Regionalna hidrološka analiza krškog porječja Kupe

Pavlić, Krešimir

Doctoral thesis / Disertacija

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:193796

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-13**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Krešimir Pavlić

REGIONALNA HIDROLOŠKA ANALIZA KRŠKOG PORJEČJA KUPE

DOKTORSKI RAD

Mentori:
Prof. dr. sc. Ranko Žugaj
Doc. dr. sc. Jelena Parlov

Zagreb, 2016.

University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Krešimir Pavlić

REGIONAL HYDROLOGICAL ANALYSIS OF THE KUPA KARSTIC BASIN

DOCTORAL THESIS

Supervisors:
Distinguished professor Ranko Žugaj, PhD
Assistant professor Jelena Parlov, PhD

Zagreb, 2016

Zahvaljujem svojim mentorima, prof. dr. sc. Ranku Žugaju, doc. dr. sc. Jeleni Parlov i članovima komisije, prof. dr. sc. Željku Andreiću, prof. dr. sc. Andrei Bačani i prof. dr. sc. Nevenki Ožanić koji su me svojim znanjem i iskustvom vodili i usmjeravali kroz izradu ovog rada i svima drugima koji su mi pomogli svojim savjetima.

Veliko hvala mami i tati, sestri i bratu, a najveća hvala mojoj supruzi Ivani na ljubavi, strpljivosti i nesebičnoj podršci.

Sažetak

Regionalna hidrološka analiza provedena je na osnovi podataka s hidrometrijskih profila koji se nalaze na području krškog sliva Kupe. Obrađeni su podaci s 32 hidrološka profila na 20 vodotoka do profila: Kamanje na Kupi, Stative Donje na Dobri, Mrzlo polje na Mrežnici i Veljun na Korani, a ukupna površina obrađenih slivova iznosi oko 5.450 km^2. Obrađeni hidrološki podaci su srednji dnevni protoci te srednji, maksimalni i minimalni godišnji protoci. Osim hidroloških podataka, obrađeni su i podaci o dnevnim oborinama prikupljenim na klimatološkim stanicama Parg, Ogulin i Karlovac. Razdoblje obrade je (1981.-2012.), a dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima ranijih istraživanja u kojima je analizirano razdoblje (1951.-1980).

Usporedba trendova srednjih godišnjih protoka, kojom se ujedno opravdava usvojeno razdoblje obrade, pokazala je da je u ranijem razdoblju (1951.-1980.) osam nizova imalo opadajući trend, a 11 nizova rastući, dok je u razdoblju ove obrade (1981.-2012.) 20 nizova imalo opadajući trend a 12 nizova rastući trend. Maksimalni godišnji protoci su u ranijem razdoblju imali sedam nizova opadajućeg trenda a 12 nizova rastućeg trenda, dok je u razdoblju ove obrade 27 nizova imalo opadajući trend a pet nizova rastući trend. Minimalni godišnji protoci u ranijem razdoblju obrade su imali sedam nizova opadajućeg trenda i 12 nizova rastućeg trenda, a u razdoblju ove obrade je 15 nizova imalo opadajući trend, a 17 nizova rastući trend. Analiza homogenosti srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka razdoblja obrade (1981.-2012.) u odnosu na razdoblje (1951.-1980.) pokazala je da je najviše nehomogenih nizova kod srednjih godišnjih protoka dok je kod maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka većina nizova homogena. Nehomogenost nizova srednjih godišnjih protoka potvrđuje pretpostavku o sušnijem razdoblju koje je nastupilo početkom 80-ih godina prošlog stoljeća, i traje sve do danas.

U ovoj regionalnoj hidrološkoj analizi izvedeno je 10 dvoparametarskih zakonitosti veza karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka, 72 dvoparametarskih zakonitosti veza karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka, zajedno s parametrima maksimalnih protoka i volumena različitih povratnih razdoblja i 10 dvoparametarskih zakonitosti veza karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka. Definirani su i teorijski hidrogrami 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja duž toka Kupe. Izdvojene su zakonitosti veza koje se mogu preporučiti za primjenu u praksi. Analiza višeparametarskih zakonitosti veza dala je dvije

moguće troparametarske zakonitosti, međutim one nisu preporučljive za upotrebu zbog vrlo širokih intervala pouzdanosti, iako imaju visoke vrijednosti koeficijenta korelacije. Spektralna analiza protoka i oborina pokazala je da su se u razdoblju istraživanja (1981.-2012.) ekstremi protoka i oborina pojačali i više istaknuli, ali da se ukupna količina oborine i protoka smanjila u odnosu na ranije razdoblje (1951.-1980.).

Ključne riječi: regionalna hidrološka analiza, spektralna analiza, protok, oborina, krš, sliv Kupe.

Abstract

Regional hydrological analysis was conducted using data from the catchments located in the area of karst basin of the Kupa river. The study included data from 32 hydrological profiles on 20 watercourses down to Kamanje on Kupa, Stative Donje on Dobra, Mrzlo polje on Mrežnica and Veljun on Korana profiles. Catchment area to specified profiles is approximately 5450 km^2. The processed hydrological data are the average daily flows and the average, maximum and minimum annual flows. In addition to hydrological data, the daily rainfall data collected on climatological stations Parg, Ogulin and Karlovac were processed. The period of analysis is from 1981 to 2012, and the results were compared with the results of previous studies that analyzed the period from 1951 to 1980.

The comparison of trends in mean annual flows, which also justifies the chosen period of analysis, has shown that in the earlier period from 1951 to 1980 eight time-sets showed a declining trend, and 11 time-sets showed growing trend, while in the analyzed period from 1981 to 2012, 20 time-sets showed a declining trend, and 12 time-sets showed growing trend. The maximum annual flows in the earlier period consisted of seven time-sets showing a declining trend and 12 time-sets showing the growing trend, while in the period of this analysis 27 time-sets showed a declining trend and five time-sets showed a growing trend. The minimum annual flows in the earlier period analysis consisted of seven time-sets showing a declining trend and 12 time-sets showing the growing trend, and in the period of this analysis, 15 time-sets have shown a declining trend, and 17 time-sets have shown a growing trend. The analysis of homogeneity of average, maximum and minimum annual flow for the 1981 to 2012 period in relation to the 1951 to 1980 period, shows that majority of non-homogeneous time-sets were present with average annual flows, while the majority of time-sets of maximum and minimum annual flows were homogeneous. The homogeneity of average annual flows confirms the assumption of a drier period, which occurred in the early 1980s and continues to this day.

In this regional hydrological analysis, the following was conducted: 10 two-parameter models' relationships of the average annual flow characteristic parameters, 72 two-parameter models' relationships of the maximum annual flow characteristic parameters, together with the parameters of the maximum flow rate and the volume of different return periods and 10 two-parameter models'

relationships of the minimum annual flow characteristic parameters. Theoretical hydrographs of 10-, 100- and 1000-year return period along the Kupa river flow were defined. Two-parameters' models that can be used in practice were selected. Although the analysis of multi-parameter relationships produced two possible three-parameter relationships, they are not recommended for use because of the very wide confidence interval, regardless of the correlation coefficient high value. Spectral analysis of the flows and precipitation shows that during the period of analysis from 1981 to 2012, extremes of flows and precipitation were strengthened and more pointed out, but the total amount of precipitation and flows declined, compared to the previous period from 1951 to 1980.

Keywords: regional hydrologic analysis, spectral analysis, flows, precipitation, karst, Kupa basin.

Sadržaj TEKST str.

1. Uvod 1

2. Pregled dosadašnjih istraživanja 4

3. Opis istraživanog područja 15

3.1. Geografske značajke 15

3.2. Hidroelektrane na krškom porječju Kupe i pritoka 19

3.3. Geološke i hidrogeološke značajke 23

3.4. Klimatološke značajke 28

3.5. Oborine na slivu Kupe u kršu 30

4. Postupak istraživanja 37

4.1. Procjena kakvoće ulaznih izračunskih hidroloških i meteoroloških podataka 38

4.2. Strukturalna analiza hidroloških sustava i procesa i modeliranje procesa i obilježja prirodne sredine 40

5. Analize osnovnih podloga 43

5.1. Utjecajne slivne površine 43

5.2. Ekstrapolacija protočne krivulje 44

5.3. Homogenost nizova, duljina nizova i trendovi nizova protoka u karakterističnim profilima 52

5.4. Oborine na krškim slivovima 68

6. Karakteristični parametri 69

7. Dvoparametarske zakonitosti veza 85

7.1. Srednji godišnji protoci 86

7.2. Maksimalni godišnji protoci i volumeni velikih vodnih valova 95

7.3. Minimalni godišnji protoci 111

7.4. Usporedba rezultata s rezultatima obrada na drugim područjima 115

8. Višeparametarske zakonitosti 117

9. Spektralna analiza hidroloških i meteoroloških podataka 120
10. Zaključak 133
11. Literatura 138

Prilozi

Prilog 1 Situacija krškog porječja Kupe i
Prilog 2 Situacija slivova Kupe, Dobre, Mrežnice i Korane (preuzeto i prilagođeno iz Žugaj i sur., 1998-2007) ii
Prilog 3 Karakteristični parametri srednjih godišnjih protoka iii
Prilog 4 Karakteristični parametri maksimalnih godišnjih protoka.....iv
Prilog 5 Karakteristični parametri minimalnih godišnjih protoka.....v
Prilog 6 Koeficijenti korelacije linearne ovisnosti ($y = ax + b$).....vi
Prilog 7 Koeficijenti korelacije nelinearne ovisnosti ($y = ax^b$) vii

Popis slika i tablica

Slika 2.1 Histogram analiziranih slivnih površina (preuzeto iz Jovanović i Radić, 1985).....5
Slika 2.2 Historami topografskih i meteoroloških parametara (preuzeto iz Radić i sur., 1986).....6
Slika 2.3 Područje Hrvatskoga krša ranije obrađenih 60 hidroloških stanica; crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Žugaj, 2015).....8
Slika 2.4 Prosječne godišnje efektivne oborine P_e i prosječne godišnje bruto oborine P (preuzeto iz Žugaj, 2015) 9
Slika 2.5 Najveći zabilježeni specifični dotoci q_M i utjecajne slivne površine A (preuzeto iz Žugaj, 2015) 11
Slika 3.1 Sjeverna granica krša u Hrvatskoj prema različitim autorima (preuzeto iz Matas, 2009) 15
Slika 3.2 Izvor rijeke Kupe 16
Slika 3.3 Đulin ponor u Ogulinu.....17
Slika 3.4 Odvodni kanal HE Ozalj I 19
Slika 3.5 Zgrada strojarnice HE Gojak.....20
Slika 3.6 HE Zeleni Vir 21
Slika 3.7 Zahvat vode u špilji Zeleni Vir.....21
Slika 3.8 Geološka karta Hrvatske; crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Marković, 2002, autori karte: I. Velić i J. Velić) 24
Slika 3.9 Hidrografska mreža na području Republike Hrvatske; crvenom elipsom je označeno područje istraživanja 26
Slika 3.10 Geografska raspodjela klimatskih tipova po W. Köppenu u Hrvatskoj u standardnom razdoblju (1961.-1990.): Cfa, umjereno topla vlažna klima s vrućim ljetom; Cfb, umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom; Csa, sredozemna klima s vrućim ljetom; Csb, sredozemna klima s toplim ljetom; Df, vlažna borealna klima; crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Šegota i Filipčić, 2003).....29
Slika 3.11 Srednja godišnja količina oborine u Hrvatskoj za razdoblje (1971.-2000.); crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Zaninović i sur., 2008) 31
Slika 3.12 Srednji godišnji broj dana s količinom oborine ≥ 1 mm u Hrvatskoj za razdoblje (1971.-2000.); crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Zaninović i sur., 2008) 32

Slika 3.13 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Parg u razdoblju (1951.-1980.).....33
Slika 3.14 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Parg u razdoblju (1981.-2012.).....34
Slika 3.15 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Ogulin u razdoblju (1951.-1980.).....34
Slika 3.16 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Ogulin u razdoblju (1981.-2012.).....35
Slika 3.17 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Karlovac u razdoblju (1951.-1980.)..35
Slika 3.18 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Karlovac u razdoblju (1981.-2012.)..36
Slika 5.1 Protočne krivulje Gornje Dobre u profilu Turkovići u razdoblju (1963.-1999.) (preuzeto iz Brkić, 2001a).....46
Slika 5.2 Promijenjena protočna krivulja Gornje Dobre u profilu Turkovići i ranije definirane protočne krivulje (preuzeto iz Brkić, 2001b).....47
Slika 5.3 Protočne krivulje Gornje Dobre: nakon mjerenja protoka u 2002. godini i s mjerenjima velike vode 2004. godine.....48
Slika 5.4 Protočne krivulje Gornje Dobre u profilu Turkovići prema različitim obradama (preuzeto iz Brkić, 2005).....49
Slika 5.5 Poprečni profil hidrološke stanice Turkovići na Gornjoj Dobri, preuzeto iz VPB (2001).....50
Slika 5.6 Maksimalni zabilježeni specifični dotoci u ovisnosti o veličini sliva. 51
Slika 5.7 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Kupe u profilu Kupari u razdobljima (1951.-1980.) i (1981.-2012.).....63
Slika 5.8 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Kupe u profilu Kamanje u razdobljima (1957.-1980.) i (1981.-2012.).....63
Slika 5.9 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Gornje Dobre u profilu Turkovići u razdobljima (1963.-1980.) i (1981.-2012.).....64
Slika 5.10 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Donje Dobre u profilu Stative Donje u razdobljima (1951.-1980.) i (1981.-2012.).....65
Slika 5.11 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Mrežnice u profilu Mrzlo polje u razdobljima (1951.-1980.) i (1981.-2012.).....66
Slika 5.12 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Korane u profilu Veljun u razdobljima (1951.-1980.) i (1981.-2012.).....67
Slika 6.1 Histogram učestalosti utjecajnih slivnih površina *A* a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....71

Slika 6.2 Histogram učestalosti srednjih godišnjih protoka Q.....72
Slika 6.3 Histogram učestalosti godišnjih bruto oborina P a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....73
Slika 6.4 Histogram učestalosti godišnje efektivne oborine P_e a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....74
Slika 6.5 Histogram učestalosti koeficijenta varijacije srednjih godišnjih protoka c_v a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....75
Slika 6.6 Histogram učestalosti koeficijenta asimetrije srednjih godišnjih protoka c_s a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....76
Slika 6.7 Histogram učestalosti otjecajnih koeficijenata srednjih voda c a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....77
Slika 6.8 Histogram učestalosti maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka Q_M 78
Slika 6.9 Histogram učestalosti maksimalnih zabilježenih specifičnih godišnjih protoka q_M a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....79
Slika 6.10 Histogram učestalosti koeficijenta varijacije maksimalnih godišnjih protoka c_{vM} a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....80
Slika 6.11 Histogram učestalosti koeficijenta asimetrije maksimalnih godišnjih protoka c_{sM} a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....81
Slika 6.12 Histogram učestalosti koeficijenta varijacije minimalnih godišnjih protoka c_{vm} a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....82
Slika 6.13 Histogram učestalosti koeficijenta asimetrije minimalnih godišnjih protoka c_{sm} a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine.....83
Slika 7.1 Linearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 24 podatka.....88
Slika 7.2 Nelinearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 24 podatka.....89
Slika 7.3 Linearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p u području slivnih površina do A = 500 km^2 90
Slika 7.4 Linearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 13 podataka za slivove A > 250 km^2.....91

Slika 7.5 Nelinearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 13 podataka za slivove $A > 250$ km^2.....91
Slika 7.6 Linearna ovisnost standardne devijacije srednjih godišnjih protoka σ o srednjim godišnjim protocima Q s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 19 podatka.....92
Slika 7.7 Nelinearna ovisnost standardne devijacije srednjih godišnjih protoka σ o srednjim godišnjim protocima Q s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 19 podatka.....92
Slika 7.8 Linearna ovisnost efektivne oborine P_e o bruto oborini P za slivove na kojima je otjecajni koeficijent $c > 0{,}50$.....93
Slika 7.9 Nelinearna ovisnost efektivne oborine P_e o bruto oborini P za slivove na kojima je otjecajni koeficijent $c > 0{,}50$.....94
Slika 7.10 Nelinearna ovisnost maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka Q_M o srednjim maksimalnim godišnjim protocima Q_{Msr} s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 23 podatka 98
Slika 7.11 Linearna ovisnost standardne devijacije maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka σ_M o maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima Q_M s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene sa 7 podatka.....99
Slika 7.12 Nelinearna ovisnost standardne devijacije maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka σ_M o maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima Q_M s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene sa 7 podatka.....99
Slika 7.13 Maksimalni specifični dotoci q_M u ovisnosti o slivnoj površini A duž Kupe do Kamanja 101
Slika 7.14 Linearna ovisnost volumena vodnih valova 10-godišnjeg povratnog razdoblja V_{10} o veličinama sliva A s intervalom pouzdanosti σ_p na profilima rijeke Kupe bez profila pritoka 103
Slika 7.15 Nelinearna ovisnost maksimalnog protoka 10-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M10} o veličinama sliva A s intervalom pouzdanosti σ_p na profilima rijeke Kupe bez pritoka 104
Slika 7.16 Linearna ovisnost maksimalnih godišnjih protoka 100-godišnjeg povratnog razdoblja o maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima s intervalom pouzdanosti σ_p.....105
Slika 7.17 Nelinearna ovisnost maksimalnih godišnjih protoka 100-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M100} o maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima s intervalom pouzdanosti σ_p.....106

Slika 7.18 Linearna ovisnost volumena vodnih valova 100-godišnjeg povratnog razdoblja V_{100} o maksimalnim godišnjim protocima 100-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M100} s intervalom pouzdanosti σ_p izvedena za Kupu.....107

Slika 7.19 Nelinearna ovisnost volumena vodnih valova 100-godišnjeg povratnog razdoblja V_{100} o maksimalnim godišnjim protocima 100-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M100} s intervalom pouzdanosti σ_p izvedena za Kupu.....107

Slika 7.20 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Kupari na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 22,5 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 89,8 sati. 109

Slika 7.21 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Hrvatsko na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 28,8 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 115 sati. 109

Slika 7.22 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Radenci na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 34,4 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 138 sati. 110

Slika 7.23 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Metlika na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 37,5 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 150 sati. 110

Slika 7.24 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Kamanje na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 41,6 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 166 sati. 111

Slika 7.25 Linearna ovisnost standardne devijacije minimalnih godišnjih protoka σ_m o srednjim minimalnim godišnjim protocima Q_{msr} s intervalom pouzdanosti σ_p.....114

Slika 7.26 Nelinearna ovisnost standardne devijacije minimalnih godišnjih protoka σ_m o srednjim minimalnim godišnjim protocima Q_{msr} s intervalom pouzdanosti σ_p.....114

Slika 9.1 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka Q na stanici Zamost 2 na Čabranki u razdoblju (1951.-1980.).....123

Slika 9.2 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka Q na stanici Zamost 2 na Čabranki u razdoblju (1981.-2012.).....124

Slika 9.3 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina P na stanici Parg u razdoblju (1951.-1980.).....125

Slika 9.4 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Parg u razdoblju (1981.-2012.).....125
Slika 9.5 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka *Q* na stanici Stative Donje na Donjoj Dobri u razdoblju (1951.-1980.).....126
Slika 9.6 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka *Q* na stanici Stative Donje na Donjoj Dobri u razdoblju (1981.-2012.).....127
Slika 9.7 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Karlovac u razdoblju (1951.-1980.).....128
Slika 9.8 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Karlovac u razdoblju (1981.-2012.).....128
Slika 9.9 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka *Q* na stanici Turkovići na Gornjoj Dobri u razdoblju (1963.-1980.).....129
Slika 9.10 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka *Q* na stanici Turkovići na Gornjoj Dobri u razdoblju (1997.-2012.).....130
Slika 9.11 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Ogulin u razdoblju (1951.-1980.).....131
Slika 9.12 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Ogulin u razdoblju (1981.-2012.).....131

Tablica 3.1 Instalirane snage hidroelektrana i značajnih malih hidroelektrana na slivu Kupe 22
Tablica 5.1 Maksimalni zabilježeni protoci, Q_M i specifični dotoci, q_M na pripadajućim profilima na slivu Gornje Dobre. 51
Tablica 5.2 Rezultati ispitivanja homogenosti nizova srednjih godišnjih protoka *Q* na slivu Kupe 53
Tablica 5.3 Rezultati ispitivanja homogenosti nizova maksimalnih godišnjih protoka Q_M na slivu Kupe 54
Tablica 5.4 Rezultati ispitivanja homogenosti nizova minimalnih godišnjih protoka Q_m na slivu Kupe 54
Tablica 5.5 Vrijednosti pogrešaka koeficijenta varijacije σ_{cv} srednjih godišnjih protoka *Q* na slivu Kupe 56

Tablica 5.6 Vrijednosti pogrešaka koeficijenta varijacije σ_{cv} maksimalnih godišnjih protoka Q_M na slivu Kupe.....57
Tablica 5.7 Vrijednosti pogrešaka koeficijenta varijacije σ_{cv} minimalnih godišnjih protoka Q_m na slivu Kupe 58
Tablica 5.8 Trendovi srednjih godišnjih protoka na slivu Kupe u vremenska razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.) 60
Tablica 5.9 Trendovi maksimalnih godišnjih protoka na slivu Kupe u vremenska razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.) 61
Tablica 5.10 Trendovi minimalnih godišnjih protoka na slivu Kupe u vremenska razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.) 62
Tablica 7.1 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka za linearnu ovisnost $y = ax + b$ 87
Tablica 7.2 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka za nelinearnu ovisnost $y = ax^b$ 87
Tablica 7.3 Linearne i nelinearne formule karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka 88
Tablica 7.4 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka za linearnu ovisnost $y = ax + b$.....95
Tablica 7.5 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka za nelinearnu ovisnost $y = ax^b$ 96
Tablica 7.6 Linearne i nelinearne regresijske formule karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka.....97
Tablica 7.7 Linearne i nelinearne regresijske formule karakterističnih parametara volumena V_p 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja 102
Tablica 7.8 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka za linearnu ovisnost $y = ax + b$ 111
Tablica 7.9 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka za nelinearnu ovisnost $y = ax^b$ 112
Tablica 7.10 Linearne i nelinearne regresijske formule karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka.....112

Tablica 7.11 Usporedba dobivenih zakonitosti karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka s rezultatima istraživanja na drugim područjima 115
Tablica 7.12 Usporedba dobivenih zakonitosti karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka s rezultatima istraživanja na drugim područjima 116
Tablica 8.1 Koeficijenti korelacije linearnih ovisnosti između karakterističnih parametara koji se najčešće koriste za višestruku regresiju u kršu 117
Tablica 8.2 Koeficijenti korelacije nelinearnih ovisnosti između karakterističnih parametara koji se najčešće koriste za višestruku regresiju u kršu 118
Tablica 8.3 Vrijednosti koeficijenata višestruke korelacije R i prilagođene vrijednosti koeficijenata višestruke korelacije R' između zavisne varijable z i nezavisnih varijabli x i y za linearnu i nelinearnu ovisnost 118
Tablica 8.4 Linearne i nelinearne troparametarske zakonitosti 119

1. Uvod

Regionalna hidrološka analiza podrazumijeva produbljivanje rezultata provedenih analiza i obrada podataka o nekoj regiji dobivenih motrenjem i mjerenjem. Primjenom regionalnih analiza u inženjerskoj hidrologiji obuhvaćena su ispitivanja hidroloških pojava na širim područjima, dovodeći u vezu različite karakteristične hidrološke i meteorološke parametre s ciljem definiranja matematičkih odnosa koji se mogu koristiti za pojedinu regiju (Ponce, 1989). Općenito, matematičke zakonitosti se izvode tako da se podaci sa stanica koje imaju dovoljno duga razdoblja mjerenja mogu koristiti na slivovima sličnih hidroloških značajki koji nemaju dovoljno duga razdoblja mjerenja ili nemaju nikakvih mjerenja hidroloških i meteoroloških veličina. Druga primjena regionalne analize uključuje regresijske tehnike u svrhu dobivanja iskustvenih (empirijskih) jednadžbi primjenjivih na šira geografska, ali slična područja. Kod regionalne analize koriste se vjerojatnost i statistika zajedno sa složenom vjerojatnošću i frekvencijskom analizom.

Hidrološka obrada prvi je i temeljni korak kod svih hidrotehničkih inženjerskih zahvata. Primjerice, kod gradnje akumulacijskih jezera ili retencija, potrebno je znati koliko je vode na raspolaganju, kakva je njezina raspodjela unutar vremena i kolika je velika voda na koju se te građevine dimenzioniraju. Uz to, bitno je pouzdano znati te veličine kada se štite urbanizirana i industrijska područja te prometnice. Osim u inženjerske svrhe, rezultati hidrološke analize su također bitne podloge i za zaštitu prirode. Krško slivno područje Kupe posebno je po svojim prirodnim bogatstvima i različitim krškim oblicima koja su vrlo osjetljiva na ljudsko djelovanje. Primjerice, rijeka Mrežnica je poznata po velikom broju sedrenih barijera.

Područje Gorskog kotara, koje se nalazi u području obraslog krša Hrvatske, vrlo je bogato vodom. Za razliku od golog krša na jugu, to područje ima razgranatu hidrografsku mrežu i stalne površinske tokove i kao takvo je zanimljivo za korištenje tih voda, njezinu zaštitu, ali i zaštitu od voda, jer su naselja na tom području, posebice veći gradovi poput Ogulina i Karlovca, u području povećanog rizika od poplave kod pojavljivanja jakih i dugotrajnih oborina.

Područje istraživanja obuhvaćeno ovom disertacijom je krški dio područja sliva Kupe i pritoka, a pripada obraslom kršu Hrvatske. Površina istraživanog područja do najnizvodnijih obrađenih profila Kamanje na Kupi, Stative Donje na Donjoj Dobri, Mrzlo Polje na Mrežnici i Veljun na Korani iznosi oko 5.450 km^2. Na razmatranom slivu Kupe, Gornje i Donje Dobre, Korane i

Mrežnice razmatrani su podaci s 32 hidrološka profila na 20 vodotoka koji su prikazani na situaciji sliva na prilogu 1. Osim hidroloških podataka, korištene su i analizirane raspoložive karte izohijeta te podaci o srednjim dnevnim oborinama prikupljeni na klimatološkim stanicama Parg, Ogulin i Karlovac. Za krške slivove svojstveno je da slivna površina određena po topografskoj razvodnici vrlo često ne odgovara utjecajnoj površini sliva određenoj prema hidrogeološkoj razvodnici, koja je često promjenjiva, ovisno o stanju vode u podzemlju. Detaljnu analizu i definiranje slivnih veličina površina Kupe i pritoka u kršu proveo je V. Jurak u znanstvenom radu Žugaja i sur. (1998-2007) i te su veličine ocijenjene i prihvaćene kao dovoljno pouzdane i usvojene u ovom radu.

Pionirska regionalna hidrološka istraživanja, zanimljiva za ovaj rad, su *Regionalna analiza hidroloških parametara*, Jovanovića i Radića (1985) i *Regionalne hidrološke analize*, Radića i sur. (1986). Sustavna regionalna istraživanja u kršu Hrvatske vezana za sliv Kupe provedena su u disertacijama Žugaja (1993), R. Biondića (2005) i dijelom u disertaciji D. Biondića (2005) te u radovima D. Biondića i sur. (2007) i B. Biondića i sur. (2006). Odabrana uža regija sliva Kupe u kršu Hrvatske, kao područje istraživanja ove regionalne analize, trebala bi dati nove uvide u svojstva otjecanja vode u obraslom kršu. Cilj ovog istraživanja je analizirati sadašnji hidrološki režim na regiji obraslog krša u Hrvatskoj, ukazati na promjenu tog režima i objasniti promjene hidrološkog režima koje su ustanovljene na razmatranom području u razdoblju obrade (1981.-2012.), koje se po svojoj vodnosti razlikuje od ranije obrađivanog razdoblja (1951.-1980.).

Regionalnoj hidrološkoj analizi krškog porječja Kupe i pritoka pristupilo se opisom istraživanog područja i očekivanog cilja. Dan je pregled raspoloživih dosadašnjih istraživanja na razmatranom području i šire, te je detaljno opisano područje istraživanja. Opisani su postupak i primijenjene metode istraživanja, pristup analizi osnovnih podloga i karakterističnih parametara koji su analizirani. U središnjem dijelu rada prikazan je postupak definiranja dvoparametarskih i višeparametarskih zakonitosti te spektralna analiza hidroloških i meteoroloških nizova podataka. Uobičajene postupke u regionalnoj analizi ovaj rad dopunjuje analizom teorijskih vodnih valova i prikazom praktične upotrebe spektralne analize. Dane su osnovne smjernice za daljnja istraživanja i nove pristupe u regionalnoj hidrološkoj analizi, ali i u općim hidrološkim analizama, posebno zanimljivim za razmatrano krško područje Kupe i pritoka.

