is in analytical form $Y=a+b_1X+b_2X^2+b_3X^3$. Correlation of this kind of variables is set by the determination coefficient of 0.88.

Graph 5. Frequency distribution of the TDS concentrations (a) and the silt concentration (b)

Although the arithmetic average of the total mineralization of 399 mg/l, from the above showed graph, it is obvious that most of the data ($n=186$) is in the class of 400–450 mg/l. The data distribution tends to f-distribution with a strong asymmetry to the right. On the other hand, the frequency distribution of the silt concentrations is closer to the normal one. The dominant class is 20–50 mg-l, with 136 data.

Distribution of the chemical and silt deposit transport per discharge classes

The Mlava took out of the basin 136 826 t of material, of which 46701.6 t belongs to the silt deposit, and almost 2 times higher (90,124.2 t) to the chemically dissolved deposit. In relation to the basin area, it gives the specific erosion of 26.7 t/km²/year for the silt deposit, and 51.5 respectively t/km²/year for the chemical deposit. By increase in discharge, the deposit transport increases too, but the percentage of increase in silt and dissolved minerals transport is not equal. It is, of course, the result of the shown ratio of discharges and given concentrations. In most of the year, the dissolved substances transport is greater than the silt transport. It is not the

case only at the time of maximal floods, when the silt concentration was extremely high (842 mg/l), and chemically dissolved substances extremely low (227 mg/l).

Graph 6. Annual distribution of the chemical (Qch) and silt deposit transport (Qs)

By determining the ratio between the chemical and mechanical water erosion by water level, discharges are classified into seven classes. The silt transport until the class of discharge to 20 m³/s is almost insignificant (19.3%), but the last two classes of high water make 80.7% of the total annual transport of that material. Quite the opposite situation is with the dissolved substances transport, when in the discharge range of 20 m³/s, 76.4% of the material was taken out of the basin, and in the highest classes of discharge considerably less, i.e., 23.6% of the annual amount of the DM transport. On the other hand, it can be seen from the table that the chemically dissolved substances transport is more even compared to the silt transport by all discharge classes.

A more detailed insight into the distribution of the transport participation of dissolved minerals and silt by discharge classes can be estimated on the basis of aggregate amount of these two types of the river deposit transport. These ratios allow determination which type of deposit dominates depending on the runoff water amount. Regarded per classes, the share of chemical erosion gradually decreases from 25:1 for the lowest class Q less than 3 m³/s to 1.1:1 ratio in the class Q 20.01 to 50.0 m³/s. Only in the class of more than 50 m³/s, the chemical erosion represents smaller share of the total amount of deposits. Specifically 23.3% belong to the chemical, and 76.7% to the silt transport.

Table 1. Distribution of chemical (Qch) and silt deposit transport (Qs) by discharge classes (Q)

The graph showing the ratio between the discharge and intensity of the mechanical and chemical erosion better than the tabular data is given in graph 7. *The silt transport corresponds to exponential curve, while the chemically dissolved substances transport undergoes to polynomial regression of the third degree.* This is in stark contrast with the ratio of corresponding concentrations and discharges. The DM concentration according to discharge is defined by logarithmic regression, and the concentration of silt and discharge by polynomial regression of the third degree.

Graph 7. Percentage share of discharge, chemical and silt transport for given classes Q

The regression model for the chemical discharge transport by classes Q:

$$y(Q_{ch}) = -0.6541x^4 + 11.756x^3 - 73.429x^2 + 177.94x - 108.59; R^2 = 0.98$$

The regression model for the silt deposit transport by classes Q:

$$y(Q_s) = 0.2337e^{0.774x}; R^2 = 0.86$$

How it is possible that the regressions changed the type? The answer is in discharge, i.e., in its distribution in given classes. An exact insight in the ratio between the chemical and silt deposit transport can be seen only through their distribution in the corresponding classes of discharge. In conjunction with the corresponding classes of discharge, the ratio between the chemical and mechanical water erosion is completely differently distributed.

At chemical deposit, its dominance in the corresponding classes of discharge is defined by the polynomial regression. This means that with the increase in water level, the frequency of the chemical load transport firstly rises to the class Q of 5 m³/s, and then continuously decreases with a tendency of reaching the asymptote for the highest class of discharge. On the other hand, by increasing the water level, the frequency of the silt deposit transport has a continuous upward trend.

Hysteresis loop effect

By comparison of data on concentrations of the silt deposit and discharge, it can be determined how the deposit concentrations are distributed in relation to the discharge. One of the indicators of the connection between the silt concentration and discharge is determination of the hysteresis loop. Identification of different types of hysteresis loops is very significant, because it indicates the location's proximity to sediment sources, as well as the dominant factors that trigger the sedimentation source. This means that various forms of hysteresis loops, in fact, indicate the dominant factors of the discharge process, which results in the transport of denudational materials to the river flows. The shape the curve will show depends on many environmental factors. In addition to precipitation and sources of sedimentary material, the shape of the loop can be controlled by the size of the basin (Zabaleta A., et al., 2007; Soler M., Latron J., Gallart F. 2008), but mostly the soil moisture (Klein M., 1984).