Hipoteze na kojima se temelji ovaj rad su: (1) dokumentiranje sušnog razdoblja koje nastupa 1980-ih godina, (2) da su nizovi podataka iz 32-godišnjeg razdoblja (1981.-2012.) dovoljno dugi

za regionalnu hidrološku analizu i (3) ispitivanje kakvoće, u hidrologiji značajne troparametarske zakonitosti $P_e = f(A, c_v)$. Razdoblje obrade (1981.-2012.) usvojeno je prvenstveno kao neophodan nastavak i nadopuna prethodnim analizama u kršu Hrvatske, koje su rađene do 1990. godine i u kojima je ustanovljena pojava sušnijeg razdoblja (1981.-1990.) (Žugaj, 1995). Kasnija su razmatranja pokazala da je i ovdje razmatrano 32-godišnje razdoblje (1981.-2012.) različito od ranijeg (1951.-1980.) i da ga prvenstveno zbog toga ima smisla razmatrati. Te promjene značajno utječu na hidrološki režim na razmatranom području, koji je važan dio tog osjetljivog sustava. Duljina razdoblja obrade unutar 32 godine je razmatrana u petom poglavlju i ustanovljeno je da su svi nizovi, a i oni kraći od 32 godine, dovoljno dugi da se dobiveni rezultati mogu smatrati pouzdanim i da ih se može mjerodavno usporediti s ranijom hidrološkom analizom krša Hrvatske. Od višeparametarskih zakonitosti, za područje ovog istraživanja najzanimljivija je ovisnost efektivne oborine P_e o veličini sliva A i koeficijentu varijacije srednjih godišnjih protoka c_v, $P_e = f(A, c_v)$.

U ovom radu su obrađeni podaci s 32 hidrološka profila s 20 vodotoka unutar slivova Kupe, Dobre, Korane i Mrežnice. Podaci s najnizvodnijeg hidrološkog profila Velemerić na Korani nisu korišteni jer sliv do tog profila obuhvaća i sliv rijeke Radonje koja se ne nalazi u kršu. Korišteni su podaci o veličinama utjecajnih slivnih površina hidrogeoloških i hidroloških istraživanja Žugaja i sur., (1998.-2007.), pa su rezultati tih istraživanja usvojeni za ovu analizu. Od spomenuta 32 hidrološka profila pokušalo se obuhvatiti što više podataka, no podatke s nekih profila se moralo izostaviti zbog nepouzdanosti mjernih profila i zbog heterogenih podataka uzrokovanih retencijskim djelovanjem podzemlja i čestom pojavom poniranja vode u podzemlje duž vodotoka.

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Za istraživanja u ovoj disertaciji, u kojoj se obrađuje obrasli hrvatski krš i obuhvaća slivove na ukupnoj površini od oko 5.450 km^2, od značaja su i dostignuća iz ranijih istraživanja drugih regija, koja se ovdje ukratko opisuju.

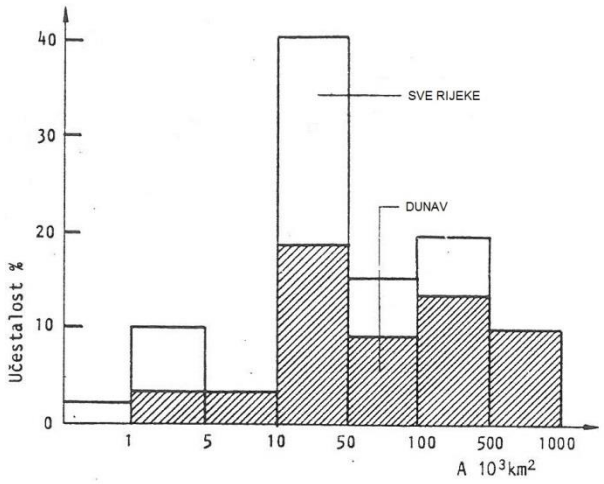
Regionalna hidrološka analiza, tretirana kao sustavno znanstveno područje je mlada disciplina u hidrologiji. Naime, 1985. godine UNESCO osniva međunarodni istraživački program koji se isključivo bavi regionalnom hidrologijom – FRIEND (*Flow Regimes from International Experimental and Network Data*). Glavni cilj projekta FRIEND je poboljšanje razumijevanja hidroloških različitosti i sličnosti u vremenu i prostoru da bi se razvila znanost u hidrologiji i praktične metode u projektiranju. Međutim, pojedini dijelovi regionalne hidrološke analize razmatrani su i ranije, primjerice odnos efektivne i bruto oborine za srednju Europu (Keller, 1906), a za slivove u bivšoj Jugoslaviji (Srebrenović, 1970). Koeficijenti varijacije srednjih godišnjih protoka, veličina slivova, specifičnih maksimalnih protoka su u nekim poglavljima knjiga također bili analizirani i prije 1985. godine, primjerice McMahon (1982).

Na području nekadašnje Jugoslavije regionalna hidrološka analiza cjelovito je prvi put opisana u radu Jovanovića i Radića (1985). To je pionirski rad u području regionalne analize na ovim prostorima, a predstavlja izvod iz regionalne hidrološke analize sliva Dunava s podacima iz razdoblja od 1931. do 1970. godine. Obrađeno je 57 hidroloških stanica na glavnom toku Dunava i njegovih pritoka. Zbog varijacija srednjih protoka i nekih drugih parametara, autori su u svom radu koristili i podatke s nekoliko profila na slivu Rajne i europskih rijeka koje se nalaze u području umjerene klime.

Analizirani su srednji godišnji protoci Q, maksimalni godišnji protoci Q_M i minimalni godišnji protoci Q_m, zajedno s njihovim deskriptorima: koeficijentom varijacije c_v i koeficijentom asimetrije c_s.

U radu je provedena uobičajena statistička obrada srednjih godišnjih protoka Q i ekstremnih godišnjih protoka vode Q_M i Q_m i njihovih karakterističnih parametara, kao što su efektivna oborina P_e, koeficijenti varijacije c_v i asimetrije c_s i neke druge izvedene veličine. Veličine analiziranih slivova A kreću se od A = 776 km^2 pa do A = 807.000 km^2. Najveća je zastupljenost slivova površina od 10.000 do 50.000 km^2, dok više od 40 posto slivova ima površinu veću od 50.000 km^2. Efektivna godišnja oborina na slivu Dunava kreće se u granicama od 100 do 1.000 mm. Histogramima su ilustrirane pojedine značajke ovih karakterističnih parametara, primjerice postotak zastupljenosti

analiziranih slivova na slici 2.1. Prikazana je zastupljenost površina pojedinih slivova (slika 2.1), efektivna oborina, koeficijenti varijacije i asimetrije efektivne oborine u usporedbi sa svim rijekama koje je ranije analizirao McMahon (1982).



Slika 2.1 Histogram analiziranih slivnih površina (preuzeto iz Jovanović i Radić, 1985)

U tome radu, jednom od prvih radova takve vrste, se navodi da se dobivene ovisnosti mogu uz oprez primijeniti i na druge neistražene slivove velikih površina, bez obzira što dobiveni rezultati imaju velika odstupanja od srednjih vrijednosti. Autori zaključuju da se u području istraživanja ove regionalne analize nalaze neistraženi slivovi površina manjih od 10.000 km^2 pa je zbog toga primjena dobivenih relacija nemoguća, i potrebna su nova istraživanja, i to za slivove veličine od 10 km^2 do 10.000 km^2. Autori pretpostavljaju da će ta istraživanja naići na problem velike heterogenosti parametara o kojima ovisi protok, pa će se zbog toga morati uvesti novi parametri u regresijske veze.

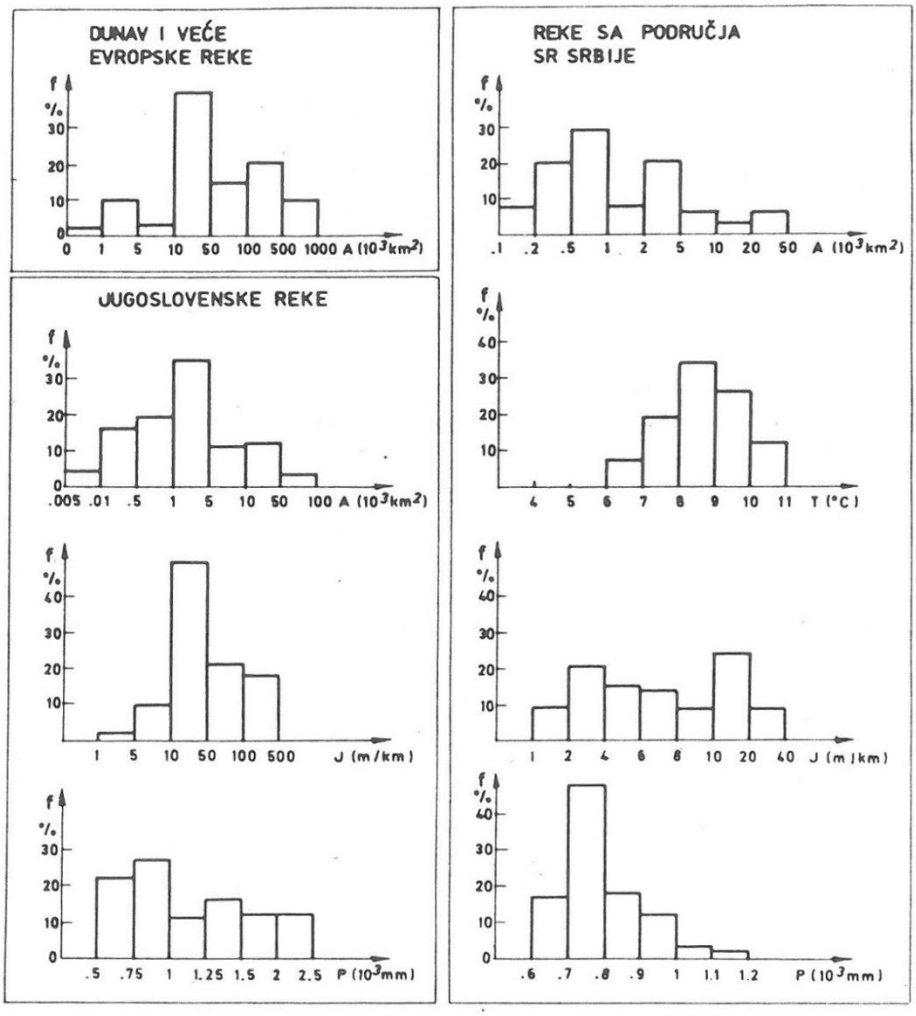
Radić i sur. (1986) prikazuju statističke metode i postupke koji se primjenjuju pri korištenju hidroloških parametara na sličnim slivovima. Statističkim analizama se utvrđuje koje veze između pojedinih parametara ima smisla uopće razmatrati, koji parametri daju najveću količinu informacija pri opisivanju međuovisnosti te dobivanje objektivne ocjene točnosti prognostičkih jednadžbi i odstupanje prognoze.

Zaključuje se da su za statističku obradu najpogodnije one veličine koje imaju normalnu raspodjelu. U slučaju varijabli s normalnom raspodjelom, ovisnost koju se preporuča za korištenje određuje se na osnovi veličine koeficijenta korelacije *r*, jer je kod normalne raspodjele moguća

samo linearna veza, a linearna regresija je najpovoljnija u smislu najmanje srednje kvadratne pogreške. Osim koeficijenta korelacije, koriste se i razni statistički testovi regresijskih funkcija.

U razmatranom radu Radića i sur. (1986) obrađene su tri regije: sliv Dunava i slivovi većih europskih rijeka, slivovi rijeka na području bivše Jugoslavije i slivovi na teritoriju Srbije. Regionalna ispitivanja hidroloških parametara dala su određene veze hidroloških parametara: maksimalnih godišnjih protoka Q_M, srednjih godišnjih protoka Q, te koeficijenta varijacije srednjih godišnjih i maksimalnih godišnjih protoka c_v i c_{vM} s topografskim i meteorološkim svojstvima sliva.

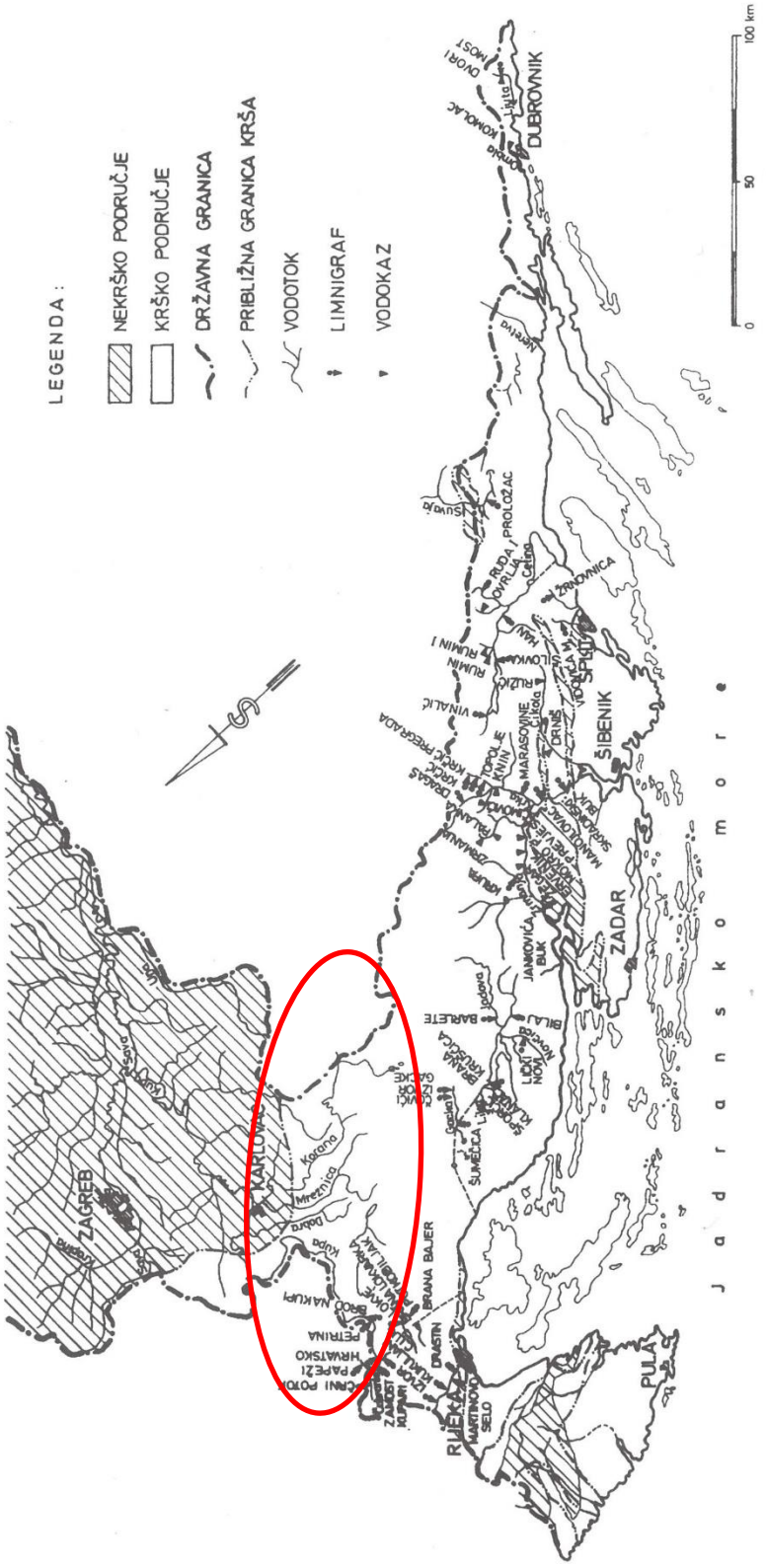
Histogramima su ilustrirane pojedine značajke karakterističnih topografskih (veličina sliva A, nagib sliva I) i meteoroloških (prosječna godišnja temperatura T i prosječna godišnja količina oborine P) parametara između tri navedene regije (slika 2.2).



Slika 2.2 Historami topografskih i meteoroloških parametara (preuzeto iz Radić i sur., 1986)

Na osnovi provedenih ispitivanja zaključeno je da postoji slaba veza između efektivne oborine P_e i površine sliva A za sva tri navedena područja istraživanja. Za prognozu srednjih godišnjih protoka valjalo bi uzeti i druge parametre, od kojih su najvažnije prosječne godišnje oborine P. Koeficijenti varijacije srednjih godišnjih protoka c_v i maksimalnih godišnjih protoka c_{vM} ne mogu se dovoljno pouzdano odrediti preko ispitanih topografskih i klimatskih parametara. Regresijska veza za prognozu maksimalnih godišnjih specifičnih protoka Q_M u ovisnosti o površini slivova A i efektivne oborine P_e, za velike slivove, je slična odgovarajućoj vezi izvedenoj za srednje i male slivove. Regresijske veze za prognozu maksimalnih godišnjih specifičnih protoka Q_M slivova na području bivše Jugoslavije su dobre. Najvažnije ispitane topografske i meteorološke veličine su prosječne godišnje oborine P i površine slivova A. Osim dvoparametarskih veza, za razmatrane regije je bilo moguće definirati i višeparametarske veze, primjerice ovisnost maksimalnih specifičnih protoka Q_M o veličini utjecajnoga sliva A i efektivne oborine P_e, $Q_M = f(A, P_e)$ i o srednjim godišnjim oborinama P, nagibom sliva I te prosječnom godišnjom temperaturom T, $Q_M = f(P, I, T)$. No unatoč tome, autori zaključuju da se ti rezultati ne mogu uzeti kao konačni, jer su potrebna daljnja istraživanja uz uključivanje i drugih hidroloških, topografskih i klimatskih parametara.

U monografiji u izdanju Hrvatskog hidrološkog društva Žugaj (1995), kojoj je prethodila doktorska disertacija Žugaj (1993), opisan je općenit postupak istraživanja, dan je pregled osnovnih podloga, ispitana je njihova pouzdanost, homogenost i duljina nizova razmatranih protoka. Opisani su i obrađeni karakteristični statistički parametri srednjih godišnjih i ekstremnih godišnjih protoka, njihovih koeficijenata varijacije c_v i asimetrije c_s te vrijednosti tih parametara za različite varijable; primjerice veličine sliva A, prosječne godišnje oborine koja padne na sliv P, prosječne godišnje efektivne oborine P_e, te specifični dotoci sa sliva q. Analizirano je 60 karakterističnih profila na 33 vodotoka (slika 2.3).

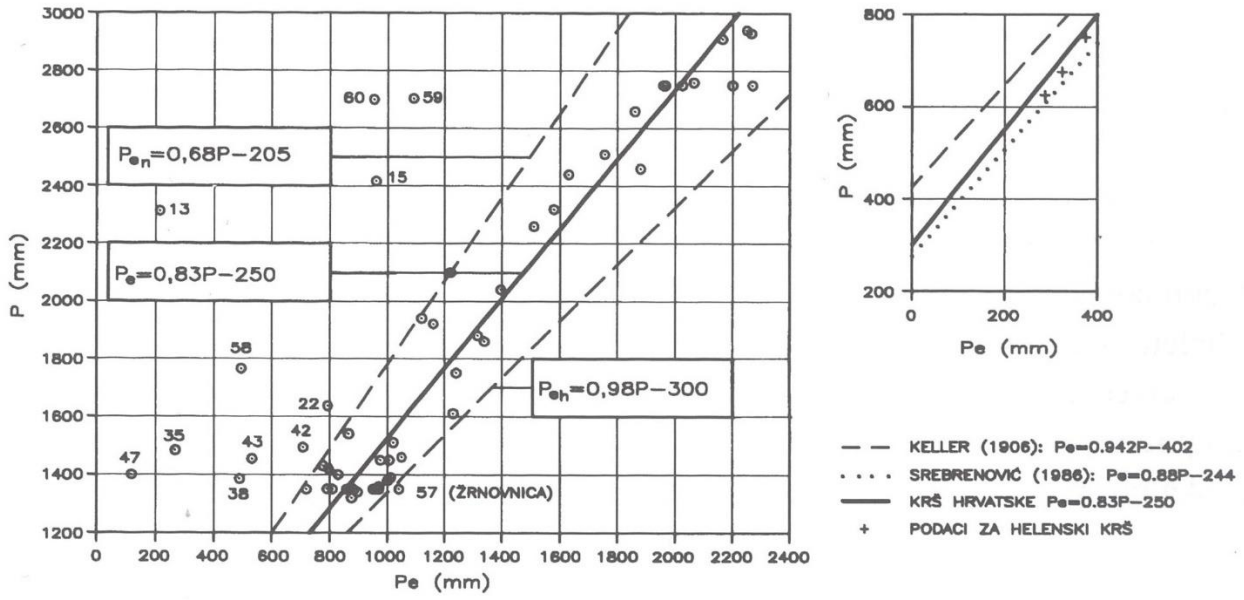


Slika 2.3 Područje Hrvatskoga krša ranije obrađenih 60 hidroloških stanica; crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Žugaj, 2015)

U razmatranoj monografiji analizirani su odnosi između 22 karakteristična parametra srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka iz razdoblja od 1951. do 1990. godine. Ispitano je 210 linearnih i 153 eksponencijalnih veza. Kakvoća tih veza ocijenjena je na temelju vrijednosti koeficijenta korelacije *r*, a smatra se da je korelacija čvrsta ako je $r \geq |0{,}80|$. Ukupno 36 veza imalo je smisla analizirati, a 25 od njih zadovoljava kriterij $r > 0{,}80$, dok je 11 veza s koeficijentom korelacije u granicama $r = 0{,}70 - 0{,}80$.

Histogrami karakterističnih parametara iz ove regionalne analize prikazani su i uspoređeni s odgovarajućim histogramima iz sadašnje obrade u poglavlju 6.

Vrlo visoki koeficijenti korelacije ustanovljeni su za veze $Q = f(A)$, $\sigma = f(Q)$, ali za koje je ujedno ustanovljeno veliko rasipavanje podataka od izvedenih zakonitosti, $\sigma = f(A)$, zbog vrlo velikog raspona tih podataka (omjer najmanjeg i najvećeg obrađenog sliva je 1:15.400, a omjer najmanje i najveće standardne devijacije je 1:2.040) pa zbog toga one nisu pogodne za praktičnu primjenu. Zanimljiva veza $P_e = f(P)$ prikazana je na slici 2.4, a izvedena je za slučajeve kada je koeficijent otjecanja na slivu $c > 0{,}50$. Granice vjerojatnog odstupanja s 95% pouzdanošću pokazuju prihvatljivo rasipavanje ulaznih podataka oko izvedene zakonitosti. Dobivena zakonitost $P_e = 0{,}83P - 250\ (mm)$ potvrđena je podacima za helenski krš (Soulios, 1984) i zakonitošću koju je izveo Srebrenović (1986) i prikazana je desno na slici 2.4.



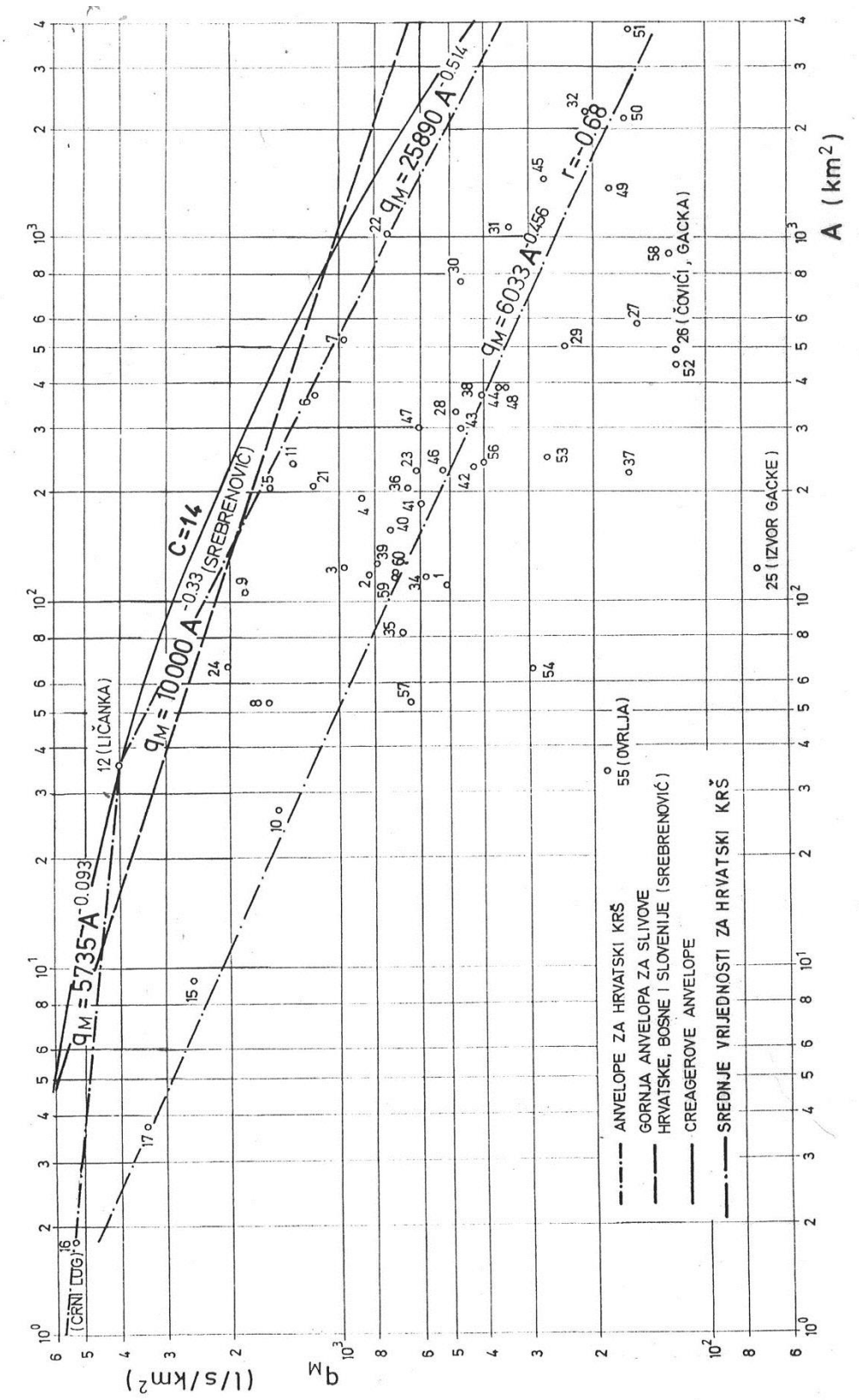
Slika 2.4 Prosječne godišnje efektivne oborine P_e i prosječne godišnje bruto oborine P (preuzeto iz Žugaj, 2015)

Karakteristični parametri maksimalnih godišnjih protoka razmatrani su na 53 homogena i dovoljno duga niza.

Za cijelo područje hrvatskoga krša nisu se mogle dobiti zadovoljavajuće zakonitosti maksimalnih zabilježenih specifičnih dotoka q_M u ovisnosti o veličini utjecajnih slivnih površina *A*. Osim zbog malih obraslih slivova Gorskoga kotara i Like s izraženim visokim površinskim dotocima, kod sliva sa značajnim podzemnim retencijama u zaleđu, redukcijski utjecaj podzemlja je jače izražen kod uzvodnih profila vodotoka kojima pripadaju manje površine izravnih slivova, a nizvodnim profilima veličine izravnih slivova rastu, pa raste i utjecaj površinskih dotoka. Utjecaj podzemnih i površinskih slivova se mijenja od sliva do sliva, pa i duž vodotoka, stoga su ti utjecaji uvjetovali neravnomjerne maksimalne specifične dotoke. Osim podzemnih retencija vode u zaleđima izvora, na smanjivanje maksimalnih dotoka utječu i površinske retencije u koje se voda izlijeva i izgrađene akumulacije. Također je dokumentirano da su na hidrološkim profilima s duljim razdobljima rada vodokaza, zbog povremenih očitavanja, opaženi maksimumi redovito manji od stvarnih, koji su zabilježeni na limnigrafima.

U regionalnoj analizi u kršu Hrvatske anvelopne linije maksimalnih specifičnih dotoka q_M u ovisnosti o veličini sliva *A* definirane su u ranijoj regionalnoj analizi iz 1995. godine (slika 2.5), a nadopunjene su 2015. godine (Žugaj, 2015). Karakteristično je da gornja anvelopa maksimalnih dotoka obuhvaća samo male slivove obrasloga krša i sliv Like bez podzemnih retencija. Veliki rasap podataka maksimalnih specifičnih dotoka q_M u ovisnosti o veličini utjecajne slivne površine *A* te pripadajuće anvelopne linije i srednji izraz $q_M = f(A)$ prikazan je na slici 2.5.

Karakteristični parametri minimalnih godišnjih protoka razmatrani su na 29 homogenih i dovoljno dugih nizova. Dobiveni rezultati o minimalnim godišnjim protocima odnose se samo na 48 posto ukupno obrađenih hidroloških profila u kojima ne dolazi do presušivanja korita. Za većinu dobivenih veza između parametara minimalnih dotoka svojstvena su velika odstupanja ulaznih podataka od izvedenih zakonitosti pa se te zakonitosti mogu koristiti samo orijentacijski.



Slika 2.5 Najveći zabilježeni specifični dotoci q_M i utjecajne slivne površine A (preuzeto iz Žugaj, 2015)

Analize veza više od dva parametra gdje su, uz uobičajene, ranije navedene parametre, još uključeni karakteristični uzdužni pad vodotoka i prosječna temperatura zraka, nije imalo smisla razmatrati jer su površinski vodotoci uglavnom kratki i često se nadovezuju na podzemne retencije, a za prosječne temperature zraka na krškim slivovima nema dovoljno podataka. Na temelju provedenih ispitivanja višeparametarskih veza, na osnovi raspoloživih podloga, ustanovljeno je da za razmatrano područje višeparametarske veze nemaju smisla.

Analizirana su bila i sušna razdoblja, iako je taj niz podataka od 10 godina u 38 posto slučajeva nehomogen u odnosu na ranije nizove. Zaključeno je da broj sušnih dana prosječno godišnje izrazito varira (od 2 do 178), njihovo standardno odstupanje, koeficijent varijacije i asimetrije ne mogu se na zadovoljavajući način aproksimirati normalnom raspodjelom, a same vrijednosti tih parametara jako variraju. Zbog svega navedenog, od 45 razmatranih veza postoje samo tri linearne veze kojima su koeficijenti korelacije $r > 0{,}80$. Kod eksponencijalne ovisnosti utvrđeno je šest veza koje ima smisla razmatrati.

Radovi na regionalnoj analizi u kršu Hrvatske uže su usmjereni i nastavljeni 1998. godine u projektu ***Regionalna analiza slivova Kupe i pritoka u kršu***, a istraživanja su prikazana kroz redovite izvještaje Žugaj i sur. (1998-2007). Analiza je provedena na 35 hidroloških profila na slivu rijeke Kupe, Dobre i Korane s Mrežnicom (prilog 2). Nastavno su prikazani najvažniji rezultati tog istraživanja, prvenstveno zbog toga jer je za ovu disertaciju provedeno najnovije istraživanje na tom području. U tom su istraživanju ustanovljene i dokumentirane značajne promjene u odnosu na ranije rezultate hidroloških i hidrogeoloških istraživanja.

U izvještaju iz 1998. godine posebna je pozornost posvećena provjeri ulaznih računskih podataka. Analizirana je kakvoća geoloških i hidrogeoloških te meteoroloških i hidroloških osnovnih podloga iz razdoblja obrade od 1951. do 1995. godine. Na osnovi provedenih ispitivanja homogenosti i trendova raspoloživih podataka iz Banke hidroloških podataka Državnog hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske (DHMZ RH) definirani su mjerodavni nizovi srednjih i ekstremnih godišnjih protoka. Definirano je utjecajno slivno područje Kupe pod kršem u početnoj fazi obrade. Zaključeno je da u daljnjoj fazi istraživanja treba detaljno razmotriti velik broj rezultata novih hidrogeoloških i geoloških istraživačkih radova.

U izvještaju iz 2001. godine definirana je i obrazložena veličina utjecajnih slivova do pojedinih razmatranih hidroloških profila. Uspoređeni su rezultati provedenih istraživanja s rezultatima regionalnih analiza provedenih za druga krška i nekrška područja. Definirane su baze hidroloških podataka. Izvedeni su općeniti zaključci i preporuke za daljnja istraživanja.

U izvještaju iz 2003. godine postignuta su poboljšanja u postavljanju razvodnica u slivu u odnosu na ranija istraživanja na osnovi provedene analize raspoloživih geoloških i hidrogeoloških podloga. Novom regionalnom analizom, temeljenom na iskustvima prethodnoga trogodišnjeg istraživanja od 1998. do 2000. godine, obuhvaćeni su nizovi hidroloških podataka iz razdoblja od 1951. do 2000. godine. Ispitana je homogenost nizova srednjih i ekstremnih godišnjih protoka i definirani su mjerodavni nizovi protoka, uzimajući u obzir pojavljivanja nehomogenosti - najčešće kod nizova srednjih godišnjih protoka.

U izvještaju iz 2004. godine razvrstane su razvodnice po njihovim svojstvima i određena su područja bifurkacije na osnovi objavljenih radova slovenskih istraživača s područja Snežnika na lokaciji Črna Draga. Popravljena je granica između plitkoga i dubokog krša. Razmatrane su linearne i nelinearne veze između pojedinih karakterističnih hidroloških parametara: 11 veza za srednje godišnje protoke, devet veza za maksimalne godišnje protoke i devet veza za minimalne godišnje protoke.

U izvještaju iz 2005. godine proširena su saznanja na osnovi novih hidrogeoloških podloga u odnosu na prethodne izvještaje, posebno na položaj razvodnice. Analizirana su nova saznanja o bifurkacijama. Razmatrana je pouzdanosti izvedenih zakonitosti veza, općenito i prema užim regijama unutar razmatranoga sliva Kupe.

U izvještaju iz 2007. godine, V. Jurak je proširio geološko-hidrogeološku podlogu kojom je sada zahvaćen cijeli krški prostor sliva Kupe i njezinih pritoka u odnosu na prethodne izvještaje. Može se računati s procjenom sliva Kupe i pritoka u kršu do profila Kamanje na Kupi, Stative Donje na Donjoj Dobri, Velemerić na Korani i Mrzlo Polje na Mrežnici od oko 5.820 km^2 (prilog 2). Od toga bi oko 1.150 km^2 bilo na slovenskoj strani sliva, s napomenom da se najveća varijabilnost površine očekuje upravo na slovenskoj strani - bifurkacije između Kupe i Krke u Sloveniji (Habič, 1989 i Habič i Kogovšek, 1992) te na području širokopojasne regionalne razvodnice između jadranskog i crnomorskog sliva, posebno zanimljive na području Gorskog

kotara (Risnjak i Snježnik), gdje se nalazi zajedničko područje prihranjivanja Rječine i izvorišta Kupe. Područja s bifurkacijama između slivova ima i u visokogorskim dijelovima slivova Korane i Mrežnice. Nastavljene su analize raspoloživih meteoroloških (oborinskih) i hidroloških podloga (srednji i ekstremni godišnji protoci) za sve stanice koje postoje u bazi podataka.

Temeljni je zaključak svih izvještaja iz razdoblja (1998.-2007.) da je analiza, osim na odnose između pojedinih karakterističnih hidroloških parametara, bila usmjerena na razmatranje položaja razvodnice i određivanje veličine sliva. Na taj su način iskorišteni rezultati velikoga broja do tada provedenih hidrogeoloških istraživačkih radova i sliv je definiran znatno pouzdanije, u odnosu na ranija provedena istraživanja. U ovoj je disertaciji razmatran sliv Korane do profila Veljun uzvodno od profila Velemerić, pa je zbog toga ukupno razmatrano slivno područje nešto manje i iznosi oko 5.450 km^2.

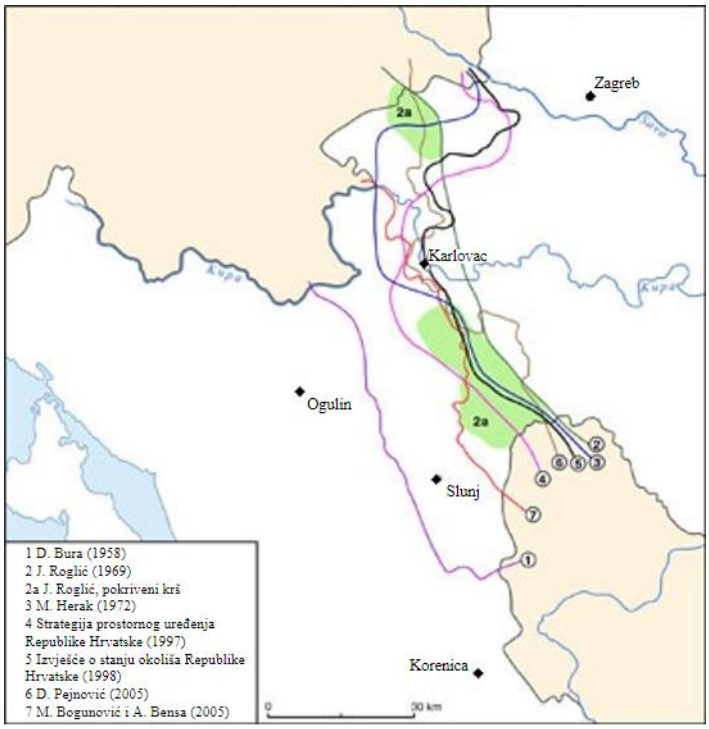
U hidrološkom dijelu doktorske disertacije R. Biondića (2005), analizirana je ranjivost krškoga vodonosnika na području gornjega dijela sliva Kupe. Izdvojeni su slivovi, određeni smjerovi tečenja podzemne vode te su analizirana stanja, kakvoća i količina istjecanja na izvorima.

U doktorskoj disertaciji D. Biondića (2005) provedena je regionalna hidrološka analiza karakterističnih parametara velikih voda na području crnomorskoga sliva u Hrvatskoj (sliv Drave i Dunava). Analizirana je velika količina podataka i informacija o prirodnim i društveno-gospodarskim uvjetima te o hidrološkim i hidrografskim obilježjima. Pritom je kod sliva Dunava obrađeno i područje krša, koji preko uzvodnih dijelova slivova Save i Kupe pripada slivu Dunava.

3. Opis istraživanog područja

3.1. Geografske značajke

Krško područje sliva Kupe i pritoka nalazi se u sjevernom dijelu krša Hrvatske, koji pripada obraslom kršu, a najvećim dijelom obuhvaća regiju Gorskog kotara. Na prilogu 1 prikazan je krški dio sliva Kupe, Gornje i Donje Dobre, Korane i Mrežnice i položaji razmatranih hidroloških profila, a na slici 3.1 prikazana je granica krša u Hrvatskoj prema različitim autorima. Granica označena brojem 7 (Bogunović i Bensa, 2005) se najbolje poklapa s granicom koja je dobivena u radu Žugaja i sur. (1998-2007) u prilogu 2.



Slika 3.1 Sjeverna granica krša u Hrvatskoj prema različitim autorima (preuzeto iz Matas, 2009)

Izvor Kupe nalazi se u planinskom dijelu Gorskog kotara kod mjesta Razloge koji se nalazi u sjeverozapadnom dijelu krša Hrvatske, u Nacionalnom parku Risnjak (slika 3.2). Već nakon stotinjak metara s desne strane prima vodu povremenog toka potoka Krašićevica, a malo poslije s lijeve strane povremenog toka potoka Sušice. Odmah gdje vodotok dolazi na granicu s Republikom Slovenijom je i lijevoobalni pritok Čabranka, a nešto dalje, izvan područja NP Risnjak je desnoobalni pritok Kupica. Nizvodno Kupa teče uz granicu Hrvatske i Slovenije gdje je ispresijecana mnogim slapovima koji su nekada služili za pogon vodenica i mlinova. Prije

Karlovca, Kupa prima lijevoobalni pritok Lahinju, kršku rijeku iz Slovenije. Neposredno poslije profila Kamanje napušta granicu i teče prema Ozlju i dalje prema Karlovcu, gdje prima svoje glavne pritoke Dobru prije, a Koranu s Mrežnicom nakon Karlovca. Kod Karlovca vodotok prelazi u nekrško područje koje nije predmet proučavanja ove disertacije. Sliv Kupe obuhvaća planinsko područje Gorskog kotara i zahvaća područje Republike Slovenije, a veličina sliva do profila Kamanje iznosi oko 2.340 km^2. Ukupna duljina Kupe od izvora do Karlovca je oko 160 km, a do njezina ušća u Savu 296 km.

Čabranka je granična rijeka između Hrvatske i Slovenije i prvi je veći pritok Kupe. Dugačka je 17,5 km, izvire kod Čabra pod planinom Obrh. Ona je gorska rijeka s tipičnim krškim izvorom kojemu protok ima velike varijacije minimuma i maksimuma.

Lahinja je jedini veći slovenski pritok Kupe. Ona je krška rijeka dugačka 33,4 km. Izvorište se sastoji od više krških izvora na kraju krške udoline kod Črnomelja između sela Knežina, Belčji Vrh i Mali Nerajec.

Slika 3.2 Izvor rijeke Kupe

Rijeka Dobra se sastoji od dvije odvojene cjeline: Gornje Dobre (ili Ogulinske Dobre) i Donje Dobre (ili Gojačke Dobre). Ukupne je duljine 105 km. Sliv Dobre zauzima široko prostranstvo u graničnom području Gorskog kotara i Like te obuhvaća površinu od oko 1.010 km^2 do profila Stative Donje.

Gornja ili Ogulinska Dobra izvire iz dva izvora: kod Bukova vrha i kod Skrada. Tipična je bujična rijeka s naglim promjenama protoka i prosječnog uzdužnog pada od 1,4%. Kod Vrbovskog se u Gornju Dobru ulijevaju pritoci Kamačnik i Ribnjak, a uzvodno od brane Bukovik nalazi se njezin najveći desnoobalni pritok Vitunjčica. Do 1957. godine u cijelosti je ponirala u Đulinom ponoru (slika 3.3) nakon čega je izgradnjom hidroelektrane Gojak preljevnom branom skrenuta u sustav koji napaja turbine HE Gojak te je stvoreno umjetno jezero Bukovnik. Samo za vrijeme velikih kiša na uzvodnom slivu, korito od brane do Đulinog ponora je ispunjeno vodom koja se prelijeva preko brane Bukovnik. Duljina toka Gornje Dobre od izvora do Đulinog ponora je 53 km.

Slika 3.3 Đulin ponor u Ogulinu

Đulin ponor i špilja Medvedica su špiljski sustav s vodoravnom duljinom kanala od 16.396 metara. Visinska razlika između najviše i najniže točke je 83,5 metara. Špiljski sustav podijeljen je u tri glavna dijela. Prvi dio čini labirint kanala između Đulinog ponora i ulaznog dijela špilje Medvedice koji je od ulaza u Đulin ponor udaljen 310 metara. Tijekom niskih vodostaja Dobre, ovaj dio špilje je suh. Također, ovaj dio špilje je neka vrsta filtera rijeke Dobre i uzrok poplava pri visokim vodostajima kada se špilja začepi i propusna moć se smanji. Drugi dio špiljskog sustava zove se Velika pletenica u kojem se nalazi glavni kanal u smjeru sjevera. Ovaj dio špilje je najizduženiji i sastoji se od nekoliko jezera i vodopada i poprilično je onečišćen. Treći dio špiljskog sustava čini nekoliko velikih kanala u smjeru jugozapad-sjeveroistok.

Gornja Dobra prije HE Gojak prolazi kroz akumulacijsko jezero Bukovnik na kraju kojeg je, lijevo od brane Bukovnik, zahvat vode za HE Gojak. Nakon izlaska voda Gornje Dobre i Zagorske Mrežnice iz HE Gojak, ostvaruje se Donja Dobra ili Gojačka Dobra. Ona protječe dubokim kanjonima s nepristupačnim obalama i visokim i strmim liticama. Nizvodno od mosta u Trošmariji nastavlja se teško pristupačan klanac dužine 13 km. Izgradnjom HE Lešće 2010. godine, u nizvodnom dijelu, veliki dio ovog klanca je postao akumulacijsko jezero. Duljina toka Donje Dobre do ušća u Kupu je 52 km.

Sliv rijeke Korane do profila Veljun obuhvaća površinu od oko 1.100 km^2 i može se podijeliti na više odvojenih cjelina: sliv Plitvičkih jezera, sliv potoka Plitvice i Ličke Jasenice, dio rijeke između Plitvičkih jezera i Drežnik Grada, dio rijeke između Drežnik Grada i Koranskog Luga, dio rijeke između Slunja i Barilovića i Korana nizvodno od Barilovića. Rijeka Korana nema vlastiti krški izvor, već nastaje prelijevanjem iz Plitvičkih jezera i potoka Surduka i Plitvice. Desni pritoci su Toplica i Mutnica, a kod Slunja se u Koranu ulijeva Slunjčica. Rijeka Radonja se u Koranu ulijeva uzvodno Karlovca, međutim sliv rijeke Radonje se ne nalazi u kršu te nije obuhvaćen ovim radom. Ukupna duljina toka Korane do ušća u Kupu je 142 km.

Rijeka Mrežnica izvire u planinskom području kod Slunja ispod Popović vrha. Svojim tokom prolazi kroz plitki krš koji čine jurski i kredni vapnenci, a oni su tektonski jako poremećeni i podložni riječnim procesima. Dolina Mrežnice duga je 71,4 km i najvećim je dijelom kanjonskog tipa. Od izvora do naselja Belavići prevladava dubinska erozija, dok je nizvodno do ušća u Koranu dominantna bočna erozija. Dubinska erozija je usporena ili skroz prekinuta zbog stvaranja sedrenih barijera, kojih ima 93. Sedrene barijere nejednoliko su raspoređene, tako da se na duljini od pet

kilometara od Čićinog mosta do Tržićkog mosta nalazi čak 26 barijera, dok se isto toliko nalazi na duljini od 39 km, od Generalskog stola do ušća u Koranu. Sliv Mrežnice se velikim dijelom nalazi u uskom pojasu između rijeke Dobre na zapadu i Korane na istoku te obuhvaća površinu od oko 1.000 km^2 do profila Mrzlo Polje. Neposredno prije Karlovca, Mrežnica se ulijeva u Koranu.

3.2. Hidroelektrane na krškom porječju Kupe i pritoka

Na krškom slivu Kupe i pritoka u Hrvatskoj nalaze se četiri hidroelektrane (Ozalj, Gojak, Zeleni vir i Lešće) i dvije male hidroelektrane (Čabranka i Kupica) te slivne površine s kojih voda dolazi u HE Vinodol i CHE Fužine i Lepenica, koje se nalaze na jadranskom slivu.

Hidroelektrana Ozalj je protočno-pribranska elektrana smještena na rijeci Kupi u njenom srednjem toku kod grada Ozlja. Sastoji se od dvije odvojene elektrane, HE Ozalj I i HE Ozalj II. HE Ozalj I smještena je na desnoj obali rijeke Kupe, a nasuprot njoj na lijevoj obali smještena je HE Ozalj II. HE Ozalj I je jedna od najstarijih hidroelektrana u Hrvatskoj i najstarija u kontinentalnom dijelu Hrvatske. Izgrađena je 1908. godine pod imenom „Munjara grada Karlovca“ za potrebe rasvjete grada Karlovca. HE Ozalj I izgrađena je u neoklasicističkom stilu i izvanredan je primjer industrijske arhitekture s početka dvadesetog stoljeća (slika 3.4).

Slika 3.4 Odvodni kanal HE Ozalj I

Hidroelektrana Gojak (slika 3.5) je visokotlačno derivacijsko postrojenje u blizini grada Ogulina, koja koristi vode Gornje (Ogulinske) Dobre i Zagorske Mrežnice. Na mogućnost energetskog korištenja tih dviju rijeka ukazali su značajni srednji godišnji protoci i činjenica da obje rijeke nakon poniranja i kratkog podzemnog toka izviru kao stalni vodotoci (Gojačka Dobra i Zvečajska Mrežnica), pri čemu na tom podzemnom putu prevaljuju visinsku razliku od 130 metara. Zagorska Mrežnica zahvaćena je nasutom branom visine devet metara kod mjesta Sabljaci gdje je formirano i akumulacijsko jezero volumena 3,3 milijuna kubičnih metara. Ogulinska Dobra pregrađena je betonskom branom Bukovnik visine 13 metara gdje je akumulacijsko jezero Bukovnik. Elektrana Gojak je puštena u pogon 1959. godine.

Slika 3.5 Zgrada strojarnice HE Gojak

Hidroelektrana Zeleni Vir je visokotlačno derivacijsko postrojenje smješteno kraj Skrada u Gorskom kotaru (slika 3.6). Elektrana koristi vodu potoka Curak na padu od oko 50 m. Zahvat vode za elektranu izveden je u špilji Zeleni Vir gdje je i izvor potoka Curak (slika 3.7). Tamo se nalazi brana s ulaznim uređajem u dovodni kanal postrojenja. Izdašnost izvora Curak varira od 1,00 do 30,0 m^3/s, ovisno o sezoni. Strojarnice HE Zeleni Vir izgrađena je u stilu industrijske arhitekture 1921. godine.

Slika 3.6 HE Zeleni Vir

Slika 3.7 Zahvat vode u špilji Zeleni Vir

Hidroelektrana Lešće je akumulacijsko protočna elektrana smještena na Donjoj Dobri kod sela Gorinci u Karlovačkoj županiji i prva je hidroelektrana izgrađena u Republici Hrvatskoj od njenog

osamostaljenja. Izgradnja je počela 2005. godine, a u pogon je puštena 2010. godine. Akumulacijsko jezero je volumena 25,7 milijuna kubičnih metara i duljine 12,61 km.

Na rijeci Čabranki, koja teče duž granice s Republikom Slovenijom, a izvire ispod istočnih padina Risnjaka te nakon 12 km utječe u rijeku Kupu kod mjesta Osilnica, nalazi se MHE Čabranka u sklopu koje je planirana izgradnja 10 malih hidroelektrana u nizu. Svih 10 malih elektrana bi trebale biti protočnog tipa i biti smještene duž toka Čabranke, počevši od izvora, gdje bi bila prva u nizu mala hidroelektrana, pa do 6.600 m nizvodno od Čabra, gdje bi bila deseta u nizu mala hidroelektrana.

Na rijeci Kupici, koja izvire istočno od Delnica u Gorskom kotaru te nakon 4 km utječe u rijeku Kupu kod Broda na Kupi, planirana je izgradnja MHE Kupica koja bi se sastojala od dvije male hidroelektrane. Obje elektrane bi bile protočnog tipa, prva bi se nalazila 2.000 m uzvodno od Broda na Kupi a druga kod Broda na Kupi.

U tablici 3.1 prikazana je instalirana snaga najznačajnijih hidroenergetskih postrojenja na slivu Kupe: Ozalj, Gojak, Zeleni vir i Lešće.

Tablica 3.1 Instalirane snage hidroelektrana i značajnih malih hidroelektrana na slivu Kupe

Elektrana	Instalirana snaga (MW)
HE Ozalj I	3,3
HE Ozalj II	2,2
HE Gojak	48
HE Zeleni vir	1,8
HE Lešće	42,3
Ukupno	97,6

Hidroenergetski sustav Vinodol obuhvaća vodotoke koji se nalaze na krškom dijelu sliva Kupe i obuhvaćaju sliv veličine 80,8 km^2.

3.3. Geološke i hidrogeološke značajke

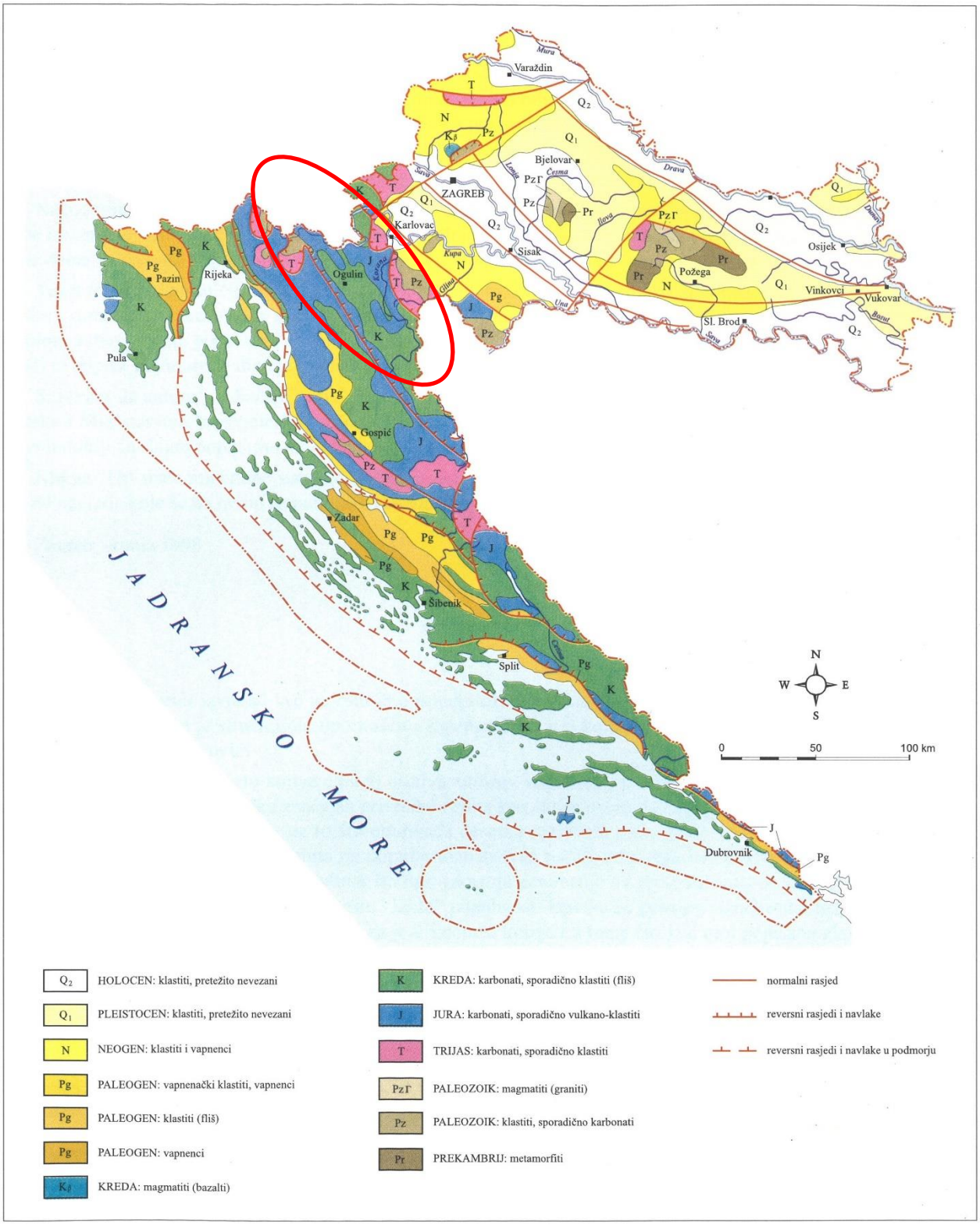
Istraživano područje sliva rijeke Kupe i njezinih pritoka izgrađeno je od naslaga paleozojske do kvartarne starosti (slika 3.8). Za prikaz geoloških odnosa krškog slivnog područja Kupe korištene su geološke karte i pripadajući tumači koje su izradili Šušnjar i sur. (1963), Velić i sur. (1970), Polšak i sur. (1967a), Korolija i sur. (1968 i 1972a), Velić i Sokač (1980), Savić i Dozet (1983a), Bukovac i sur. (1983a), Pleničar i Premru (1970a), Šikić i sur. (1972a), Bukovac i sur. (1983b), Korolija i sur. (1968 i 1972b), Pleničar i Premru (1970b), Polšak i sur. (1967b), Savić i Dozet (1983b), Sokač i sur. (1970), Šikić i sur. (1972b), Grimani i sur. (1963) i Velić i sur. (1980).

Stijene paleozoika su najstarije naslage ovog vodnog područja. Na površini ih se nalazi unutar sliva rijeke Čabranke, te na području Malog Luga, izvorišta rijeke Kupe, Gerova, Lokvarskog jezera, Delnica, sjeverno od Ravne Gore, zapadno od Stare Sušice, na sjever do Kupe i preko nje u Republiku Sloveniju do Kočevske Reke i istočno od Kači potoka.

Litološki su to glineni škriljavci, pješčenjaci, kvarcni konglomerati, šejlovi, siltiti, a vrlo rijetko vapnenci i dolomiti. Nepropusnost ovih stijenskih masa uvjetovalo je površinsko otjecanje oborine te gustu mrežu površinskih tokova, primjerice gornji tok rijeke Kupe i tok rijeke Čabranke. Gornja Dobra također počinje kao površinsko otjecanje u klastitima te do Vrbovskog prima pritoke Kamačnik i Ribnjak koji se prihranjuju vrlo jakim krškim izvorima.

Mezozojske naslage na površini promatranog područja predstavljene su uglavnom karbonatima. Naslage ovog tipa rasprostiru se od Gorskog kotara, dijela Like, Korduna te od Ogulina do Karlovca. Zbog propusnosti karbonatnih stijenskih masa, rijeke na ovom području poniru i dijelom teku podzemnim tokovima te se opet pojavljuju i teku površinskim tokom (Gornja Dobra kod Ogulina, Mrežnica, Korana), tako da hidrografska mreža nije bogata.

Trijaske naslage okružuju paleozojske sedimente u Gorskom kotaru, Plitvičkim jezerima, Petrovoj gori, južno od Karlovca i južne padine Žumberačkog gorja. Trijaske naslage predstavljene su klastitima: lapori, pješčenjaci, siltiti, konglomerati, šejlovi, amfibolski porfiriti, tufovi i rožnjaci, i karbonatima: vapnenci, dolomiti i njihovi varijeteti.