Graph 8. Hysteresis loop for the period 11.-19.06.2002

Graph 9. Double hysteresis loop for the period 09.-26.08.2002

As the concentrations of silt deposit are relatively small for most of the research period, the determination of the existence of certain types of hysteresis loops will be discussed in the two periods, i.e., during the June and August flood wave. Of the five types of loops (Williams G.P., 1989), only one loop was found for the two periods, and that is *the hysteresis loop of the anti-clockwise direction*.

This curve is typical for the conditions when the soil is over saturated with moisture in the wider area of the basin, which contributes to the transport of silt from the larger area. The influence of extremely high precipitation, leads to over saturation of soil by moisture, which encourages intense runoff independent of topographic characteristics of the terrain (Seeger M. et al., 2004).

In conditions where the sediment flux originating from the erosion area which is at a greater distance from the measuring station, which means that the sedimentary conditions are incorporated throughout the entire basin, floods last longer. This was exactly the case during the June and the August flood wave. The June flood wave lasted 11 days and August wave was 13 days. How it can be seen on both attached graphs, *the high concentrations of silt occur after the onset of the largest discharges*. This distribution of the silt deposit concentration of the discharge values indicates that *the sediments transport to the river flow is long and that the sediments are transported from the areas that are far from it*. In other words, the intense runoff was present on the surface of the entire basin, which caused the intensive fluvio-denudational process, which resulted in increased concentrations of silt in the river flow, and therefore a large transport of the silt deposit.

Temporal distribution of the chemical and silt deposit transport

Far more significant data on the ratio between the chemical and mechanical erosion are obtained when reviewing the ratio curves of the cumulative percentage of time and the cumulative volume of eroded material and the runoff water amount. As the concentration of the chemically dissolved materials is higher than the average concentrations of silt, it is not surprising that the Mlava for 50% of time took out of the basin 30% of the annual quantity of the chemical materials deposit. For the same time, only 2.5% of the silt deposit was taken out of the basin. 25% of the annual runoff corresponds to these annual values of the deposit distribution. Persistence, that is, low variability of the dry residue concentration is reflected in the small curvature of the curve. Since the mechanical water erosion is excessive, slope at the beginning of its estimated transport curve slope is low, but later, with a drastic increase in discharge in relation to the other, longer part of the year, is growing rapidly. For this reason, for the last 10% of the time, 86% of the silt deposit and only 30% of the chemical were taken out of the basin.

During the four aforementioned floods, which lasted 14.2% of the annual time, 44% of water ran through, and 53.2% of the total deposits were taken out. In terms of a single share of both types of the river deposit, for this period of time, 34.4% of the annual amount of the chemical deposit was transported, and 89.4% of the annual amount of the silt deposit.

However, during the four flood waves, the chemically dissolved substances transport was higher than the silt transport in three cases. Exception represents the June flood wave which was dominated by the silt transport, which is 2.5 times higher than the chemical deposit transport.

Observed from an annual level, the June flood wave of 11 accounted for 3% of the time and transported 65.6% of the annual silt, and only 13.4% of the annual amount of the chemical deposit transport.

Graph 10. Ratio of the cumulative time, amount of runoff water (Q), chemically dissolved deposit transport (Q_{ch}) and silt deposit transport (Q_s)

Conclusion

For most of the year, the chemically dissolved substances transport is greater than the silt transport. It is not the case only at the time of maximal flood, when the concentration of silt was extremely high and chemically dissolved substances extremely low. So, *in the Mlava Basin, in the conditions of heterogeneous geological composition and water level, the chemical erosion is more intense than the mechanical water erosion. In the total amount, at the annual level, the chemically dissolved deposit transport participates with 65.9%, and the silt with 34.1%, so that the ratio between the two types of the river deposit is 1:1.9.* In relation to the basin area, it makes a specific chemical erosion of 51.5 t/km²/year, mechanical of 26.7 t/km²/year.

By the comparative analysis of both types of the river deposit, for the same discharge classes, it was found that the distribution of the chemical and silt deposit transport is not equal. The ratio between the chemical and silt deposit analysis by discharge classes established the following regularity: *going from lower to higher classes of discharge, the chemical deposit share is gradually declining, while the share of silt deposit is increasing.* In the lowest water level class, where the discharge is less than 3 m³/s, the chemically dissolved deposit transport is 25 times larger than the silt deposit transport. On the other hand, for the duration of discharge which values are larger than 50 m³/s, the silt deposit transport is 3.3 times higher than the chemical deposit transport.

Considering that the extremely high discharges occurred several times a year, the dominance of the silt deposit in these conditions indicates the excessive character of the mechanical water erosion. Thus, in certain parts of the year, the silt deposit transport represents a large share of its total annual load. Such was the situation during the flood wave from 11.-19. June 2002. During this period, which lasted for 3% of the time, 65.6% of the total annual amount of the silt deposit was transported.

The establishment of dependency between the concentration of silt and runoff, during extreme meteorological-hydrological conditions, it was found that during the two most prominent flood waves in June and August, the *anti-clockwise hysteresis loop* was characteristic for the Mlava Basin. The identification of this type of loop indicates that during extreme events, the source and transport of the silt deposit, which is incorporated in the river flow, was established from the wider area of the basin. This is particularly important for further identification of the emergence of other events that may have a negative impact on the environment, as is the case of triggered landslides. The conditions to which this type of loop points to, and in agreement with the geological background, the activation of landslides over a wide area, or in the territory, can be expected, which affects a larger area.

Reference

See references on page 38