Slika 3.8 Geološka karta Hrvatske; crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Marković, 2002, autori karte: I. Velić i J. Velić)

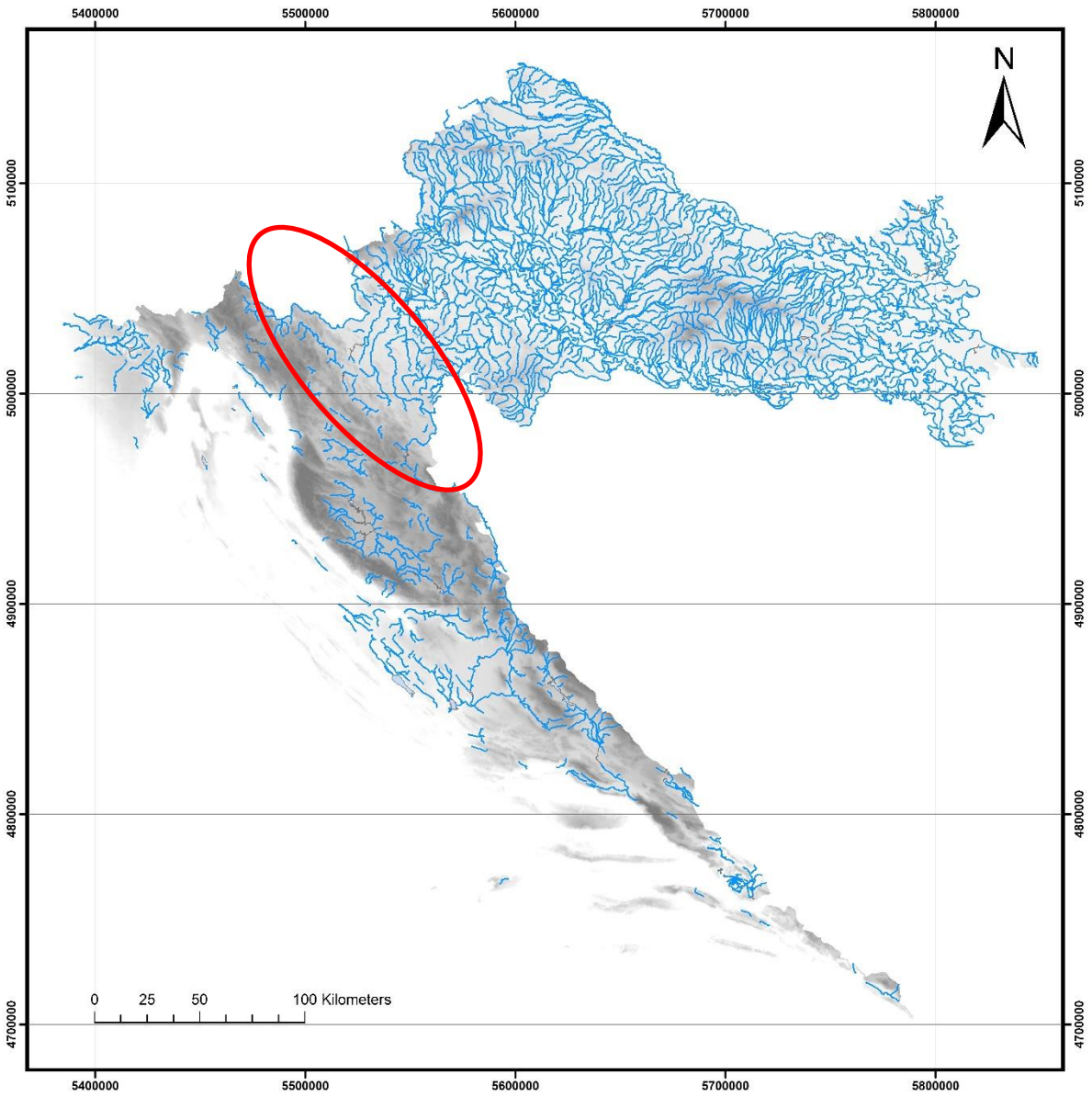
Jurske naslage izgrađuju veliki dio istraživanog područja, od Gorskog kotara, gdje okružuju trijaske naslage, izgrađuju Malu i Veliku Kapelu i Ogulinsko područje, te zapadno od Karlovca pa sve do Žumberka, predstavljene su isključivo karbonatima (vapnenac i dolomit).

Kredne naslage su ustanovljene na Velikoj i Maloj Kapeli, Plješevici, u području Ogulina i Karlovca te na južnim obroncima Žumberka. Uglavnom su to karbonatne stijene dok su klastične stijene (gornjokredni fliš) ustanovljene istočno i jugoistočno od Veljuna te sjeverno od rijeke Kupe, na liniji Ozalj-Metlika-Sveta Gera.

Paleogenske i neogenske sedimente nalazimo sjeverno i zapadno od Bihaća, kod Brinja, sjeverozapadno od Modruša, kod Gornje Dubrave i potoka Tounjskog, Perjasice, od Petrove gore do Karlovca i Ozlja. U spomenutim područjima razvijene su uglavnom klastične naslage (lapori, gline, siltovi, pješčenjaci, breče, konglomerati) i rijetko vapnenci.

Kvartarne naslage predstavljene su nevezanim sedimentima u dolinama rijeka i potoka, jezera i barskih sredina uglavnom u području Karlovca.

Na slici 3.9 prikazana je hidrografska mreža na području Republike Hrvatske. Iz nje je vidljivo da okršeni dio Republike Hrvatske ima vrlo malo površinskih tokova, dok područje s međuzrnskom poroznošću ima razvijenu površinsku mrežu tokova.



Slika 3.9 Hidrografska mreža na području Republike Hrvatske; crvenom elipsom je označeno područje istraživanja

U hidrogeološkom smislu područje obuhvaćeno ovim radom (krško porječje Kupe) treba razdvojiti u dvije osnovne cjeline. To su visoko planinsko područje specifičnog krškog režima i zaravnjeni krški plato, tzv. plitki krš. Najveći površinski vodotok je Kupa, koja se kanjonom probija kroz visoko planinsko područje, dok njene glavne pritoke Dobra, Mrežnica i Korana započinju krškim izvorima na kontaktu planinskog područja i platoa. Planinsko područje ima tipične krške hidrogeološke značajke, a razvodnica prema slivu Jadranskog mora vezana je za antiklinalne forme unutar Dinarika.

U slivu rijeke Dobre treba razlikovati tri odvojene cjeline: Ogulinska Dobra, Zagorska Mrežnica i Gojačka Dobra. Ogulinska Dobra započinje kao površinsko otjecanje s klastita paleozojske starosti na području Skrada i Donje Dobre. Takove značajke zadržava do Vrbovskog. Nizvodno prima vrlo jake pritoke Kamačnik i Ribnjak, koji se prihranjuju vrlo jakim krškim izvorima. Utvrđena je njihova povezanost s ponorima u Ravnoj Gori i Mrkoplju, što govori u prilog alohtonog položaja paleozojskih klastita. Za isti karbonatni masiv vezan je i izvor Vitunj, koji utječe u Dobru uzvodno od akumulacije Bukovik. Zagorska Mrežnica u prirodnim uvjetima prihranjuje i Gojačku Dobru i Mrežnicu, međutim zbog prevođenja vode tunelom na strojarnicu Gojak svrstana je u sliv rijeke Dobre. Krško izvorište Zagorske Mrežnice prihranjuje se iz prostranog planinskog područja Velike Kapele i Bjelolasice na sjeverozapadu do nivoa Brinja na jugoistoku. Gojačka Dobra je prirodni nastavak Ogulinske Dobre nakon kraćeg toka vode kroz podzemlje. Koritom Dobre otječu sve vode koje prođu strojarnicom HE Gojak, pa daljnji protok ovisi o radu hidroelektrane. Nizvodno od Trošmarije sliv se bitno suzuje, pa rijeka iako zadržava funkciju drena nema značajnijeg prinosa vode u tom dijelu.

Sliv rijeke Mrežnice može se u hidrogeološkom smislu podijeliti u tri cjeline: planinski dio sliva sa zonom izviranja na nivou Plaškog, zatim podzemni tok između zone poniranja Dretulje i izvorišta Mrežnice i Tounjčice, te Mrežnica nizvodno od ušća Tounjčice. Planinski dio je glavno priljevno područje. Središnji položaj zauzima Dabarsko polje povezano s izvorima kod Plaškog. Jeseničko polje ima periferan položaj u odnosu na sliv Mrežnice, a pripada osim slivu Mrežnice i slivu Slunjčice kod Slunja. Izvorišta Vrnjika, Dretulja i Begovac formiraju vodotok Dretulju, koji teče preko dolomitne podloge površinski, a onda ponire u dobro propusnim vapnencima. Vode se ponovo javljaju na izvorima Donje Mrežnice i Suvaće. Nizvodno od Juzbašića na Donjoj Mrežnici se pridružuje i dio voda Zagorske Mrežnice, koje izviru kao Tounjčica, Kukača i Rudnica. Nizvodno od ušća Tounjčice sliv rijeke Mrežnice se suzuje, s time da je dinamika vode vezana za usječeni kanjon rijeke.

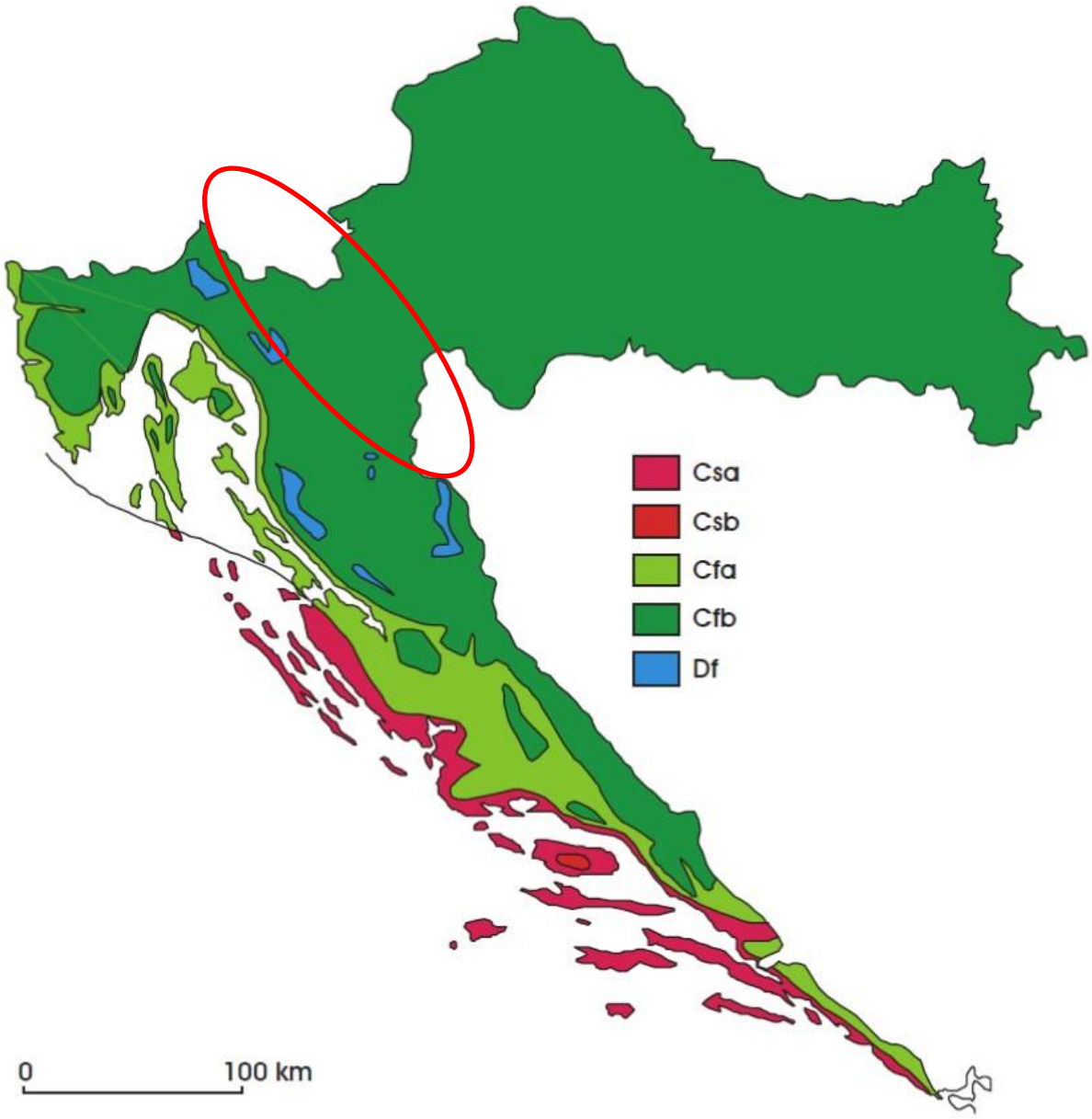
Sliv rijeke Korane može se podijeliti u više odvojenih cjelina: sliv Plitvičkih jezera, sliv potoka Plitvice i Ličke Jasenice, dio rijeke između Plitvičkih jezera i Drežnik Grada, dio rijeke između Drežnik Grada i Koranskog Luga, dio rijeke između Slunja i Barilovića i Korana nizvodno od Barilovića. Plitvička jezera su prostorno vezana za antiklinalnu formu Male Kapele, a istjecanje je najvjerojatnije vezano za duboke retencijske prostore u podlozi navlačnih struktura. Potok Plitvica

ima sliv prema Ličkoj Jasenici prema kojoj se drenira samo dio voda iz tog područja. Rijeka Korana između Plitvičkih jezera i Drežnik Grada gubi veliki dio vode. Poniranje započinje uzvodno od mosta prema Plitvicama, a gubici se zapažaju duž cijele ove dionice. Pretpostavlja se da dio vode podzemno otječe prema izvorištu Klokot kod Bihaća (sliv rijeke Une). Nizvodno od mosta gdje cesta za Bihać presijeca Koranu ponovo se formira stalni tok izviranjem u koritu rijeke. Od Koranskog Luga do Slunja rijeka ponovo presijeca dobro propusne karbonatne stijene i vrlo vjerojatno se manji dio vode gubi u krškom podzemlju s vjerojatnim otjecanjem prema Crnom vrelu u sliv rijeke Gline. Slunjčica je lijeva pritoka Korane u Slunju. Sliv izvora Slunjčice je prema Ličkoj Jasenici i Rakovici, a nije isključena i veza s ponorima Korane uzvodno od mosta. Nizvodno od Slunja sliv Korane se bitno suzuje i rijeka ima funkciju drena što potvrđuju brojni izvori uz korito rijeke.

3.4. Klimatološke značajke

Prema *Köppenovoj klasifikaciji klime* (slika 3.10), područje Gorskog kotara pripada kontinentalnoj klimi s oznakom *Cfb* (umjereno toploj vlažnoj klimi s toplim ljetom) i naziva se još i klimom bukve, a po užoj klasifikaciji područje gdje se nalaze hidrološke stanice Kupari i Hrvatsko na Kupi i Zamost 2 na Čabranki u nizinskom dijelu Gorskog kotara, pripada klimi s oznakom *Cfsbx* (promjenjivo topla vlažna klima) (Šegota i Filipčić, 2003). Oborina je jednoliko raspoređena kroz godinu, ali je nešto sušnije ljetno razdoblje (srpanj i kolovoz). Maksimum količine oborine koji se pojavljuje početkom toplog dijela godine u lipnju pridružuje se maksimumu u kasnoj jeseni u studenom, koji je veći od prvog maksimuma.

Nizvodno područje sliva do profila Kamanje na Kupi također pripada kontinentalnoj klimi (*Cfb*), ali nešto drukčijih svojstava s oznakom *Cfwbx* (umjereno topla vlažna klima). Oborina je jednoliko raspoređena kroz godinu, ali je nešto sušniji hladniji dio godine. Glavnom maksimumu količine oborine koji se pojavljuje u toplom dijelu godine u lipnju pridružuje se niži maksimum u kasnoj jeseni u studenom.



Slika 3.10 Geografska raspodjela klimatskih tipova po W. Köppenu u Hrvatskoj u standardnom razdoblju (1961.-1990.): Cfa, umjereno topla vlažna klima s vrućim ljetom; Cfb, umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom; Csa, sredozemna klima s vrućim ljetom; Csb, sredozemna klima s toplim ljetom; Df, vlažna borealna klima; crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Šegota i Filipčić, 2003)

3.5. Oborine na slivu Kupe u kršu

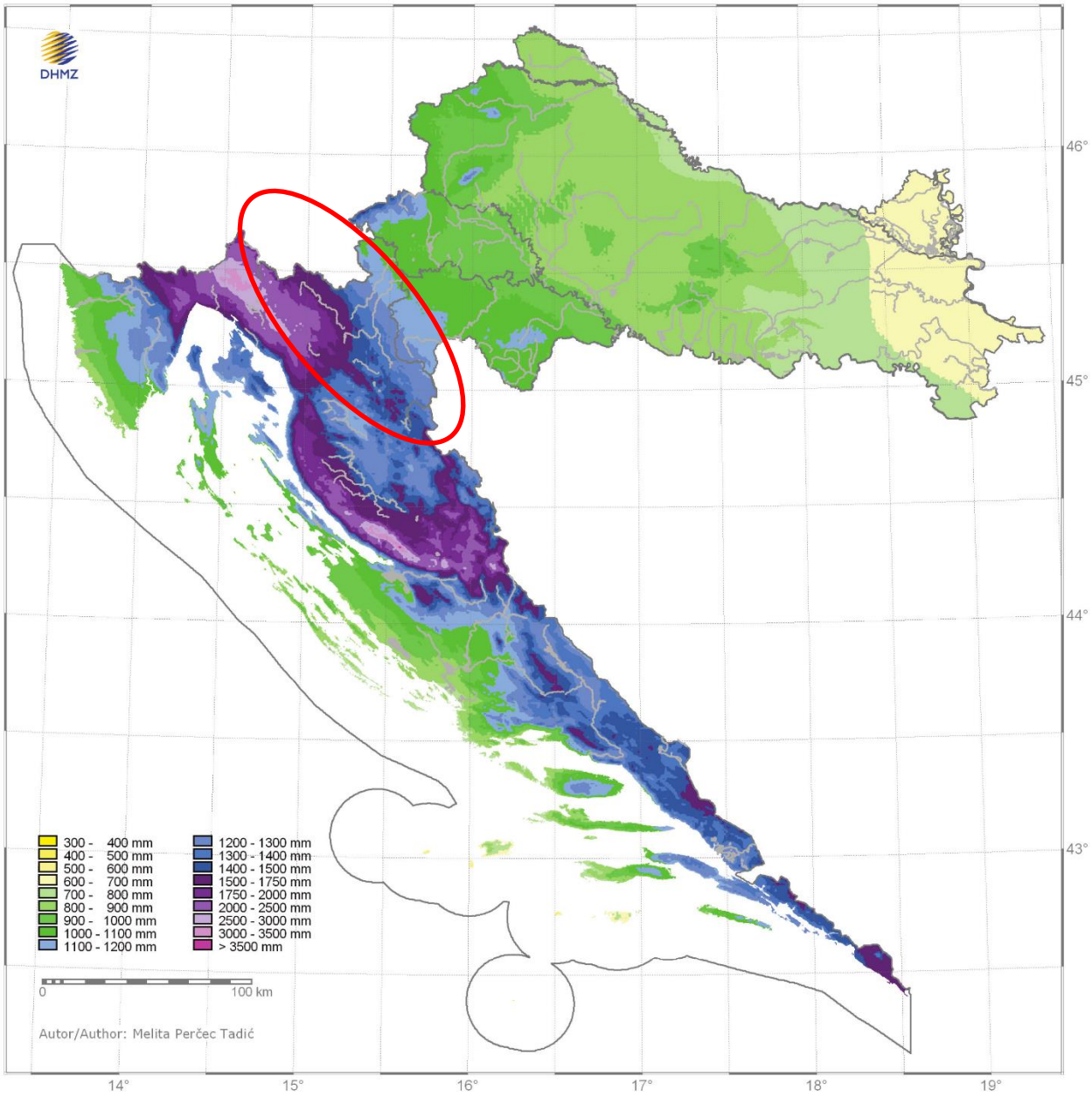
Oborina je meteorološki čimbenik koji najvećim dijelom određuje otjecanje s nekog područja. Količina i učestalost oborine ovisi o vlažnosti zračne mase, smjeru i intenzitetu zračne struje, ali i o vertikalnoj komponenti njezinog gibanja. Lokalni čimbenici koji mogu izmijeniti proces razvoja oblaka, a time i stvaranje oborine posebno su prisutni u Hrvatskoj. Primjerice, odnos kopna i mora, odnosno udaljenost pojedinih lokacija od mora, razvijena orografija Dinarida (u području ove disertacije je to planina Velebit), koja je prepreka maritimnim zračnim masama s Jadranskog mora na kopno, ali isto tako i kontinentalnim zračnim masama prema Jadranu. Planine i manja brda prisiljavaju zračne mase na uzdizanje pri čemu dolazi do povećane kondenzacije i intenziviranja oborine. Svi ovi faktori utječu na režim promjene količine oborine s nadmorskom visinom i zbog toga postoje različiti vertikalni gradijenti oborine na malim horizontalnim udaljenostima (Zaninović i sur., 2008). Količina oborine se mjeri kao visina stupca vode koji se istaloži padanjem iz oblaka ili kondenzacijom uz tlo na horizontalnu plohu jedinične površine u nekom vremenu, s tim da se ne uzimaju u obzir gubici isparavanjem.

Prosječna godišnja količina oborine na području Republike Hrvatske je u rasponu od 300 mm do malo iznad 3.500 mm. Najmanja količina padne na vanjskim otocima srednjeg Jadrana (Palagruža, 311 mm). Najveće godišnje količine oborine padnu u Gorskom kotaru te na Velebitu i na sjeveroistočnim obroncima Konavoskog polja (od 3.000 mm do 3.700 mm).

Niže goransko područje, u najuzvodnijem dijelu sliva Kupe kojemu pripadaju hidrološke stanice Kupari i Hrvatsko na Kupi, posebno se ističe velikom količinom oborine, što je posljedica blizine Jadranskog mora i dinamičnog reljefa, a znatno manjom količinom na slivu Čabranke do profila Zamost 2 (Žugaj i sur., 2011). Glavnina oborine je u hladnijem dijelu godine (maritimni maksimum od listopada do ožujka), a riječ je o oborinama ciklonalnog porijekla koju donose zapadni vjetrovi (Penzar i sur., 2001). U proljeće i početkom ljeta oborine su konvektivne.

Gorski kotar je u blizini ciklogenetičkog područja sjevernog Jadrana i Đenovskog zaljeva koje daje obilne oborine pojačane orografskim utjecajem planinskog zaleđa duž primorja. Na tom području na maloj horizontalnoj udaljenosti količina oborine se naglo povećava s nadmorskom visinom na navjetrini od obale do Risnjaka i Snježnika. Najveće godišnje količine oborine u Gorskom kotaru, a time i u Hrvatskoj izmjerene su na stanicama Lividraga (3.728 mm), Žilavi

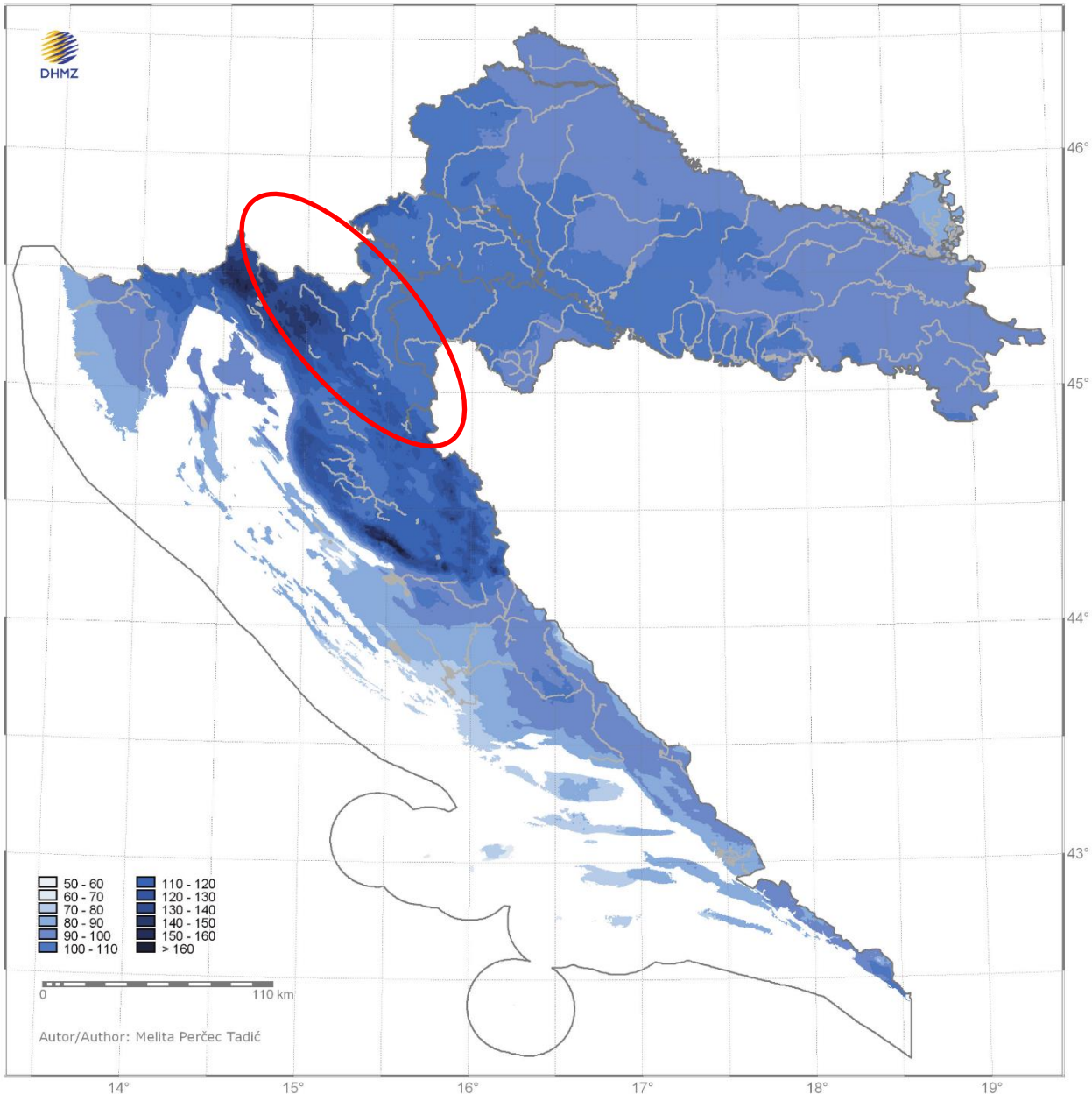
Dolci (3.522 mm), Risnjak (3.449 mm) i Snježnik (3.302 mm). U unutrašnjosti Gorskog kotara oborina se smanjuje (Parg, 1.849 mm) (slika 3.11).



Slika 3.11 Srednja godišnja količina oborine u Hrvatskoj za razdoblje (1971.-2000.); crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Zaninović i sur., 2008)

Oborine su jednoliko raspoređene tijekom cijele godine, s glavnim jesenskim maksimumom srednjih mjesečnih oborina u listopadu i studenom (210 mm) i manjim maksimumom u lipnju (155 mm).

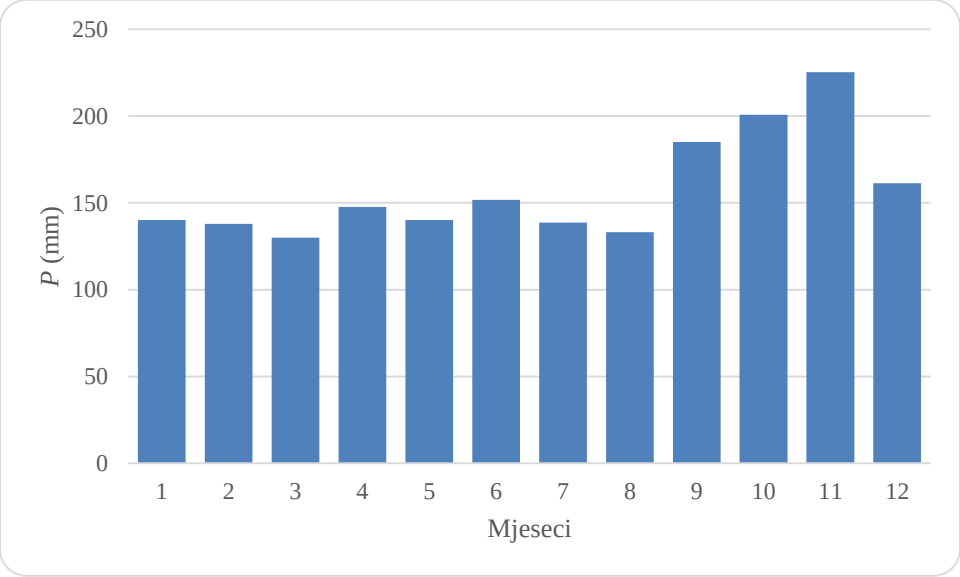
Ukupne godišnje količine oborine na slivu Čabranke do profila Zamost 2 su oko 1.000 mm manje nego u preostale dvije goranske meteorološke stanice koje se nalaze u podnožju planine Risnjak, što upućuje na izraziti orografski efekt, a ima izravan utjecaj na dotoke Čabranke (procijenjeno iz karte izohijeta). Prosječan broj dana godišnje s količinom oborine većom od 1 mm prikazan je na slici 3.12.



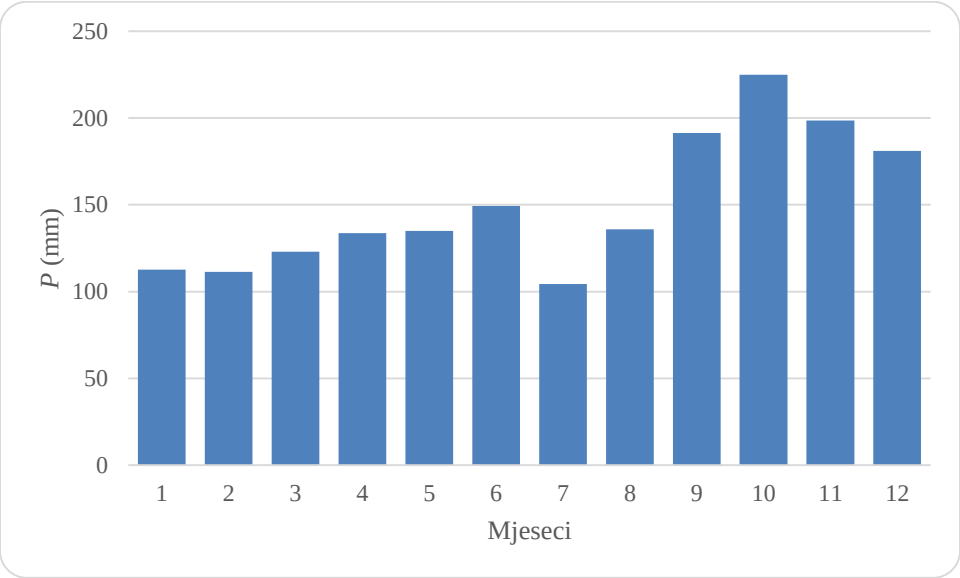
Slika 3.12 Srednji godišnji broj dana s količinom oborine ≥ 1 mm u Hrvatskoj za razdoblje (1971.-2000.); crvenom elipsom je označeno područje istraživanja (preuzeto iz Zaninović i sur., 2008)

Razmatrano područje sliva Kupe i pritoka u kršu obiluje snijegom koji se prosječno zadržava na tlu do 40 dana godišnje. Kumulativno ga padne oko 300 cm, a prosječna je visina snijega tijekom srednjeg broja dana sa snijegom oko 50 cm. Najviše snježnih oborina ima u siječnju i veljači.

Sliv Kupe nizvodno od Broda na Kupi ima manje oborine nego u Gorskom kotaru, ukupno godišnje oko 1.900 mm (slika 3.12). Godišnji hod oborine je sličan hodu u Gorskom kotaru, ali s nešto nižim vrijednostima. U studenom je najveća prosječna količina oborine od 116 mm, a u lipnju je drugi maksimum od 100 mm. Najmanja količina oborine izmjerena je u ožujku (63 mm). Srednje mjesečne količine oborine *P* za razdoblje (1951.-1980.) i (1981.-2012.) na stanici Parg prikazane su na slikama 3.13 i 3.14.

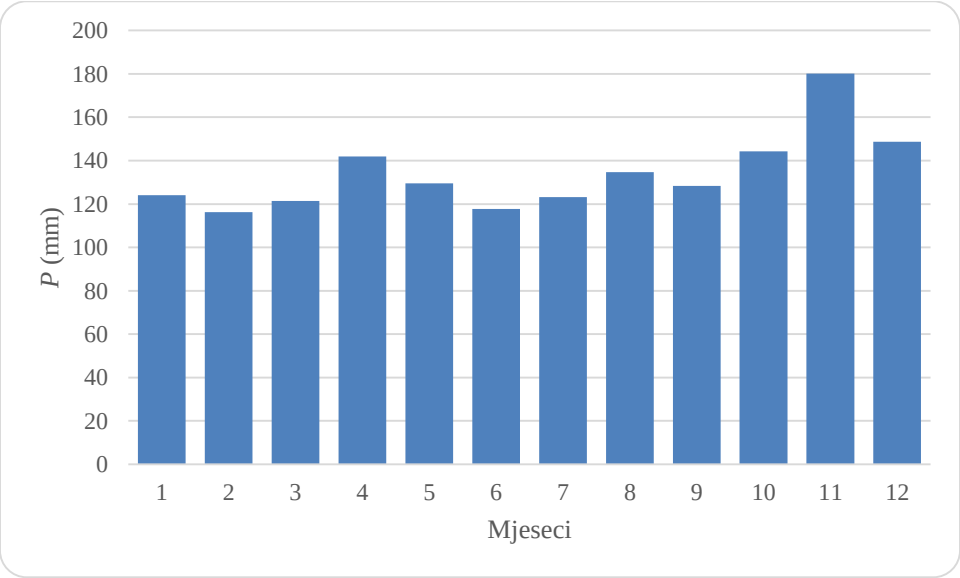


Slika 3.13 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Parg u razdoblju (1951.-1980.)

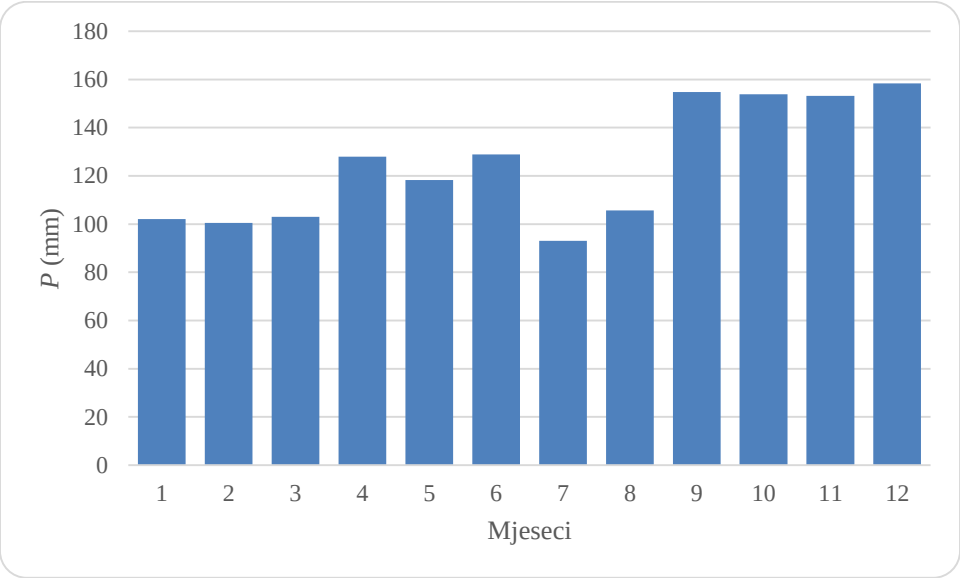


Slika 3.14 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Parg u razdoblju (1981.-2012.)

Srednja godišnja količina oborine na stanici Parg u razdoblju (1951.-1980.) je 1.885 mm a u razdoblju (1981.-2012.) je 1.801 mm, što je 4,5% manje u odnosu na ranije razdoblje. Osim manje srednje godišnje količine oborine u novijem razdoblju, na slici 3.13 je izražen minimum u mjesecu srpnju kojeg u ranijem razdoblju nije bilo te je varijabilnost srednjih mjesečnih oborina tijekom godine veća u novijem razdoblju. Na slikama 3.15 i 3.16 prikazane su srednje mjesečne količine oborine *P* za razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.) na stanici Ogulin.

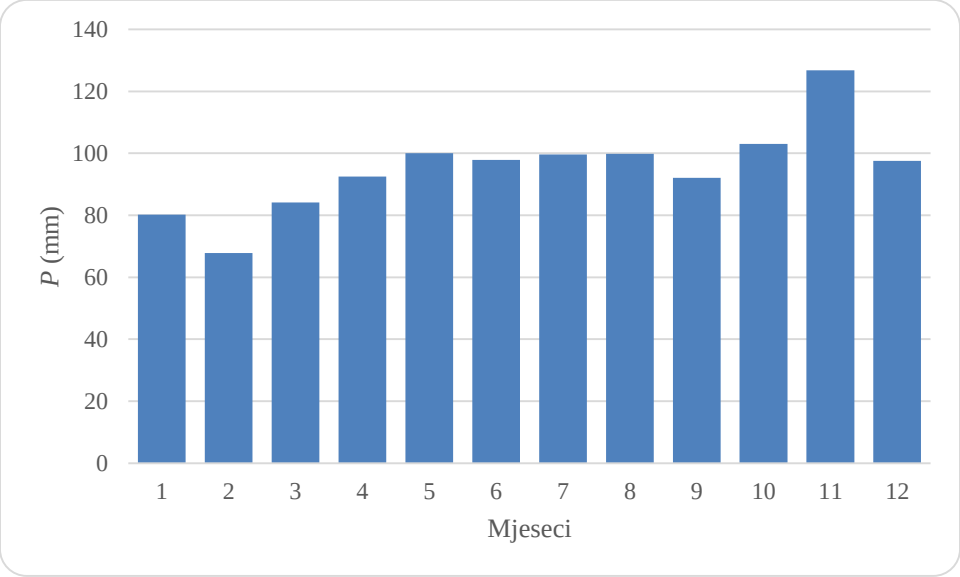


Slika 3.15 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Ogulin u razdoblju (1951.-1980.)

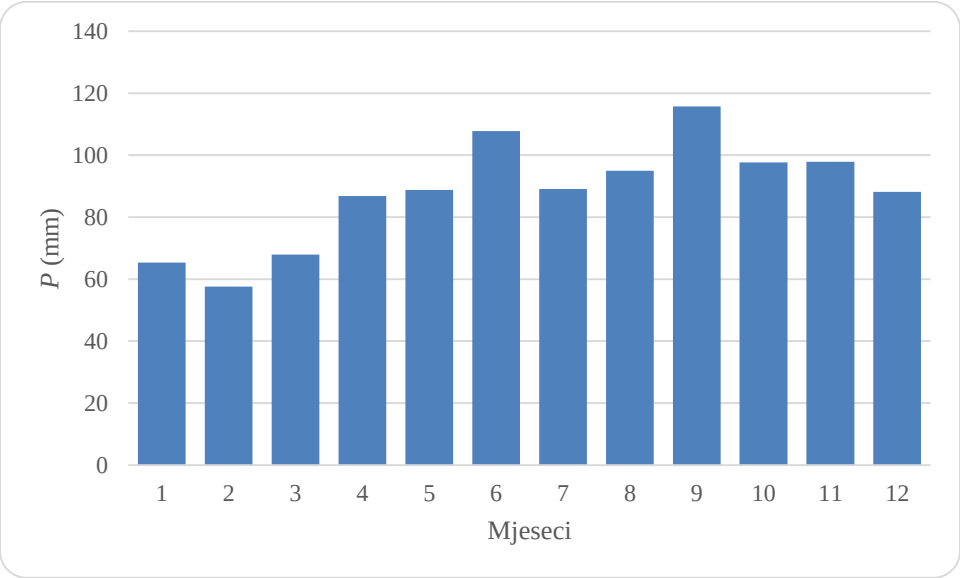


Slika 3.16 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Ogulin u razdoblju (1981.-2012.)

Na stanici Ogulin je srednja godišnja količina oborine u starijem razdoblju 1.610 mm a u novijem razdoblju 1.500 mm (6,8% manje u odnosu na ranije razdoblje) i slično kao i na stanici Parg, u novijem razdoblju su se jasnije istaknuli ekstremi, vidljivo na slici 3.16. Na slikama 3.17 i 3.18 prikazane su srednje godišnje količine oborine *P* za razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.) na stanici Karlovac.



Slika 3.17 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Karlovac u razdoblju (1951.-1980.)



Slika 3.18 Srednje mjesečne količine oborine *P* na stanici Karlovac u razdoblju (1981.-2012.)

Kao i na stanicama Parg i Ogulin, srednja godišnja količina oborine *P* se u novijem razdoblju smanjila u donosu na starije razdoblje. U ranijem razdoblju je srednja godišnja količina oborine 1.138 mm dok je u novijem razdoblju 1.058 mm (7,0% manje u odnosu na ranije razdoblje). Također su se u novijem razdoblju istaknuli ekstremi.

Na sve tri klimatološke stanice primijećeno je smanjenje srednje godišnje količine oborine u novijem razdoblju i izražena je varijabilnost srednjih mjesečnih količina oborine. Na stanici Karlovac se godišnji maksimum, koji se u ranijem razdoblju (1951.-1980.) pojavljivao u mjesecu studenom (slika 3.17), u novijem razdoblju (1981.-2012.) pomaknuo i vidljiva su dva godišnja maksimuma u mjesecima lipnju i rujnu (slika 3.18).

4. Postupak istraživanja

Regionalne analize hidroloških parametara pokazuju veliku povezanost hidroloških istraživanja s vodoprivredom i višenamjenskim gospodarenjem vodama. Hidrološka su se istraživanja razvijala u tri osnovna smjera (Jevđević, 1991):

1. opisna (deskriptivna) hidrologija,
2. korisnička (primijenjena) hidrologija,
3. znanstvena hidrologija.

Kod regionalnih hidroloških analiza neophodno je primijeniti sva tri osnovna hidrološka usmjerenja: opisnu (deskriptivnu) hidrologiju za proučavanje bitnih hidroloških obilježja, znanstvenu hidrologiju za analize podataka i izvođenje teorijskih zakonitosti te korisničku (primijenjenu) hidrologiju za praktičnu primjenu izvedenih zakonitosti.

Opisna ili deskriptivna hidrologija rabi se kod definiranja područja koje se tretira kao jedna regija, ali i kod korištenja dobivenih rezultata obrada regionalnih analiza u kršu, sa slivova na kojima postoje mjerenja hidroloških veličina na slivove bez izmjerenih hidroloških veličina ili s malo njih. U kršu je određivanje sličnih slivova s kojih se koriste rezultati hidroloških obrada često složen problem zbog slabo poznatih obilježja podzemlja. Zbog toga je bitno sustavno prikazati geografska i morfološka obilježja, a posebice rezultate geoloških i hidrogeoloških istraživanja, da bi se mogli donijeti mjerodavni zaključci o sličnosti pojedinih područja i o mogućnostima korištenja izvedenih rezultata obrada.

Korisnička ili primijenjena hidrologija je usmjerena na rješavanje praktičnih problema i tu se regionalna hidrološka analiza pokazuje vrlo korisnom.

Regionalna hidrološka analiza je u znanstvenom dijelu hidrologije nezamjenjiva podloga koja nadopunjuje rezultate znanstvenih istraživanja i pomaže pri njihovoj interpretaciji.

Temeljni rezultati regionalne hidrološke analize su jednadžbe koje povezuje dvije ili više hidroloških ili meteoroloških parametara. Regresijskom analizom procjenjuju se parametri tih jednadžbi i određuju se zavisne i nezavisne varijable (Ponce, 1989). Kvaliteta prilagodbe jednadžbe podacima mjeri se koeficijentom korelacije. Dakle, regresija daje međusobnu ovisnost hidroloških i meteoroloških parametara a korelacija opisuje kakvoću te ovisnosti.

Kod složenih analiza potrebno je proces obrade provoditi u tri osnovne faze:

1. Procjena kakvoće ulaznih izračunskih hidroloških i meteoroloških podataka.
2. Strukturalna analiza hidroloških sustava i procesa, te studije odnosa unutar sustava.
3. Modeliranje procesa i obilježja prirodne sredine u hidrologiji definiranjem prikladnih matematičkih izraza za modele i izborom odgovarajućih metoda za određivanje pripadnih parametara (Jevđević, 1991).

4.1. Procjena kakvoće ulaznih izračunskih hidroloških i meteoroloških podataka

Navedeni prvi korak složenih hidroloških analiza, provjera kakvoće, vrlo je važan u regionalnoj analizi jer svi rezultati obrada prvenstveno ovise o kakvoći i količini ulaznih podataka. Pod time se misli razmatranje i uklanjanje slučajnih i sustavnih pogrešaka u biranju uzorka te ispitivanje homogenosti i trendova dostupnih nizova.

Pri regionalnim hidrološkim analizama raspolaže se s dugogodišnjim nizovima sirovih hidroloških podataka. Kako je s tako velikom količinom podataka nepraktično raditi, njih je potrebno uzorkovati. Za statističku analizu učestalosti uzorak treba biti u potpunosti slučajna varijabla, odnosno treba biti nepristrana, neovisna i homogena (Chow, 1964).

Da uzorak ne bi bio pristran, on mora biti reprezentativan za cijelu populaciju. Primjerice, meteorološka stanica koja mjeri oborinu na slivu treba se nalaziti na takvom mjestu da pokriva različite uvjete koji su na tom slivu. Tako dobiveni uzorak naziva se i *stratificirani* uzorak, a suprotan je *točkastom* uzorku koji je dobiven samo s jednog užeg područja ili klase populacije.

Ovisnost podataka se može gledati vremenski i prostorno. *Vremenska ovisnost* je glavni uzrok čiste nenasumičnosti podataka. Primjerice, dvije poplave koje se dogode neposredno jedna iza druge uzrokuju veliku ovisnost, jer oborina koja je uzrokovala prvu poplavu može utjecati na meteorološke uvjete koji su uzrokovali drugu poplavu. *Prostorna neovisnost* može uvelike utjecati da podaci budu nestratificirani. Dvije meteorološke stanice koje su smještene vrlo blizu jedna drugoj će davati gotovo iste podatke te bi se trebale razmatrati kao jedna stanica pri računanju srednje oborine.

Nehomogenost podataka znači da su uzorci uzimani iz dvije različite populacije podataka. Podaci dobiveni s hidrološke stanice na kojoj se u nekom trenutku vremenskog niza mijenjao režim otjecanja su vrlo vjerojatno nehomogeni.

Kvaliteta podataka ovisi i o greškama koje nastanu pri mjerenjima. Količina hidroloških podataka koji se izmjere je vrlo velika, uzevši u obzir dugogodišnje nizove i velik broj hidroloških stanica. Pri samim mjerenjima moguće su pogreške i razlikuju se *slučajne* i *sustavne* pogreške. Ponekada je teško razlikovati te dvije vrste pogreške i mnoge su pogreške kombinacija tih dviju. *Slučajne* pogreške najčešće nastaju zbog osobe koja vrši mjerenje i zbog samog mjernog instrumenta koji nije savršen. Ovakve pogreške se mogu smatrati i nasumičnim pogreškama jer se ne pojavljuju u pravilnom rasporedu niti u iznosu. S druge strane, i *sustavne* pogreške mogu nastati zbog osobe koja vrši mjerenje ili instrumenta, međutim takve pogreške nisu nasumične, nego su stalne i stvaraju trend ili variraju nekim pravilom i stvaraju periodičnost u podacima.

Glavne nesavršenosti hidroloških podataka, poput nenasumičnosti, nestacionarnosti, nedostatak podataka i sl. se trebaju analizirati. Neki postupci provjere, ovisno o tipu greške su korelacijska analiza vremenskog niza, računanje kliznog srednjaka za trend, Fourierova ili harmonijska analiza za provjeru periodičnosti itd. Manjkavi podaci se mogu procijeniti i nadopuniti gledajući regionalno ovisnost o drugim podacima na hidrološki sličnim slivovima.

Hidrološki i meteorološki podaci analizirani na razmatranome području mogu se prihvatiti redovito kao slučajne varijable. Hidrološke i meteorološke stanice daju nepristrane razlučene podatke jer je njihov razmještaj u prostoru razmatranog sliva takav da one pokrivaju različite uvjete koji su na slivu. Primjerice, razmatrane tri klimatološke stanice Parg, Ogulin i Karlovac pokrivaju uvjete na planinskim malim slivovima (stanica Parg), nešto većim planinskim slivovima (stanica Ogulin) i velikim nizinskim slivovima (stanica Karlovac). Slično su raspoređene i hidrološke stanice na cijelom slivu. Vremenska neovisnost hidroloških i meteoroloških događaja razmatrana je u devetom poglavlju *Spektralna analiza hidroloških i meteoroloških podataka*. Stanice daju prostorno neovisne podatke jer su ravnomjerno raspoređene na slivu. Homogenost podataka je analizirana i prikazana u petom poglavlju *Analize osnovnih podloga*.

4.2. Strukturalna analiza hidroloških sustava i procesa i modeliranje procesa i obilježja prirodne sredine

Strukturalna analiza je raščlanjivanje neke složene cjeline na jednostavnije podcjeline sličnih svojstava. U hidrološkoj regionalnoj analizi se, na temelju takvoga razmatranja, modelima može realnije opisati ponašanje otjecanja u prirodi, jer se na jednostavnim podcjelinama koriste odgovarajući modeli. Na kraju se dobivene rezultate povezuje natrag u prvotnu cjelinu.

U slučaju raščlanjivanja krškog porječja Kupe, osnovni elementi na koje se, primjerice, sliv može raščlaniti su sliv rijeke Kupe bez glavnih pritoka Dobre i Korane s Mrežnicom, sliv rijeke Dobre, sliv rijeke Mrežnice i sliv rijeke Korane. Detaljnija analiza unutar ovih podslivova opisana je u poglavlju 3.1.

U hidrologiji definiranjem prikladnih matematičkih izraza za modele i izborom odgovarajućih metoda za određivanje pripadnih parametara, redovito se najviše pozornosti posvećuje trećoj fazi, matematičkom modeliranju hidroloških procesa, a pritom se često zanemaruju prve dvije faze: studiju osnovnih podataka i strukturalnu analizu. Zanemarivanjem prve faze radit će se s nepouzdanim osnovnim podacima i nehomogenim nizovima podataka, a to može utjecati, kako na izbor krivoga modela, tako i na same rezultate modeliranja. Zanemarivanjem strukturalne analize, pak, može doći do većih neslaganja između stvarnoga otjecanja u prirodi i rezultata matematičkih modela. Uzrok ovakvom, nepotpunom, pristupu analizi je taj što je treća faza najčešće najatraktivnija, a prva faza složena i možda čak i najteža, a najmanje profesionalno donosi (Jevđević, 1991). Međutim, samo analiziranje kroz prve dvije faze nije samo sebi dovoljno, pa svakoj od navedene tri faze treba pristupiti ravnopravno, te će samo tako regionalna hidrološka analiza biti cjelovita.

Imajući sve ovo na umu, općenit postupak regionalne hidrološke analize krškog porječja Kupe proveden je na sljedeći način:

1. *Analiza osnovnih podloga*. Definiranje hidroloških obrada, kao i svaka druga obrada ovise o ulaznim podacima, odnosno o osnovnim podlogama. Moguće pogreške u obradama s obzirom na osnovne podloge mogu biti rezultat manjka ulaznih podataka ili njihove netočnosti. Stoga je neophodno sve osnovne podloge provjeriti i po potrebi ispraviti. Najčešća su pogrešna mjerenja meteoroloških ili hidroloških veličina ili netočni podaci

izvedenih veličina, poput definiranje utjecajnih slivnih površina, ekstrapolacija protočnih krivulja i sl. Temeljna je pretpostavka da rezultati svih kasnijih obrada (matematičkoga modeliranja, simulacije i optimalizacije) ne mogu biti kvalitetniji od kvalitete ulaznih podataka. Zbog toga je ovaj temeljni korak najbitniji u svakoj regionalnoj hidrološkoj analizi.

2. *Procjena kakvoće ulaznih podataka*. Razmatranje svih raspoloživih podataka i ustanovljivanje i otklanjanje slučajnih i sustavnih pogrešaka u biranju uzoraka te ispitivanja pojava nehomogenosti u nizovima raspoloživih osnovnih podataka. Rezultati kasnijih obrada (matematičkoga modeliranja, simulacija i optimalizacija) ne mogu biti bolji nego što dopušta kakvoća ulaznih podataka.

3. *Definiranje karakterističnih parametara*, poput površine slivova A, srednjih godišnjih bruto oborina P, srednjih godišnjih efektivnih oborina P_e, srednjih protoka Q, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka Q_M i Q_m, maksimalnih specifičnih dotoka sa sliva q_M i po potrebi njihovih odabranih modulnih koeficijenata i njihovih glavnih deskriptora (standardno odstupanje σ, koeficijenti varijacije i asimetrije c_v i c_s).

4. *Izrada histograma karakterističnih parametara* prvenstveno slivnih površina A, bruto i efektivnih oborina P i P_e, deskriptora c_v i c_s te koeficijenta otjecanja c.

5. *Pregledi vrijednosti koeficijenata korelacije* između parametara, linearnih oblika $y = ax + b$ i nelinearnih oblika $y = ax^b$.

6. *Definiranje veza koje ima smisla dalje analizirati* ovisno o veličini koeficijenta korelacije r. Ovisno o razmatranom području njegove se vrijednosti najčešće usvajaju $r > 0{,}80$, a u posebno zanimljivim slučajevima mogu se usvojiti niže vrijednosti, primjerice između 0,70 i 0,75 za odnos između efektivne i bruto oborine $P_e = f(P)$.

7. *Izvođenje dvoparametarskih zakonitosti veza* za slučajeve gdje na to ukazuju prethodno provedene analize.

8. *Ispitivanje višeparametarskih veza i njihovo izvođenje*, ako se ustanovi da to ima smisla.

9. *Izračun teorijskih vodnih valova* na temelju podataka realnih hidrograma vodnih valova na vodotoku Kupe.

10. *Odabir karakterističnih hidroloških profila i klimatoloških stanica između kojih se može provesti spektralna analiza niza podataka* iz čijih frekvencijskih ovisnosti se mogu nadopuniti i potvrditi dobivene veze klasičnom regionalnom hidrološkom analizom.

11. *Usporedba rezultata provedene regionalne analize s rezultatima ranijih regionalnih analiza* za, u hidrološkom smislu, slična područja, pa u nekim slučajevima i za različita područja.

5. Analize osnovnih podloga

Osnovne podloge za hidrološke analize mogu se podijeliti na tri osnovne skupine:

1. Slivovi
2. Protoci
3. Oborine.

Pri analizi osnovnih podloga za regionalnu hidrološku analizu u kršu potrebno je obratiti posebnu pozornost na:

a) Veličine utjecajnih slivnih površina.

b) Ocjenu kakvoće izmjerenih hidroloških podataka.

c) Ekstrapolaciju protočne krivulje.

d) Duljine nizova izmjerenih podataka.

e) Homogenost razmatranih nizova.

f) Podatke o količinama oborina (analiza se radi na kraju jer nakon analize duljina i homogenosti nizova, neki slivovi se mogu izostaviti iz obrade pa za njih onda ne treba analizirati oborinu) (Žugaj, 1995).

5.1. Utjecajne slivne površine

Određivanje utjecajnih slivnih površina u kršu je vrlo složen problem prvenstveno zbog njihove heterogenosti. Heterogenosti su posljedica litoloških i strukturnih značajki slivnog područja, tektonskih procesa, kao i procesa otapanja karbonatnih stijena koji se odvija različitim intenzitetom zbog raznih utjecajnih čimbenika, pa su na svakom slivu u kršu stvoreni različiti uvjeti za otjecanje vode. Ovisno o razvijenosti podzemnih krških formi, topografska i hidrogeološka razvodnica mogu se toliko razlikovati da na pojedina izvorišta mogu dolaziti vode s područja koja topografski pripadaju drugim slivovima.

U nekim slučajevima, posebice kod velikih slivova, nema dovoljno geoloških i hidrogeoloških podataka na temelju kojih bi se u cijelosti mogla definirati hidrogeološka razvodnica. U takvim se

slučajevima utjecajne slivne površine približno određuje na osnovi efektivnih oborina i oborina palih na sliv, odnosno na temelju pretpostavljene vrijednosti prosječnoga otjecajnog koeficijenta (Žugaj, 1995).

Kao što se navodi u poglavlju 2, slivne površine Kupe i njezinih pritoka u kršu detaljno su analizirane u radu Žugaja i sur. (1998-2007) uzimajući u obzir stanje podzemnih voda i sve raspoložive rezultate trasiranja. Prema tome su te vrijednosti dovoljno pouzdane i njih se koristi u ovom radu.

5.2. Ekstrapolacija protočne krivulje

Osnovni hidrološki podaci, s kojima se ulazi u regionalne hidrološke analize, su srednji dnevni i ekstremni godišnji protoci. U nedostatku mjerenja u području malih voda lako se mogu provesti dodatna mjerenja.

No kod pojavljivanja velikih voda prilike su znatno složenije nego kod malih voda i često je vrlo teško izmjeriti vrh vodnoga vala. Zato se u tome području najčešće protočnu krivulju ne može odrediti na osnovi mjerenja, nego ekstrapolacijom. U ovom se radu u velikoj mjeri razmatraju i maksimalni godišnji protoci, pa je posebna pozornost posvećena njihovim vrijednostima.

Prema tome, posebnu pozornost treba obratiti na ekstrapolirane dijelove protočnih krivulja u područjima velikih voda kada se definiraju veličine protoka vode. Pojavljivanje velikih voda je rijetko i visoki vodostaji kratko traju pa je zato na hidrološkim postajama vrlo malo zabilježenih visokih vodostaja koje ulaze vrlo visoko u zone ekstrapolacije protočnih krivulja. Ekstrapolirane vrijednosti maksimalnih protoka malo utječu na točnost srednjih godišnjih protoka, ali kada se, na temelju ekstrapolacije protočne krivulje, definiraju maksimalni godišnji protoci koji predstavljaju ulazne podatke za proračun maksimalnih godišnjih protoka za različita povratna razdoblja, onda je bitno da odabrana metoda ekstrapolacije daje realne rezultate.

Uobičajeni načini ekstrapolacije protočnih krivulja u osnovi se razlikuju prema karakterističnim parametrima na temelju kojih se definira ekstrapolirani dio protočne krivulje. Preporučeno je odabrati postupak na temelju onoga parametra koji ima najbolju linearnu vezu s vodostajima ili protocima. Općenito se ekstrapolirani dio protočne krivulje smatra pouzdanim u području do 20% raspona vodostaja s izmjerenim protocima. Ovakvim pristupom se uzimaju podaci samo iz profila za koji se vrši ekstrapolacija.

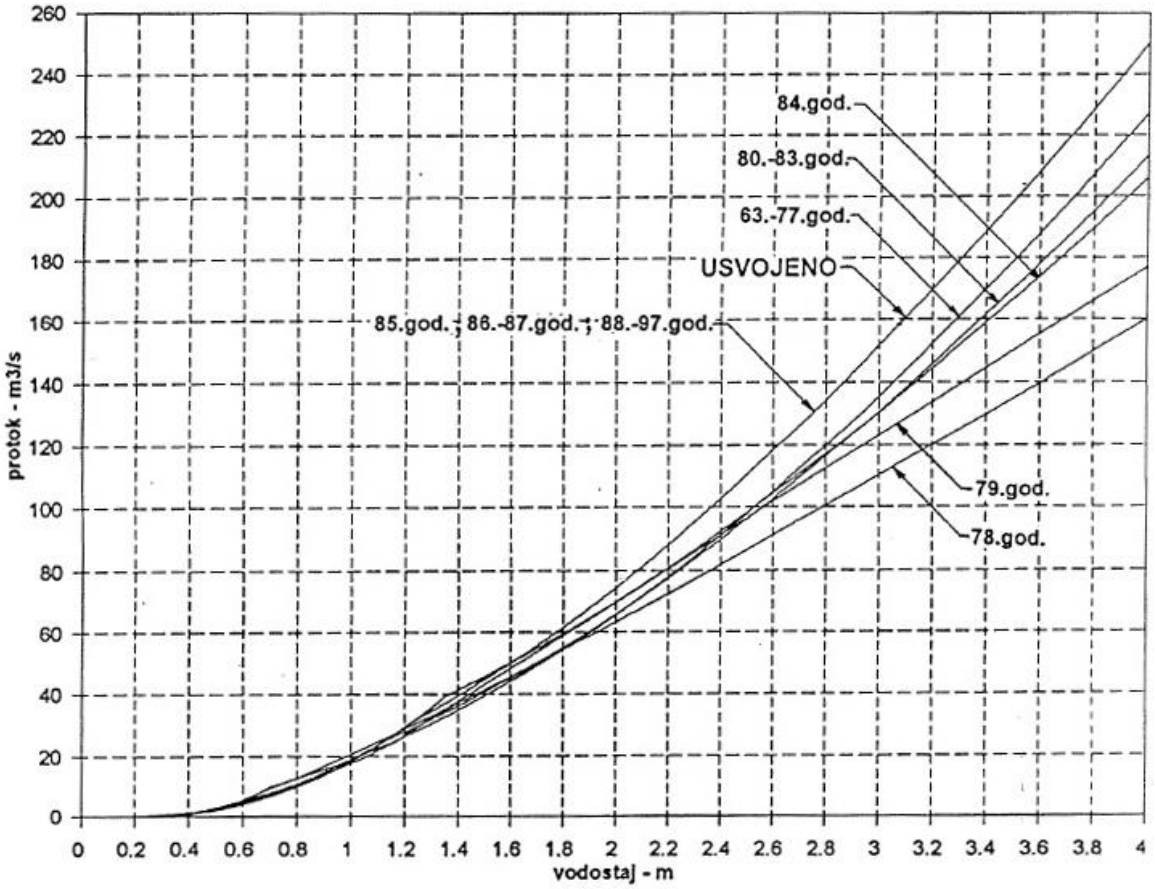
Ispravniji pristup je provjeravanje rezultata ekstrapolacije protočne krivulje s podacima iz profila sličnih obilježja otjecanja u sklopu regionalnih hidroloških analiza, najbolje za slučajeve kada postoji na razmatranome vodotoku nekoliko profila s definiranim protočnim krivuljama u području velikih voda.

Problem realnog definiranja velikih voda na razmatranom području naročito je došao do izražaja na slivu Gornje Dobre, pa se zbog toga ovdje opisuje.

Na razmatranome području kod sliva Gornje Dobre ovo je naročito zanimljivo u profilu Turkovići, zbog velikoga izlijevanja nizvodno i plavljenja grada Ogulina.

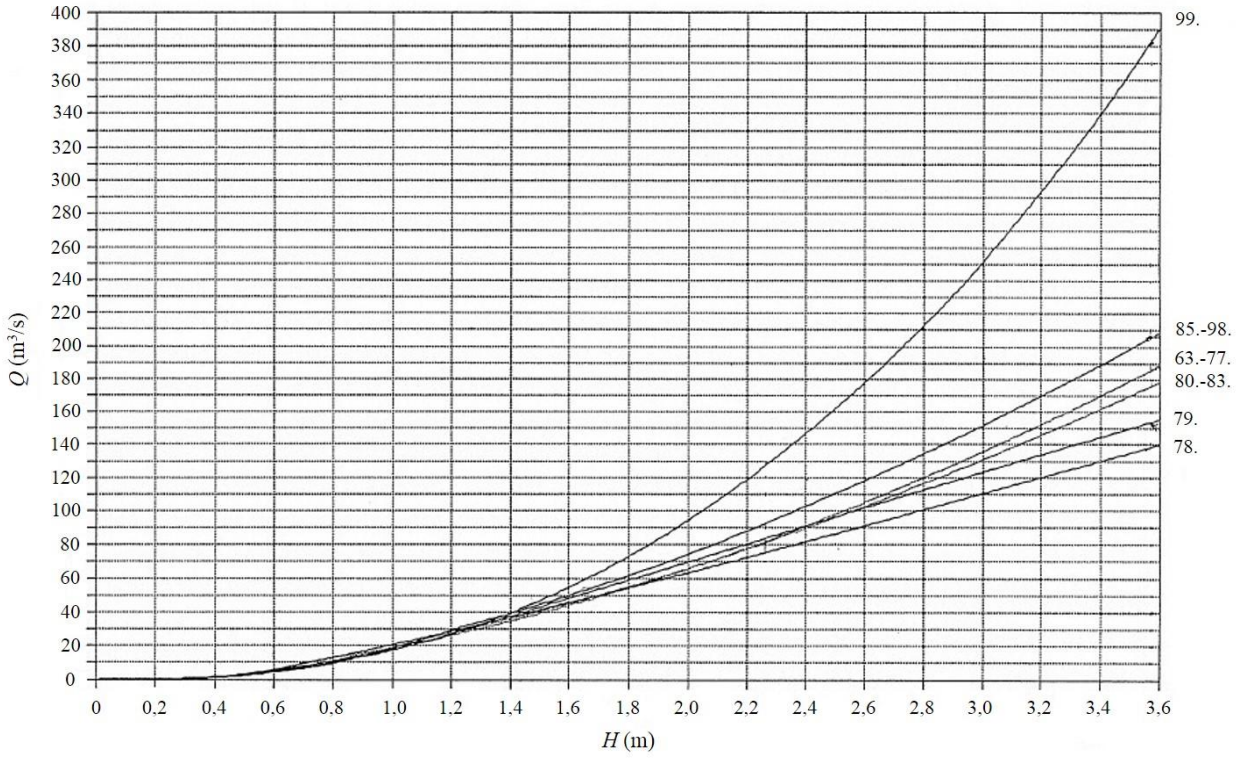
Protočna krivulja se različito definirala tijekom rada limnigrafske stanice Turkovići u razdoblju od 1963. do 2012. godine. U profilu Turkovići je vrlo širok inundacijski prostor pa je za očekivati da će se ekstrapolacijom teško dobiti jednoznačnu i dovoljno pouzdanu protočnu krivulju u području velikih voda ukoliko nisu mjerenjima obuhvaćena i izlijevanja vode izvan korita.

U ranijem razdoblju obrade (1963.-1999.), u profilu Turkovići na Gornjoj Dobri, najveći je protok bio izmjeren 28. 8. 1989. godine; za vodostaj: H = 202 cm iznosio je: Q = 75,8 m^3/s. S obzirom da je u vrijeme poplave Ogulina u srpnju 1999. godine u profilu Turkovići, vodostaj Gornje Dobre bio: H_M = 357 cm, u prijašnjim obradama DHMZ-a RH se upozorava da je odgovarajući protok: Q_M = 205 m^3/s, u vrlo visokom području ekstrapolacije (Brkić, 2001a). Zbog toga je, za sve maksimalne godišnje vodostaje, zabilježene u razdoblju (1963.-1999.), usvojen ekstrapolirani dio protočne krivulje, definirane za razdoblje (1985.-1997.), koji, u odnosu na gornje dijelove protočnih krivulja iz ostalih razdoblja, daje najveće vrijednosti protoka. Sve protočne krivulje Gornje Dobre u profilu Turkovići iz razdoblja obrade (1963.-1999.) prikazane su na slici 5.1. Pritom je navedeno da su male promjene protočnih krivulja u području velikih voda uzrokovane promjenama veličina protjecajnoga profila. Važno je napomenuti da su ekstrapolirani dijelovi protočnih krivulja definirani jednadžbama dobivenim na osnovi vodomjerenja koja su korištena za određivanje protočnih krivulja kod znatno manjih voda (do najvišeg izmjerenog protoka Q = 75,8 m^3/s bez izlijevanja iz korita). Pritom nije korištena niti jedna od metoda za ekstrapolaciju protočne krivulje opisana u literaturi, nego su krivulje produljivane na osnovi važeće jednadžbe definirane s podacima od provedenih vodomjerenja.



Slika 5.1 Protočne krivulje Gornje Dobre u profilu Turkovići u razdoblju (1963.-1999.) (preuzeto iz Brkić, 2001a)

U kasnijoj obradi (Brkić, 2001b) se navodi promjena protočne krivulje u području velikih voda od Državnoga hidrometeorološkog zavoda Republike Hrvatske (DHMZ RH) gdje je definiran novi analitički izraz za protočnu krivulju. Prema toj, novoj protočnoj krivulji, kroz profil Turkovići je 29. 7. 1999. godine, umjesto prijašnjih 205 m^3/s proteklo čak 382 m^3/s. Osnovano se pretpostavlja da je uzrok ovako visokoj vrijednosti protoka, prema novoj protočnoj krivulji, bila pogreška pri mjerenju dubina viskom pri velikoj vodi, a prema tome i velikoj brzini vode, pa se zbog toga visak kojim je mjerena dubina otklanjao od okomica i prividno davao veću dubinu nego što ona uistinu jest. Ova protočna krivulja, koja pokazuje najveće protoke u području velikih voda, zajedno s ranijim protočnim krivuljama, grafički je prikazana na slici 5.2.

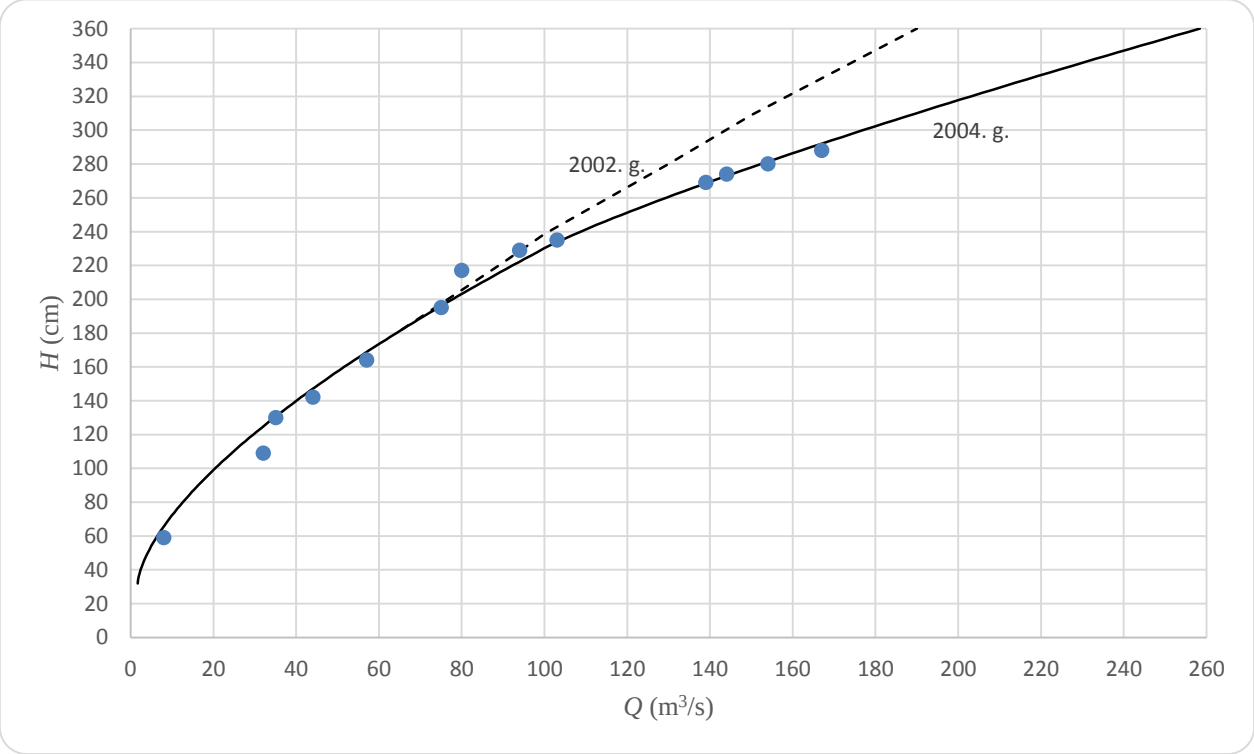


Slika 5.2 Promijenjena protočna krivulja Gornje Dobre u profilu Turkovići i ranije definirane protočne krivulje (preuzeto iz Brkić, 2001b)

Na osnovi obrade podataka iz 1998. godine maksimalni protok poplavnoga vala iz srpnja 1999. godine bio je: Q_M = 205 m^3/s, a nakon promjene protočne krivulje 1999. godine, taj je protok povećan na: Q_M = 382 m^3/s. Ovakva, vrlo velika i teško prihvatljiva razlika uvjetovala je provođenje dodatnih hidroloških mjerenja kod pojavljivanja velikih voda u profilu Turkovići. Hidrološki istraživački radovi u profilu Turkovići na Gornjoj Dobri, provedeni u razdoblju (2002.-2004.), bili su uspješno usmjereni na mjerenja protoka u vrijeme pojavljivanja velikih voda. Ti su podaci iskorišteni za realno definiranje protočne krivulje Gornje Dobre u profilu Turkovići u području velikih voda. Maksimalni protok poplavnoga vala iz srpnja 1999. godine, prema protočnoj krivulji iz 2004. godine je: Q_M = 254 m^3/s (Brkić, 2005).

Na slici 5.3 prikazana je protočna krivulja Donje Dobre u profilu Turkovići, koja je 2004. godine definirana u području velikih voda na osnovi četiri izmjerena protoka, čije se vrijednosti, za vodostaje u rasponu od 269 do 287 cm, kreću u rasponu od 139 do 166 m^3/s (Kljaić, 2004). Osim toga, kod ovih se mjerenja, u sva četiri slučaja voda izlila iz korita i tekla znatno većim protjecajnim profilom, pa je prema tome i djelovanje značajnoga inundacijskog prostora bilo uzeto

u obzir. Na taj su način vrlo pouzdano određeni dotoci velikih voda, na osnovi kojih se može definirati veličine, mjerodavne za dimenzioniranje retencije za obranu od poplave grada Ogulina. Na slici 5.3 prikazana je protočna krivulja iz 2004. godine, zajedno s vodomjerenjima i protočnom krivuljom iz 2002. godine, određenom bez dodatnih vodomjerenja u području velikih voda.



Slika 5.3 Protočne krivulje Gornje Dobre: nakon mjerenja protoka u 2002. godini i s mjerenjima velike vode 2004. godine

Protočna krivulja Gornje Dobre u profilu Turkovići određena je analitičkim izrazima (Kljaić, 2004):

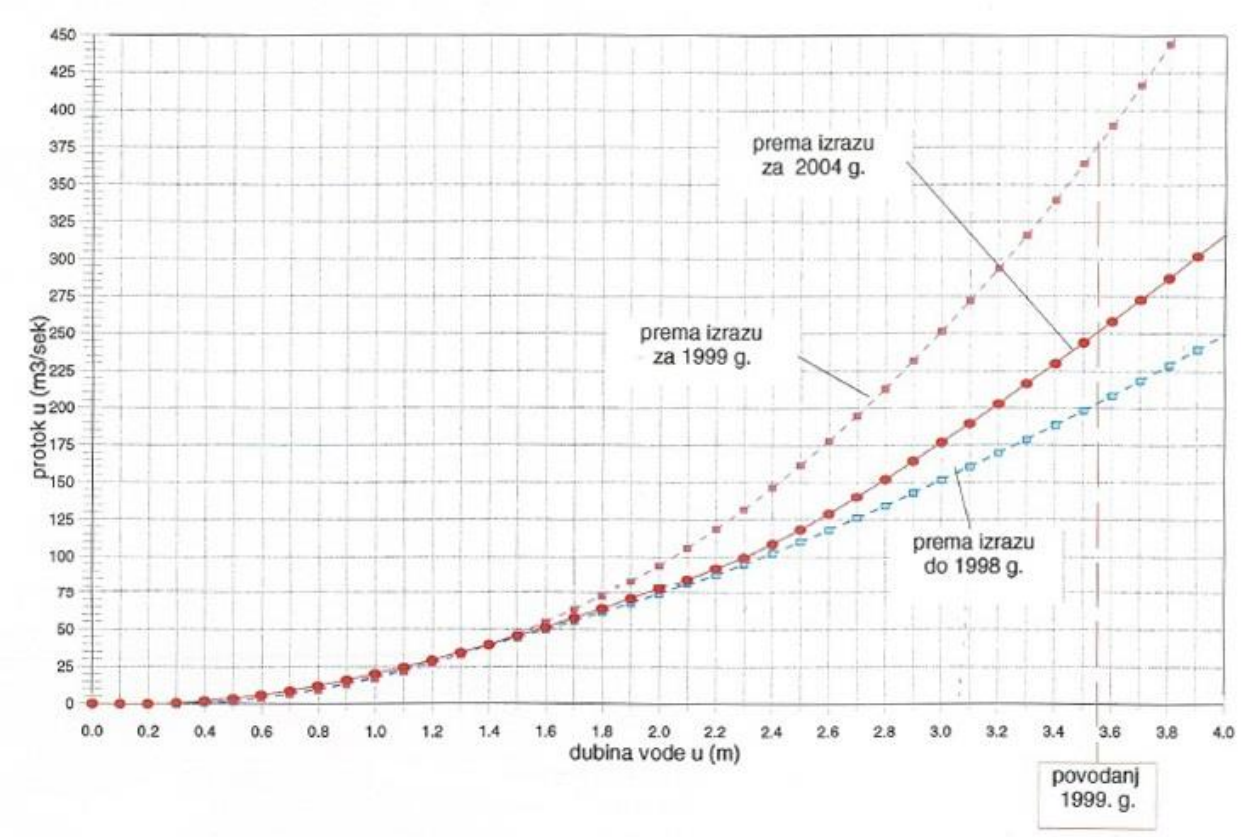
$$Q = 33{,}9975\ (H - 0{,}32)^{1{,}5519} + 1{,}733; \qquad 32\ \text{cm} < H < 234\ \text{cm} \qquad (5.1)$$

$$Q = 109{,}4441\ (H - 2{,}19)^{1{,}214} + 92{,}288; \qquad 234\ \text{cm} \leq H < 360\ \text{cm} \qquad (5.2)$$

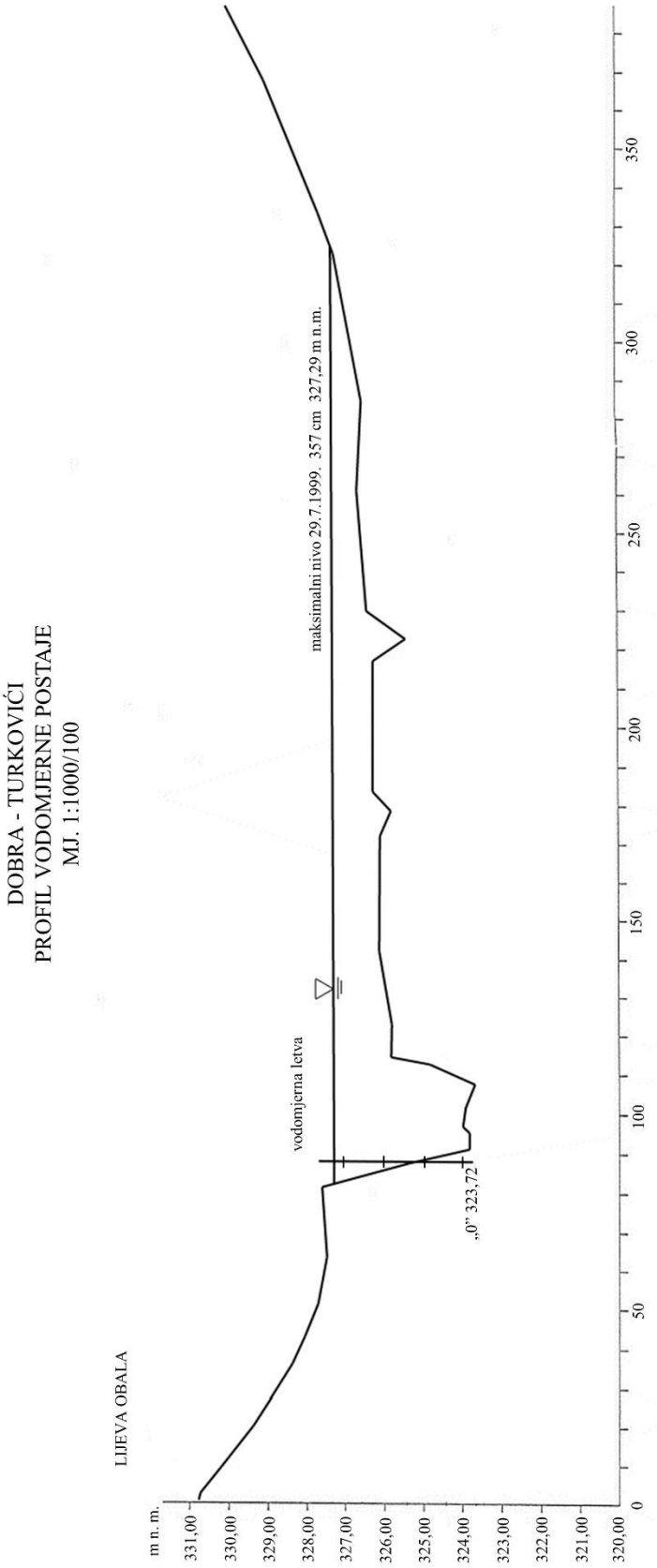
Na slici 5.4 prikazane su, uz navedenu protočnu krivulju, definiranu izrazima (5.1) i (5.2), i protočne krivulje određene u ranijim obradama idejnoga rješenja retencije Ogulin iz 2001. godine (Brkić, 2001b). Razlike u veličinama protoka velikih voda vrlo su velike, a prihvatljiva je jedino protočna krivulja iz 2004. godine jer su njezini maksimalni protoci potkrijepljeni terenskim mjerenjima, a u najmanjem su području ekstrapolacije protočne krivulje, u odnosu na protočne

krivulje iz ranijih hidroloških obrada. Osim toga, kako se vidi iz poprečnog profila vodomjerne stanice Turkovići na slici 5.5, izmjereni protoci velikih voda obuhvaćaju i tečenje kroz područje inundacije, kao i protok za vrijeme poplave Ogulina, pa i ta činjenica daje prihvaćenoj ekstrapolaciji određenu sigurnost.

Najveći zabilježeni maksimalni protok Gornje Dobre u profilu Turkovići od kada postoje mjerenja na toj stanici bio je 29. srpnja 1999. godine i iznosio je Q_M = 254 m^3/s, što je reda veličine 100-godišnje velike vode koja iznosi Q_{M100} = 265 m^3/s (prilog 4) definiranoj na temelju podataka za razdoblje (1981.-2012.).



Slika 5.4 Protočne krivulje Gornje Dobre u profilu Turkovići prema različitim obradama (preuzeto iz Brkić, 2005)



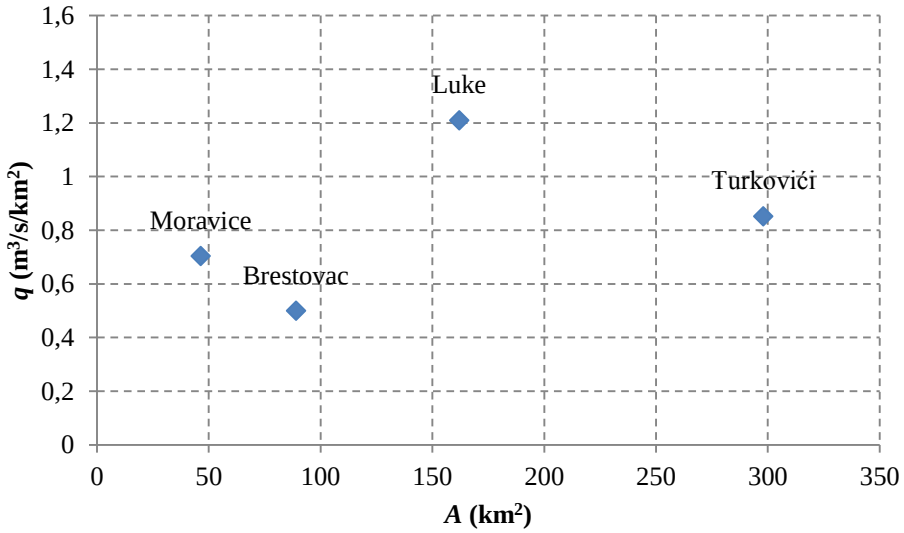
Slika 5.5 Poprečni profil hidrološke stanice Turkovići na Gornjoj Dobri, preuzeto iz VPB (2001)

Za krš općenito, pa tako i za obrasli krš često puta krivulje specifičnih maksimalnih dotoka u odnosu na veličinu sliva $q_M = f(A)$ nema smisla izvoditi. Tipičan takav slučaj su maksimalni specifični dotoci sa sliva Gornje Dobre.

U tablici 5.1 prikazani su maksimalni zabilježeni specifični dotoci q_M, koji su bili istovremeni, u ovisnosti o veličini slivova A na slivu Gornje Dobre i Vitunjčice. Maksimalni dotoci u profilima Moravice, a naročito Brestovac su pod jakim retardacijskim djelovanjem krškoga podzemlja.

Tablica 5.1 Maksimalni zabilježeni protoci, Q_M i specifični dotoci, q_M na pripadajućim profilima na slivu Gornje Dobre.

Vodotok	*Profil*	A (km^2)	Q_M (m^3/s)	q_M (m^3/s/km^2)
G. Dobra	Moravice	46,4	32,7	0,705
G. Dobra	Luke	162	196	1,21
G. Dobra	Turkovići	298	254	0,852
Vitunjčica	Brestovac	89	44,6	0,501



Slika 5.6 Maksimalni zabilježeni specifični dotoci u ovisnosti o veličini sliva.

Oduzmu li se površine slivova Gornje Dobre do profila Luke i Vitunjčice do profila Brestovac od sliva Gornje Dobre do profila Turkovići, dobije se međusliv veličine A_{ms} = 47 km^2. Nadalje, oduzimanjem zbrojenih dotoka u profilima Luke i Brestovac od dotoka kroz profil Turkovići, dobije se međudotok ΔQ_M = 13,4 m^3/s, koji se, bez obzira na djelovanje niza ponora duž toka Gornje Dobre između profila Luke i Turkovići, može ocijeniti kao prenizak. Nacrtaju li se vrijednosti maksimalnih specifičnih dotoka q_M u ovisnosti o veličini sliva A na dijagram (slika 5.6),

vidi se da su te vrijednosti u profilima Moravice na Gornjoj Dobri i Brestovac na Vitunjčici vrlo niske u odnosu na dotoke u profilima Luke i Turkovići. To se može objasniti jačim djelovanjem retencijskih prostora u podzemlju. Ako se usporede maksimalni specifični dotoci u sva tri hidrološka profila na Gornjoj Dobri, upitna je previsoka vrijednost maksimalnog protoka u profilu Luke od Q_M = 196 m^3/s, koja se ne uklapa u veličine maksimalnih specifičnih dotoka q_M hidrološki stabilnijih profila Moravice uzvodno i Turkovići nizvodno. Profil Luke smješten je na mjestu gdje vodotok skreće udesno, na stupovima starog srušenoga mosta pa je za očekivati da su velike vode u njemu precijenjene. Na osnovi prikaza na slici 5.5 očito je da ne postoji, kada je utjecaj podzemlja izražen, uobičajena opadajuća nelinearna veza $q_M = f(A)$. Spomenuta zakonitost na rijeci Kupi ima smisla i prikazana je u poglavlju 7.2, dok na Korani i Mrežnici zbog malog broja karakterističnih profila koji su uključeni u regionalnu analizu, zakonitost nije moguće izvesti.

5.3. Homogenost nizova, duljina nizova i trendovi nizova protoka u karakterističnim profilima

Homogenost nizova srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka sa sliva Kupe ispitana je na osnovi primjene neparametarskog testa rangova (Wilcoxon, 1945) uz uvažavanje, za hidrologiju uobičajene, razine povjerenja: α = 5 % (Marković, 1971). Pritom je uvjet da opaženo standardno jedinično odstupanje U_0 treba biti:

$$U_0 = \frac{S_0 - E_{(S)}}{\sigma_S} \leq \left|1{,}96\right| \tag{5.3}$$

gdje je $E_{(S)}$ očekivana vrijednost sume rangova modificiranoga niza:

$$E_{(S)} = \frac{n_2\,(n_1 + n_2 + 1)}{2} \tag{5.4}$$

n_1 je broj članova originalnoga niza, a n_2 je broj članova modificiranoga niza. Standardno odstupanje sume rangova modificiranoga niza σ_S je:

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{n_1\, n_2\, (n_1 + n_2 + 1)}{12}} \tag{5.5}$$

Suma rangova modificiranoga niza S_0 je:

$$S_0 = \sum_{1}^{n_2} k_j \tag{5.6}$$

gdje je k_j rang člana modificiranoga niza kada se članovi modificiranoga i originalnoga niza poredaju po veličini.

Test je primijenjen za sve dostupne podatke iz svih profila na slivu Kupe. Ispitano je kako se podaci iz (tzv. modificiranoga) niza iz razdoblja obrade (1981.-2012.), $n_2 = 32$, uklapaju u ukupan niz protoka na pojedinim stanicama. Općenito je ustanovljeno da su promjene u hidrološkim nizovima podataka na području Hrvatske (a i šire), nastupile osamdesetih godina dvadesetoga stoljeća i na taj je način ova analiza opravdana i nehomogenost nizova će potvrditi tu pretpostavku. Zbog prekida u mjerenjima na profilima Hrvatsko i Kamanje na Kupi za vrijeme Domovinskog rata, razmatrano je razdoblje do 1995. godine, budući da se ono nastavlja na ranije istraživano razdoblje do 1980. godine.

Rezultati ispitivanja homogenosti za nizove srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka su u tablicama 5.2, 5.3 i 5.4.

Tablica 5.2 Rezultati ispitivanja homogenosti nizova srednjih godišnjih protoka *Q* na slivu Kupe

Redni broj	*Sliv*	*Vodotok*	*Profil*	*Ukupni niz*	*Modificirani niz*	U_0	*Homogenost*
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Kupa	Kupa	Hrvatsko	1951.-1995.	1981.-1995.	3,13	nehomogen
2.			Kamanje	1957.-1995.	1981.-1995.	2,92	nehomogen
3.		Kupica	Brod na Kupi	1951.-1998.	1981.-1998.	3,96	nehomogen
4.		Lahinja	Gradac	1952.-2012.	1981.-2012.	2,08	nehomogen
5.	Mrežnica	Mrežnica	Mrzlo polje	1951.-2012.	1981.-2012.	3,48	nehomogen
6.	Korana	Korana	Slunj uzvodni	1964.-1990.	1981.-1990.	2,56	nehomogen

Homogenost srednjih godišnjih protoka nije mogla biti testirana na 22 niza zbog nepotpunosti te je šest nizova nehomogeno.

Tablica 5.3 Rezultati ispitivanja homogenosti nizova maksimalnih godišnjih protoka Q_M na slivu Kupe

Redni broj	*Sliv*	*Vodotok*	*Profil*	*Ukupni niz*	*Modificirani niz*	U_0	*Homogenost*
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Kupa	Kupa	Hrvatsko	1951.-2012.	1981.-2012.	2,42	nehomogen
2.		Čabranka	Zamost 2	1951.-2012.	1981.-2012.	2,85	nehomogen
3.	Dobra	Gornja Dobra	Luke	1951.-2012.	1981.-2012.	2,07	nehomogen
4.			Turkovići	1963.-2012.	1981.-2012.	-2,26	nehomogen
5.		Vitunjčica	Brestovac	1951.-2012.	1981.-2012.	-3,23	nehomogen

Od 32 razmatrana niza maksimalnih godišnjih protoka, na 18 stanica nije bilo mjerenja prije 1981. godine ili je razmatrani niz od 1981. do 2012. godine nepotpun, a pet nizova je nehomogeno.

Tablica 5.4 Rezultati ispitivanja homogenosti nizova minimalnih godišnjih protoka Q_m na slivu Kupe

Redni broj	*Sliv*	*Vodotok*	*Profil*	*Ukupni niz*	*Modificirani niz*	U_0	*Homogenost*
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Kupa	Kupa	Hrvatsko	1951.-2012.	1981.-2012.	2,41	nehomogen
2.			Metlika	1951.-2012.	1981.-2012.	3,82	nehomogen
3.			Kamanje	1957.-1995.	1981.-1995.	3,44	nehomogen
4.		Kupica	Brod na Kupi	1951.-1998.	1981.-1998.	3,39	nehomogen
5.	Dobra	Gornja Dobra	Turkovići	1963.-2012.	1981.-2012.	-3,46	nehomogen

Homogenost minimalnih godišnjih protoka zbog nepotpunosti nije mogla biti testirana na 18 nizova, a pet nizova je nehomogeno.

Ustanovljena pojava nehomogenosti srednjih, maksimalnih i minimalnih protoka niza (1981.-2012.) u tablicama 5.2, 5.3 i 5.4 potvrđuju pretpostavku u promjenama koje su nastupile u 80-im godinama prošlog stoljeća.

Ispitivanja duljine nizova je važna obrada za slučaj sliva Kupe i njezinih pritoka u kršu, jer postoji samo devet nizova na kojima nije bilo prekida tijekom mjerenja.

Duljina nizova podataka provjerena je na osnovi Kricky-Menkelove formule za pogrešku koeficijenta varijacije σ_{cv}, uz usvojeni uvjet, po Srebrenoviću (1970) da za dovoljnu duljinu niza treba biti $\sigma_{cv} \leq 0{,}10$ (10%).

$$\sigma_{cv} = \frac{c_v}{\sqrt{2\,(n-1)}}\sqrt{1+3\,c_v^2} < \sigma_{cv}^0 = 0{,}10 \tag{5.7}$$

Izraz (5.8) za pogrešku koeficijenta varijacije σ_{cv}, koji preporuča UNESCO (1982), prikladan je za nizove koji imaju preko 100 članova, međutim vrijednosti pogreške koeficijenta varijacije σ_{cv} su vrlo slične vrijednostima prema formuli Kricky-Menkela (5.7) pa je zbog toga u analizi korišten izraz (5.7).

$$\sigma_{cv} = c_v\sqrt{\frac{1+2\,c_v^2}{2n}} \tag{5.8}$$

U tablicama 5.5, 5.6 i 5.7 prikazane su pogreške koeficijenta varijacije σ_{cv} za srednje maksimalne i minimalne godišnje protoke.

Tablica 5.5 Vrijednosti pogrešaka koeficijenta varijacije σ_{cv} srednjih godišnjih protoka Q na slivu Kupe

Redni broj	*Sliv*	*Vodotok*	*Profil*	*Broj članova niza n*	c_v	σ_{cv}
1	2	3	4	5	6	7
1.	Kupa	Kupa	Kupari	32	0,16	0,02
2.			Hrvatsko	15	0,16	0,03
3.			Radenci	32	0,18	0,02
4.			Metlika	32	0,19	0,03
5.			Kamanje	15	0,17	0,03
6.		Gerovčica	Smrečje	32	0,22	0,03
7.		Čabranka	Zamost 2	32	0,16	0,02
8.		Kupica	Izvor	12	0,23	0,03
9.			Brod na Kupi	18	0,15	0,03
10.		Lahinja	Gradac	32	0,24	0,03
11.	Dobra	Gornja Dobra	Moravice	32	0,26	0,04
12.			Luke	19	0,21	0,04
13.			Turkovići	15	0,22	0,05
14.		Donja Dobra	Trošmarija	28	0,18	0,03
15.			Lešće Toplice	28	0,17	0,02
16.			Stative Donje	32	0,20	0,03
17.		Ribnjak	Gomirje	15	0,27	0,06
18.		Vitunjčica	Brestovac	32	0,17	0,02
19.	Mrežnica	Mrežnica	Juzbašići	16	0,28	0,06
20.			Mrzlo polje	32	0,27	0,04
21.	Korana	Korana	Luketići	17	0,36	0,08
22.			Slunj uzvodni	10	0,25	0,06
23.			Veljun	16	0,36	0,08
24.		Crna rijeka	Plitvički Ljeskovac	12	0,27	0,07
25.		Bijela rijeka	Plitvički Ljeskovac	12	0,30	0,08
26.		Matica	Plitvički Ljeskovac	12	0,24	0,06
27.		Sušanj	Plitvički Ljeskovac	10	0,17	0,04
28.		Rječica	Plitvička jezera	10	0,20	0,05
29.		Kozjak jezero	Kozjak most	12	0,27	0,07
30.		Sartuk	Rodić poljana	11	0,33	0,09
31.		Plitvica	Plitvice	12	0,26	0,06
32.		Slunjčica	Rastoke	17	0,27	0,06

Kod srednjih godišnjih protoka duljina nizova je dovoljno duga na svim hidrološkim stanicama.

Tablica 5.6 Vrijednosti pogrešaka koeficijenta varijacije σ_{cv} maksimalnih godišnjih protoka Q_M na slivu Kupe

Redni broj	*Sliv*	*Vodotok*	*Profil*	*Broj članova niza n*	c_v	σ_{cv}
1	2	3	4	5	6	7
1.	Kupa	Kupa	Kupari	32	0,17	0,02
2.			Hrvatsko	32	0,24	0,03
3.			Radenci	32	0,22	0,03
4.			Metlika	32	0,20	0,03
5.			Kamanje	32	0,20	0,03
6.		Gerovčica	Smrečje	32	0,46	0,07
7.		Čabranka	Zamost 2	32	0,36	0,05
8.		Kupica	Izvor	28	0,21	0,03
9.			Brod na Kupi	32	0,38	0,06
10.		Lahinja	Gradac	32	0,19	0,03
11.	Dobra	Gornja Dobra	Moravice	32	0,38	0,06
12.			Luke	32	0,27	0,04
13.			Turkovići	32	0,22	0,03
14.		Donja Dobra	Trošmarija	28	0,14	0,02
15.			Lešće Toplice	32	0,12	0,02
16.			Stative Donje	32	0,25	0,04
17.		Ribnjak	Gomirje	19	0,27	0,05
18.		Vitunjčica	Brestovac	32	0,12	0,02
19.	Mrežnica	Mrežnica	Juzbašići	16	0,36	0,08
20.			Mrzlo polje	32	0,25	0,04
21.	Korana	Korana	Luketići	17	0,40	0,09
22.			Slunj uzvodni	10	0,32	0,08
23.			Veljun	16	0,46	0,11*
24.		Crna rijeka	Plitvički Ljeskovac	12	0,34	0,09
25.		Bijela rijeka	Plitvički Ljeskovac	12	0,28	0,07
26.		Matica	Plitvički Ljeskovac	12	0,26	0,06
27.		Sušanj	Plitvički Ljeskovac	10	0,24	0,06
28.		Rječica	Plitvička jezera	10	0,25	0,06
29.		Kozjak jezero	Kozjak most	12	0,36	0,09
30.		Sartuk	Rodić poljana	11	0,38	0,11*
31.		Plitvica	Plitvice	12	0,32	0,08
32.		Slunjčica	Rastoke	17	0,21	0,04

* *prekratak niz*

Na dvije hidrološke stanice je vremenski niz maksimalnih godišnjih protoka prekratak na osnovi uvjeta kod primjene izraza (5.7).

Tablica 5.7 Vrijednosti pogrešaka koeficijenta varijacije σ_{cv} minimalnih godišnjih protoka Q_m na slivu Kupe

Redni broj	*Sliv*	*Vodotok*	*Profil*	*Broj članova niza n*	c_v	σ_{cv}
1	2	3	4	5	6	7
1.	Kupa	Kupa	Kupari	32	0,34	0,05
2.			Hrvatsko	32	0,51	0,09
3.			Radenci	32	0,31	0,05
4.			Metlika	32	0,28	0,04
5.			Kamanje	32	0,34	0,08
6.		Gerovčica	Smrečje	32	1,82	0,78*
7.		Čabranka	Zamost 2	32	0,25	0,04
8.		Kupica	Izvor	28	0,75	0,17*
9.			Brod na Kupi	32	0,25	0,05
10.		Lahinja	Gradac	32	0,47	0,08
11.	Dobra	Gornja Dobra	Moravice	32	0,47	0,08
12.			Luke	32	0,29	0,04
13.			Turkovići	32	0,75	0,16*
14.		Donja Dobra	Trošmarija	28	0,28	0,04
15.			Lešće Toplice	32	0,23	0,03
16.			Stative Donje	32	0,26	0,04
17.		Ribnjak	Gomirje	19	0,54	0,13*
18.		Vitunjčica	Brestovac	32	0,39	0,06
19.	Mrežnica	Mrežnica	Juzbašići	16	0,42	0,10*
20.			Mrzlo polje	32	0,47	0,08
21.	Korana	Korana	Luketići	17	1,31	0,60*
22.			Slunj uzvodni	10	0,50	0,15*
23.			Veljun	16	0,56	0,15*
24.		Crna rijeka	Plitvički Ljeskovac	12	0,61	0,20*
25.		Bijela rijeka	Plitvički Ljeskovac	12	0,80	0,31*
26.		Matica	Plitvički Ljeskovac	12	0,24	0,06
27.		Sušanj	Plitvički Ljeskovac	10	0,27	0,07
28.		Rječica	Plitvička jezera	10	0,00	0,00
29.		Kozjak jezero	Kozjak most	12	0,32	0,08
30.		Sartuk	Rodić poljana	11	0,90	0,39*
31.		Plitvica	Plitvice	12	0,57	0,18*
32.		Slunjčica	Rastoke	17	0,81	0,25*

* *prekratak niz*

Očekivano je kod minimalnih godišnjih protoka najveći broj nizova (13 od ukupno 32 niza) kod kojih je pogreška koeficijenta varijacije veća od 0,10.

Kod nizova srednjih godišnjih protoka Q, koeficijent varijacije c_v ima vrijednosti od 0,15 do 0,36, a pogreške koeficijenta varijacije su niže od σ_{cv} = 0,10, iz čega slijedi da ni na jednoj stanici niz nije prekratak (tablica 5.5). Kod nizova maksimalnih godišnjih protoka Q_M, koeficijent varijacije c_v ima vrijednosti od 0,12 do 0,46, s samo su dva kratka niza kojima je vrijednost pogreške koeficijenta varijacije viša od σ_{cv} = 0,10 (tablica 5.6). Kod nizova minimalnih godišnjih protoka Q_m, koeficijent varijacije c_v ima vrijednosti od 0,00 do 1,82, a 13 je nizova prekratko s vrijednostima pogreške koeficijenta varijacije više od σ_{cv} = 0,10 (tablica 5.7).

Najveći broj nehomogenih nizova je kod srednjih godišnjih protoka, njih šest, dok je kod maksimalnih i minimalnih protoka većina nizova homogena, a samo pet nehomogena. Više homogenih nizova maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka ne mora nužno značiti da sušnije razdoblje nije nastupilo. Godišnji ekstremi se nisu drastično promijenili u odnosu na starije obrađivano razdoblje nego se promijenilo vrijeme njihovog pojavljivanja tijekom godine a detaljnija analiza nastupanja ekstrema tijekom godine analizirat će se kasnije spektralnom analizom srednjih dnevnih protoka.

U tablicama 5.8, 5.9 i 5.10 prikazani su rezultati ispitivanja trendova u dva razdoblja, ranije obrađenog (1951.-1980.) odnosno ovisno o razdoblju rada pojedine hidrološke stanice i razdoblja iz ove obrade (1981.-2012.) na svim razmatranim stanicama za maksimalne, srednje i minimalne godišnje protoke.

U današnje vrijeme, a to se odnosi i na razdoblje ove obrade s podacima iz razdoblja (1981.-2012.) redovito se u hidrološkim profilima postavljaju limnigrafi, tako da je osigurano točno bilježenje vodostaja. Na slikama 5.7 i 5.8 prikazani su hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka Kupe u profilima Kupari za razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.) i Kamanje za razdoblja (1957.-1980.) i (1981.-2012.), a na hidrogramima su označeni i trendovi. Ti su profili odabrani kao najuzvodniji i najnizvodniji na Kupi.

Tablica 5.8 Trendovi srednjih godišnjih protoka na slivu Kupe u vremenska razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.)

Redni broj	*Sliv*	*Vodotok*	*Profil*	*Razdoblje*	
				1951.-1980.	1981.-2012.
1	2	3	4	5	6
1.	Kupa	Kupa	Kupari	rastući	rastući
2.			Hrvatsko	rastući	rastući
3.			Radenci	-	opadajući
4.			Metlika	opadajući	opadajući
5.			Kamanje	opadajući	opadajući
6.		Gerovčica	Smrečje	-	opadajući
7.		Čabranka	Zamost 2	rastući	opadajući
8.		Kupica	Izvor	-	rastući
9.			Brod na Kupi	rastući	opadajući
10.		Lahinja	Gradac	opadajući	opadajući
11.	Dobra	Gornja Dobra	Moravice	-	rastući
12.			Luke	rastući	opadajući
13.			Turkovići	rastući	opadajući
14.		Donja Dobra	Trošmarija	rastući	rastući
15.			Lešće Toplice	rastući	rastući
16.			Stative Donje	rastući	rastući
17.		Ribnjak	Gomirje	-	rastući
18.		Vitunjčica	Brestovac	opadajući	rastući
19.	Mrežnica	Mrežnica	Juzbašići	opadajući	opadajući
20.			Mrzlo polje	opadajući	rastući
21.	Korana	Korana	Luketići	-	opadajući
22.			Slunj uzvodni	opadajući	opadajući
23.			Veljun	opadajući	opadajući
24.		Crna rijeka	Plitvički Ljeskovac	-	opadajući
25.		Bijela rijeka	Plitvički Ljeskovac	-	rastući
26.		Matica	Plitvički Ljeskovac	rastući	opadajući
27.		Sušanj	Plitvički Ljeskovac	-	opadajući
28.		Rječica	Plitvička jezera	-	opadajući
29.		Kozjak jezero	Kozjak most	rastući	opadajući
30.		Sartuk	Rodić poljana	-	opadajući
31.		Plitvica	Plitvice	-	opadajući
32.		Slunjčica	Rastoke	-	rastući

Kod srednjih godišnjih protoka, u razdoblju od 1951. do 1980. godine osam nizova ima opadajući trend, a 11 nizova rastući trend. U kasnijem razdoblju od 1981. do 2012. godine 20 nizova ima opadajući trend a 12 nizova rastući trend.

Tablica 5.9 Trendovi maksimalnih godišnjih protoka na slivu Kupe u vremenska razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.)

Redni broj	*Sliv*	*Vodotok*	*Profil*	*Razdoblje*	
				1951.-1980.	1981.-2012.
1	2	3	4	5	6
1.	Kupa	Kupa	Kupari	rastući	opadajući
2.			Hrvatsko	rastući	opadajući
3.			Radenci	-	opadajući
4.			Metlika	rastući	opadajući
5.			Kamanje	opadajući	opadajući
6.		Gerovčica	Smrečje	-	opadajući
7.		Čabranka	Zamost 2	rastući	opadajući
8.		Kupica	Izvor	-	rastući
9.			Brod na Kupi	rastući	opadajući
10.		Lahinja	Gradac	opadajući	opadajući
11.	Dobra	Gornja Dobra	Moravice	-	rastući
12.			Luke	opadajući	opadajući
13.			Turkovići	opadajući	rastući
14.		Donja Dobra	Trošmarija	rastući	opadajući
15.			Lešće Toplice	rastući	opadajući
16.			Stative Donje	rastući	opadajući
17.		Ribnjak	Gomirje	-	rastući
18.		Vitunjčica	Brestovac	rastući	rastući
19.	Mrežnica	Mrežnica	Juzbašići	opadajući	opadajući
20.			Mrzlo polje	rastući	opadajući
21.	Korana	Korana	Luketići	-	opadajući
22.			Slunj uzvodni	rastući	opadajući
23.			Veljun	opadajući	opadajući
24.		Crna rijeka	Plitvički Ljeskovac	-	opadajući
25.		Bijela rijeka	Plitvički Ljeskovac	-	opadajući
26.		Matica	Plitvički Ljeskovac	rastući	opadajući
27.		Sušanj	Plitvički Ljeskovac	-	opadajući
28.		Rječica	Plitvička jezera	-	opadajući
29.		Kozjak jezero	Kozjak most	opadajući	opadajući
30.		Sartuk	Rodić poljana	-	opadajući
31.		Plitvica	Plitvice	-	opadajući
32.		Slunjčica	Rastoke	-	opadajući

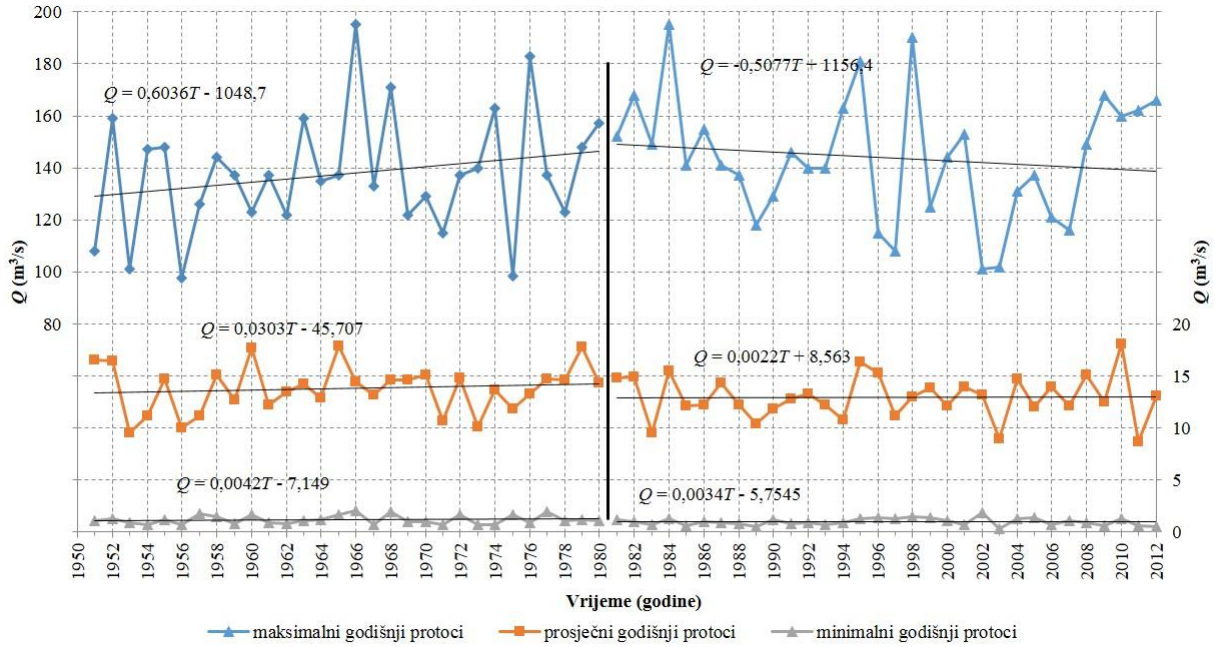
U razdoblju od 1951. do 1980. godine sedam nizova maksimalnih protoka ima opadajući trend, a 12 ima rastući trend, dok na 13 stanica nije bilo mjerenja u tom razdoblju. U kasnijem razdoblju od 1981. do 2012. godine 27 stanica ima opadajući trend dok pet ima rastući trend.

Tablica 5.10 Trendovi minimalnih godišnjih protoka na slivu Kupe u vremenska razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.)

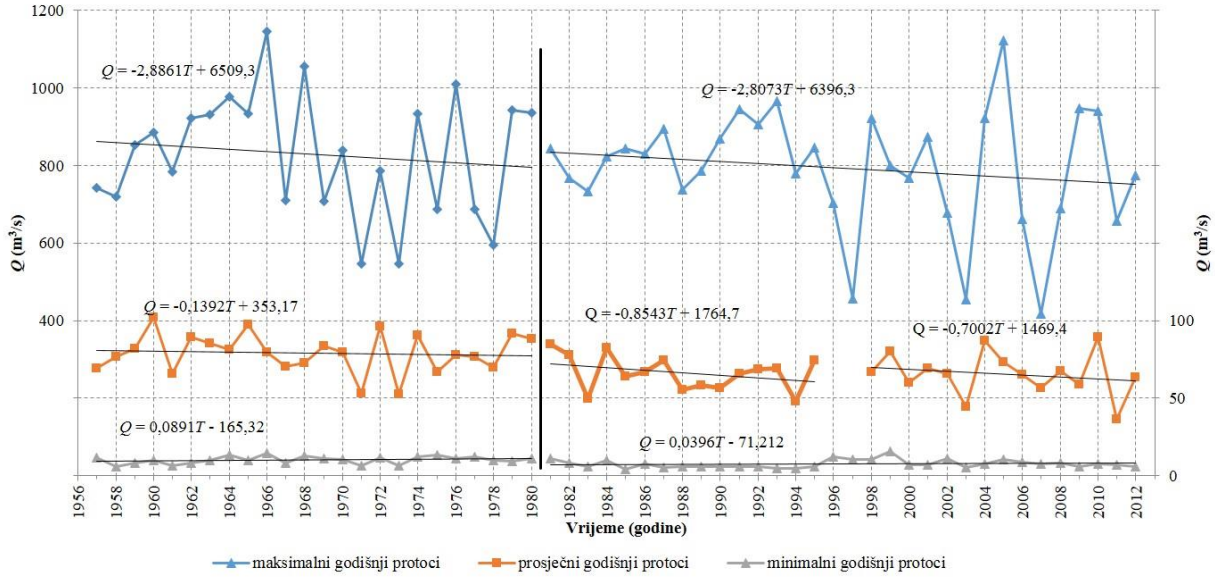
Redni broj	*Sliv*	*Vodotok*	*Profil*	*Razdoblje*	
				1951.-1980.	1981.-2012.
1	2	3	4	5	6
1.	Kupa	Kupa	Kupari	rastući	rastući
2.			Hrvatsko	rastući	rastući
3.			Radenci	-	opadajući
4.			Metlika	opadajući	opadajući
5.			Kamanje	opadajući	opadajući
6.		Gerovčica	Smrečje	-	opadajući
7.		Čabranka	Zamost 2	rastući	opadajući
8.		Kupica	Izvor	-	rastući
9.			Brod na Kupi	rastući	opadajući
10.		Lahinja	Gradac	opadajući	opadajući
11.	Dobra	Gornja Dobra	Moravice	-	rastući
12.			Luke	rastući	opadajući
13.			Turkovići	rastući	rastući
14.		Donja Dobra	Trošmarija	rastući	rastući
15.			Lešće Toplice	rastući	rastući
16.			Stative Donje	rastući	rastući
17.		Ribnjak	Gomirje	-	rastući
18.		Vitunjčica	Brestovac	opadajući	rastući
19.	Mrežnica	Mrežnica	Juzbašići	opadajući	opadajući
20.			Mrzlo polje	opadajući	rastući
21.	Korana	Korana	Luketići	-	opadajući
22.			Slunj uzvodni	opadajući	opadajući
23.			Veljun	opadajući	opadajući
24.		Crna rijeka	Plitvički Ljeskovac	-	opadajući
25.		Bijela rijeka	Plitvički Ljeskovac	-	rastući
26.		Matica	Plitvički Ljeskovac	rastući	opadajući
27.		Sušanj	Plitvički Ljeskovac	-	opadajući
28.		Rječica	Plitvička jezera	-	opadajući
29.		Kozjak jezero	Kozjak most	rastući	opadajući
30.		Sartuk	Rodić poljana	-	opadajući
31.		Plitvica	Plitvice	-	opadajući
32.		Slunjčica	Rastoke	-	rastući

Kod minimalnih godišnjih protoka, u razdoblju od 1951. do 1980. godine sedam nizova ima opadajući trend, a 12 nizova rastući trend. U kasnijem razdoblju od 1981. do 2012. godine 15 nizova ima opadajući trend a 17 nizova rastući trend.

Rezultati ispitivanja trendova grafički su prikazani za pojedine odabrane karakteristične profile na Kupi, Dobri, Mrežnici i Korani na slikama 5.7 - 5.12.



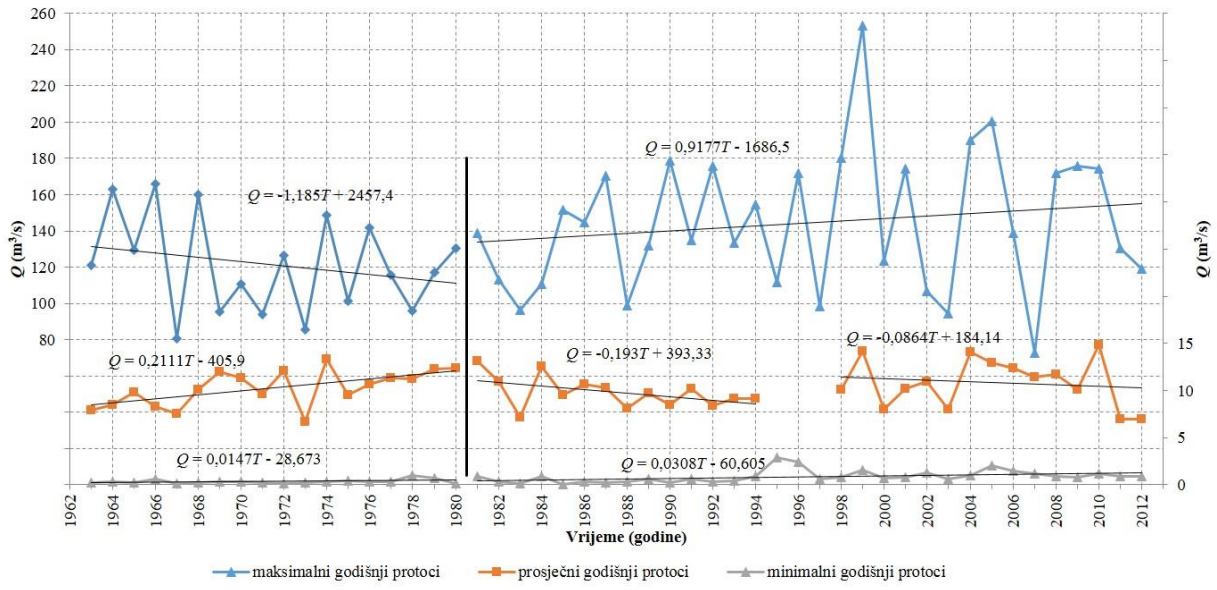
Slika 5.7 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Kupe u profilu Kupari u razdobljima (1951.-1980.) i (1981.-2012.)



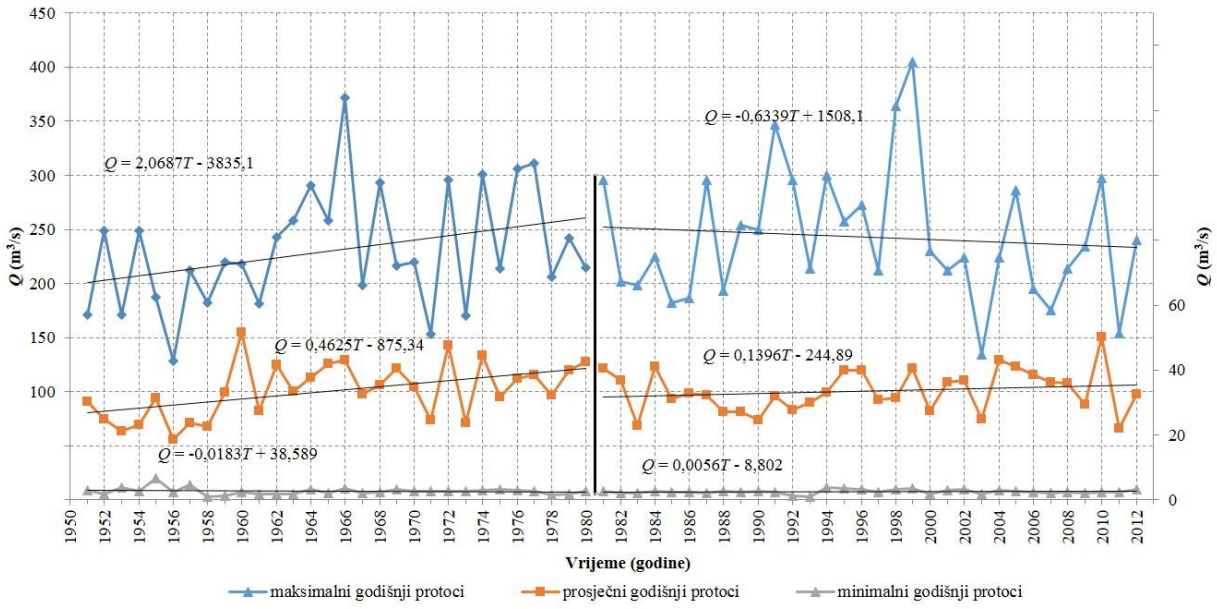
Slika 5.8 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Kupe u profilu Kamanje u razdobljima (1957.-1980.) i (1981.-2012.)

U profilu Kupari vidljiva je promjena trenda kod maksimalnih godišnjih protoka, dok je kod srednjih godišnjih protoka trend vrlo blago raste. Minimalni godišnji protoci su ujednačeni i nema velikih promjena u trendu. U profilu Kamanje u oba niza je vidljiv opadajući trend kod maksimalnih i srednjih godišnjih protoka dok minimalni godišnji protoci imaju vrlo slabo izražen rastući trend.

Na slikama 5.9 i 5.10 prikazani su hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka Gornje i Donje Dobre u profilima Turkovići za razdoblja (1963.-1980.) i (1981.-2012.) i Stative Donje za razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.), a na hidrogramima su označeni i trendovi.



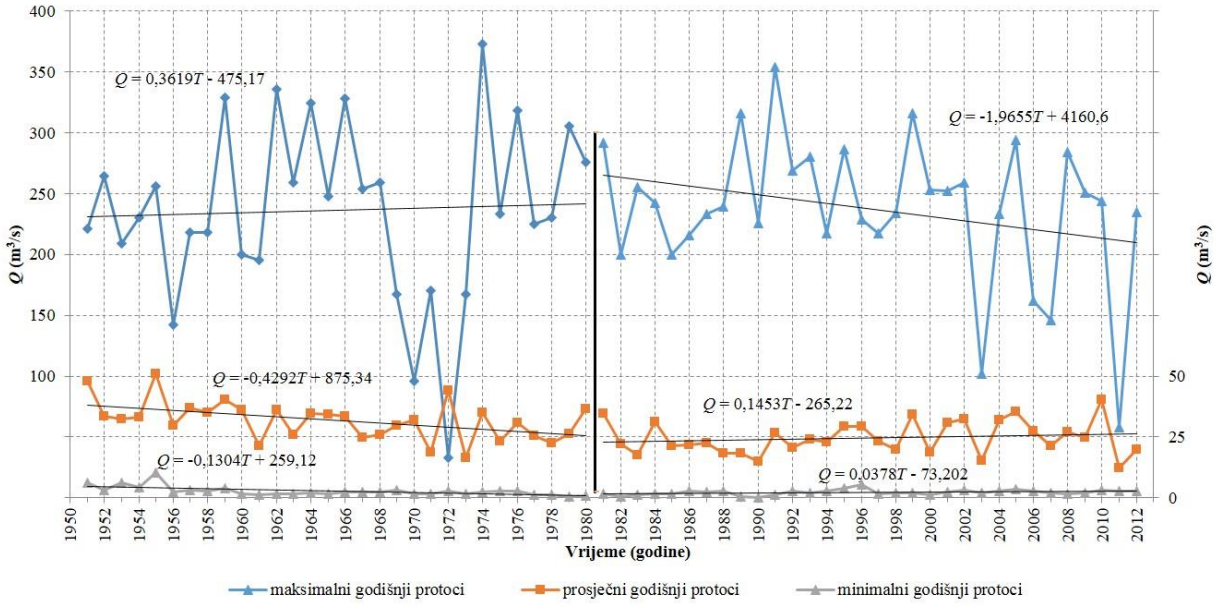
Slika 5.9 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Gornje Dobre u profilu Turkovići u razdobljima (1963.-1980.) i (1981.-2012.)



Slika 5.10 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Donje Dobre u profilu Stative Donje u razdobljima (1951.-1980.) i (1981.-2012.)

U profilu Turkovići na Gornjoj Dobri maksimalni godišnji protoci u prvom razdoblju (1963.-1980.) imaju opadajući trend, a u drugom razdoblju (1981.-2012.) rastući. Srednji godišnji protoci u prvom razdoblju (1963.-1980.) imaju rastući trend, u drugom razdoblju (1981.-2012.) postoji prekid od 1994. do 1998. godine zbog Domovinskog rata. I u prvom i drugom dijelu drugog razdoblja (1981.-2012.) trend srednjih godišnjih protoka je opadajući. Minimalni godišnji protoci imaju u oba razdoblja rastući trend, nešto većeg prirasta u drugom razdoblju (1981.-2012.). U profilu Stative Donje na Donjoj Dobri maksimalni i srednji godišnji protoci imaju rastući trend u prvom razdoblju (1951.-1980.). U drugom razdoblju (1981.-2012.) maksimalni godišnji protoci imaju blagi opadajući trend, dok srednji godišnji protoci imaju i dalje rastući slabi trend. Minimalni godišnji protoci u prvom razdoblju (1951.-1980.) imaju blagi opadajući trend, dok u drugom razdoblju (1981.-2012.) imaju blagi rastući trend.

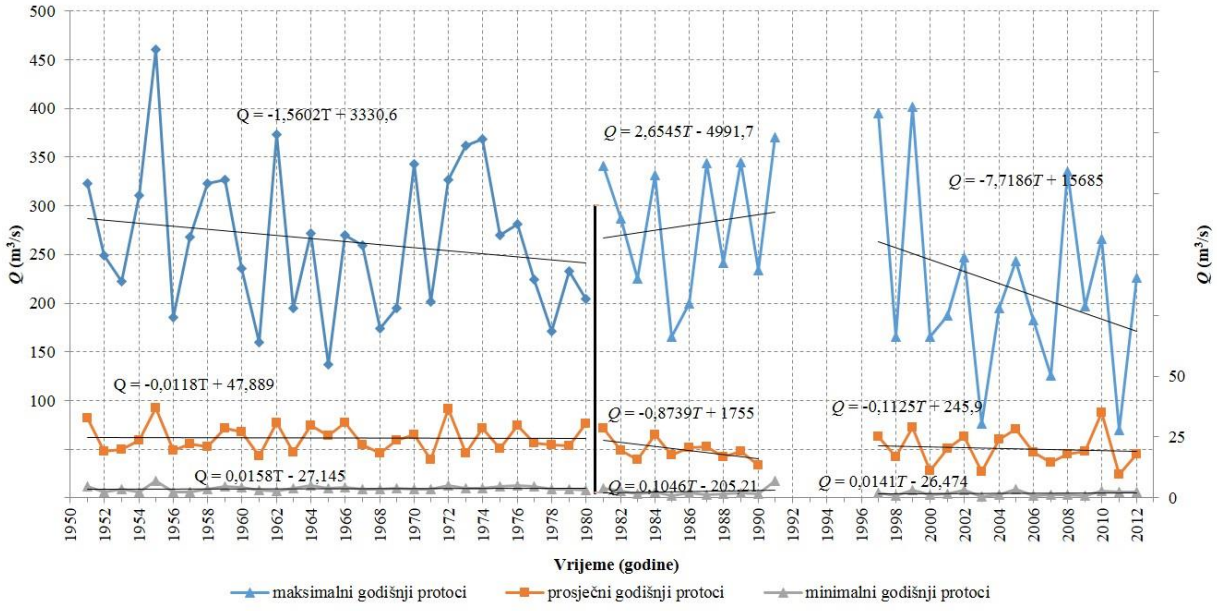
Na slici 5.11 prikazani su hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka Mrežnice u profilu Mrzlo polje za razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.), a na hidrogramima su označeni i trendovi.



Slika 5.11 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Mrežnice u profilu Mrzlo polje u razdobljima (1951.-1980.) i (1981.-2012.)

U ranijem razdoblju (1951.-1980.) maksimalni protoci imaju blago rastući trend, dok srednji i minimalni godišnji protoci imaju blago opadajući trend. U novijem razdoblju (1981.-2012.) maksimalni godišnji protoci imaju izraženiji opadajući trend dok srednji i minimalni godišnji protoci imaju blago rastući trend.

Na slici 5.12 prikazani su hidrogrami srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka Korane u profilu Veljun za razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.), a na hidrogramima su označeni i trendovi.



Slika 5.12 Maksimalni, srednji i minimalni godišnji protoci Korane u profilu Veljun u razdobljima (1951.-1980.) i (1981.-2012.)

Maksimalni godišnji protoci u ranijem razdoblju (1951.-1980.) imaju opadajući trend, a u kasnijem razdoblju (1981.-2012.) se taj opadajući trend još pojačava. Trendovi srednjih i minimalnih godišnjih protoka su u oba razdoblja slabo izraženi, ali opadajući.

Za profil Veljun na Korani važno je napomenuti da zbog Domovinskog rata ne postoje podaci iz razdoblja (1992.-1996.).

Kod minimalnih godišnjih protoka, u ranijem razdoblju opadajući trend je imalo je sedam nizova, a rastući trend njih 12. U kasnijem razdoblju opadajući trend imalo je 15 nizova, a rastući 17 nizova.

Broj opadajućih trendova u novijem razdoblju (1981.-2012.) u odnosu na ranije razdoblje (1951.-1980.) se najviše povećao kod maksimalnih godišnjih protoka a najmanje kod minimalnih. Broj rastućih trendova se smanjio kod maksimalnih godišnjih protoka, dok se kod srednjih i minimalnih godišnjih protoka taj broj povećao, no ne toliko koliko se povećao broj opadajućih trendova. Sve ovo govori u korist činjenici da je početkom 1980-ih započelo sušnije hidrološko razdoblje u odnosu na ranije razdoblje – koje se razmatra počem od 1951. godine. Glavne karakteristike razmatranih nizova, osim što su iz sušnijeg razdoblja od niza (1951.-1980.) je i

činjenica da je na većini stanica prekid u mjerenju zbog Domovinskog rata. Opći zaključci o trendovima podjednaki su i na sve četiri rijeke sliva Kupe (tablice 5.8, 5.9 i 5.10).

5.4. Oborine na krškim slivovima

Među najvažnijim faktorima za analiziranje otjecanja vode i oblika hidrograma su intenzitet i trajanje oborina. Za realno određivanje veličina i rasporeda oborina po pojedinim slivnim površinama potrebno je raspolagati kvalitetnim podacima s meteoroloških stanica. Meteorološke stanice bi trebale biti optimalno raspoređene, a motrenja bi trebalo provoditi neprekidno i dovoljno dugo (barem 30 godina). Krški slivovi u Hrvatskoj velikim dijelom pripadaju planinskim područjima za koja redovito nema dovoljno podataka. Takav su primjer slivovi Kupe i njezinih, ovdje razmatranih pritoka u kršu.

Unutar sliva Kupe, postoje samo tri glavne meteorološke stanice, Parg, Ogulin i Karlovac. Ostale klimatološke stanice su Risnjak-Crni Lug, Delnice-Cob, Lokve Brana, Vrelo Ličanke, Begovo Razdolje, Bosiljevo, Gorinci, Drežnica-Krakar, Slunj, Plaški i Plitvička Jezera.

U Državnome hidrometeorološkome zavodu u Zagrebu 1984. godine izrađene su karte izohijeta srednjih godišnjih oborina za cijelu Hrvatsku u mjerilu 1:500.000 (Pleško i sur., 1984). U tim kartama razmak između izohijeta za godišnje oborine do 1.000 mm je 100 mm, od 1.000 do 2.000 mm razmak je 200 mm, a iznad 2.000 mm oborine razmak je 500 mm. Iz raspoloživih podataka nije moguće pouzdano odrediti karte izohijeta u većim mjerilima s manjim razmacima između izohijeta za oborine iznad 1.000 mm. U radu Gajić-Čapka i sur. (2003) izrađena je digitalna karta srednjih godišnjih količina oborine na temelju podataka iz razdoblja (1961.-1990.).

Zbog nedovoljno guste mreže kišomjernih postaja, pogrešaka pri mjerenju oborine i karata izohijeta neprikladnih za područje istraživanja, vrijednosti srednjih godišnjih bruto oborina *P* palih na sliv i karakteristični parametar vezan uz oborinu – prosječni otjecajni koeficijent *c*, treba smatrati približno određenim. Ovaj se općeniti zaključak za cijeli Dinarski krš, odnosi i na razmatrano područje obraslog krša.

6. Karakteristični parametri

Ovdje su opisani i obrazloženi karakteristični parametri, ovisno o raspoloživim osnovnim podlogama, koji su obrađeni u regionalnoj analizi u obraslom kršu ovdje razmatranih slivova Kupe i pritoka, a to su:

1. veličine utjecajnih slivnih površina A (km^2),
2. prosječne godišnje oborine P (mm),
3. prosječne godišnje efektivne oborine P_e (mm),
4. srednji protoci Q (m^3/s) i njihovi glavni deskriptori: standardno odstupanje σ (m^3/s) te koeficijenti varijacije c_v i asimetrije c_s,
5. prosječni godišnji koeficijenti otjecanja c,
6. maksimalni godišnji protoci: najveći zabilježeni Q_M i srednji Q_{Msr} s deskriptorima σ_M, c_{vM} i c_{sM} te Q_{M10}, Q_{M100} i Q_{M1000} (m^3/s),
7. maksimalni specifični dotoci sa sliva q_M te q_{M10}, q_{M100} i q_{M1000} (m^3/s/km^2),
8. minimalni godišnji protoci: najmanji zabilježeni Q_m i srednji Q_{msr} s deskriptorima σ_m, c_{vm} i c_{sm},
9. modulni koeficijenti maksimalnih godišnjih zabilježenih protoka $\frac{Q_M}{Q_{Msr}}$,
10. modulni koeficijenti minimalnih godišnjih zabilježenih protoka $\frac{Q_m}{Q_{msr}}$.
11. dnevne vrijednosti oborine P_d (mm) i srednje dnevne vrijednosti protoka Q_d (m^3/s) u frekvencijskom spektru i njihovi spektri snage,
12. volumeni velikih vodnih valova za 10-, 100- i 1000-godišnje povratno razdoblje V_{10}, V_{100} i V_{1000}.

Analizirani su i uspoređeni spektri frekvencija protoka i oborine, no tu nije bilo moguće analizu provesti na cijelom slivu Kupe, nego su obrađeni karakteristični hidrološki profili na slivovima koji su u neposrednoj blizini mjerodavnih klimatoloških stanica.

Pri izboru parametara za regionalne hidrološke analize u kršu u prvom se redu vodilo računa o tome da se obuhvati najvažnije karakteristične parametre, zatim o važnosti pojedinih parametara za praktičnu primjenu, kakvoći prikupljenih podataka, dovoljnoj duljini, neprekidnosti i homogenosti vremenskih nizova te o novijim teorijskim pristupima (obrade dnevnih vrijednosti protoka i oborine). Također, razmatrani parametri moraju biti mjerene, a ne iskustveno dobivene veličine. Prvenstveno je to razlog da u regionalnu hidrološku analizu nije uključen srednji godišnji pronos nanosa jer postoji premalo mjerenja lebdećeg i vučenog nanosa. No budući da je takvih mjerenja premalo na krškim vodotocima u Hrvatskoj, pronos nanosa se najčešće definira iz iskustvenih izraza te se zbog toga usvajaju vrijednosti na strani veće sigurnosti. Inženjerski, kod projektiranja je to ispravan pristup, međutim kod regionalne analize takve vrijednosti su u samom početku opterećene znatnim pogreškama i ne daju dovoljno pouzdane veze s drugim parametrima.

U ranijoj regionalnoj analizi (Žugaj, 1993) također su razmotreni i parametri izvedeni iz statističkih momenata većih od trećeg reda, primjerice koeficijent spljoštenosti (krutosti) γ, kojim se opisuje spljoštenost vrha krivulje učestalosti:

$$\gamma = \frac{m_4}{\sigma^4} \tag{6.1}$$

i eksces:

$$E = \gamma - 3. \tag{6.2}$$

Eksces predstavlja odnos krutosti raspodjele razmatranog niza u odnosu na normalnu raspodjelu čiji je standard krutosti $q_0 = 3$. Parametri γ i E izravno ovise o centralnom (središnjem) momentu četvrtog reda:

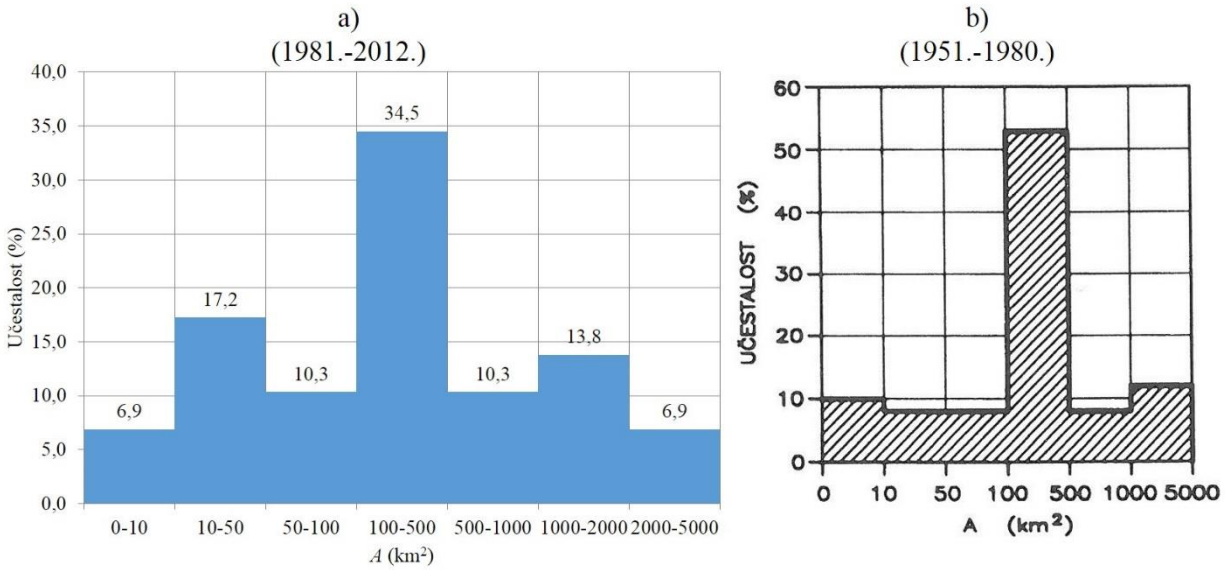
$$m_4 = \frac{1}{n}\sum\left(X - \overline{X}\right)^4 \tag{6.3}$$

gdje su n broj članova niza, X pojedini član niza, a $\overline{X}$ prosjek niza.

Budući da je razdoblje obrade ove analize 32 godine, koeficijenti spljoštenosti i ekscesi tih nizova nisu dovoljno pouzdani karakteristični parametri za regionalnu hidrološku analizu i oni nisu razmatrani.

Glavne značajke pojedinih karakterističnih parametara, koje se analizira, redovito se prikazuju odgovarajućim histogramima. S obzirom da se ovdje provedena razmatranja u određenoj mjeri nadovezuju na raniju regionalnu analizu u kršu (Žugaj, 1995), kod istih su karakterističnih parametara, uz histograme za sliv Kupe u kršu, prikazani i histogrami iz ranije regionalne analize.

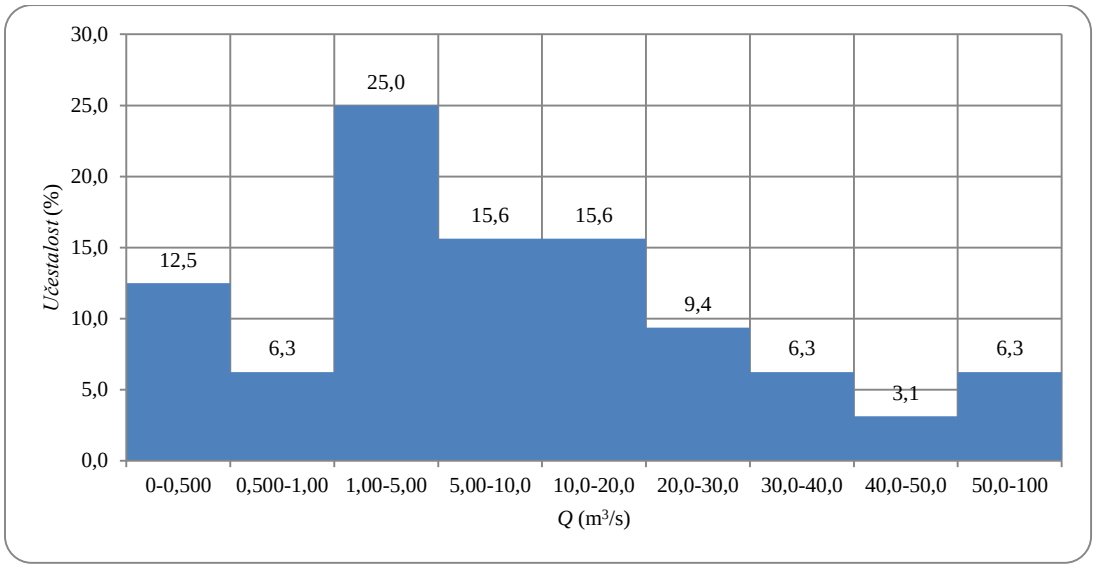
Histogrami učestalosti utjecajnih slivnih površina A, srednjih godišnjih protoka Q, bruto oborine P, efektivne oborine P_e, koeficijenata varijacije i asimetrije srednjih godišnjih protoka c_v i c_s te koeficijenta otjecanja c razmatranih nizova prikazani su na slikama 6.1 - 6.7.



Slika 6.1 Histogram učestalosti utjecajnih slivnih površina A a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

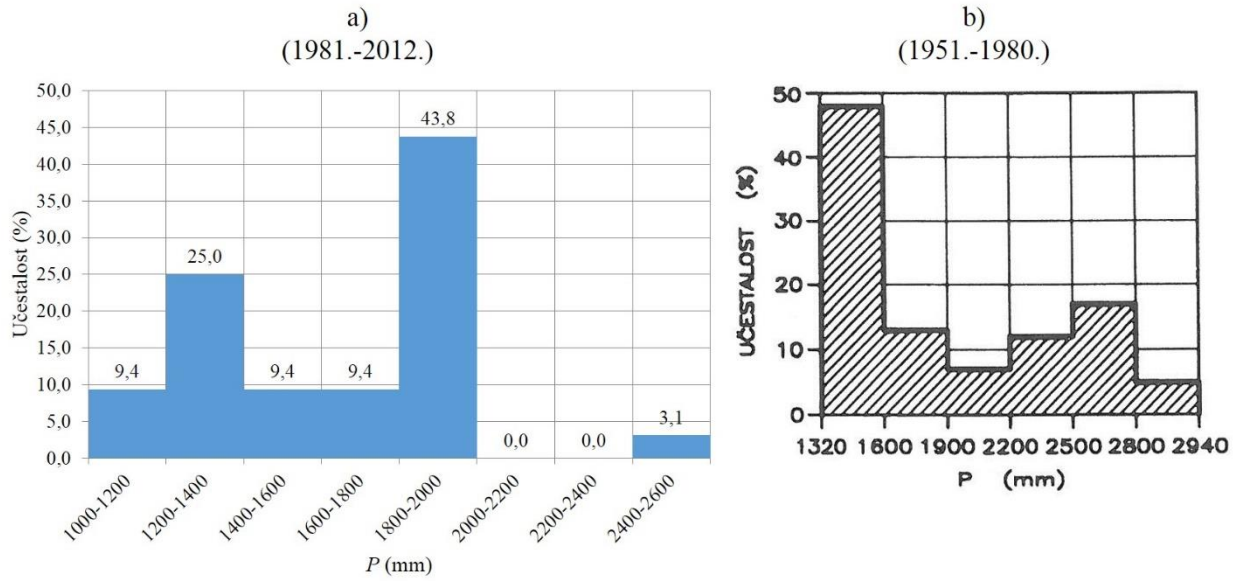
U ovoj analizi krškog porječja Kupe i njezinih glavnih pritoka Dobre, Mrežnice i Korane obuhvaćeni su slivovi veličina od A = 0,4 km^2 (Izvor Bistreca) pa do A = 2.337 km^2 (Kupa do Kamanja). Prema histogramu učestalosti slivnih površina na slici 6.1a, najveći broj slivnih površina zastupljen je između 100 i 500 km^2, njih 34,5%. Manjih i većih slivova unutar raspona njihovih površina otprilike ima podjednako i praktički su simetrično raspodijeljeni. Usporedivši ovu raspodjelu krškog sliva Kupe i pritoka s raspodjelom iz ranije regionalne analize iz 1995. godine

na slici 6.1b, kod koje se za 54 posto razmatranih slivova, veličine utjecajnih slivnih površina kreću od 100 do 500 km^2, veličine slivova su slično raspodijeljene.



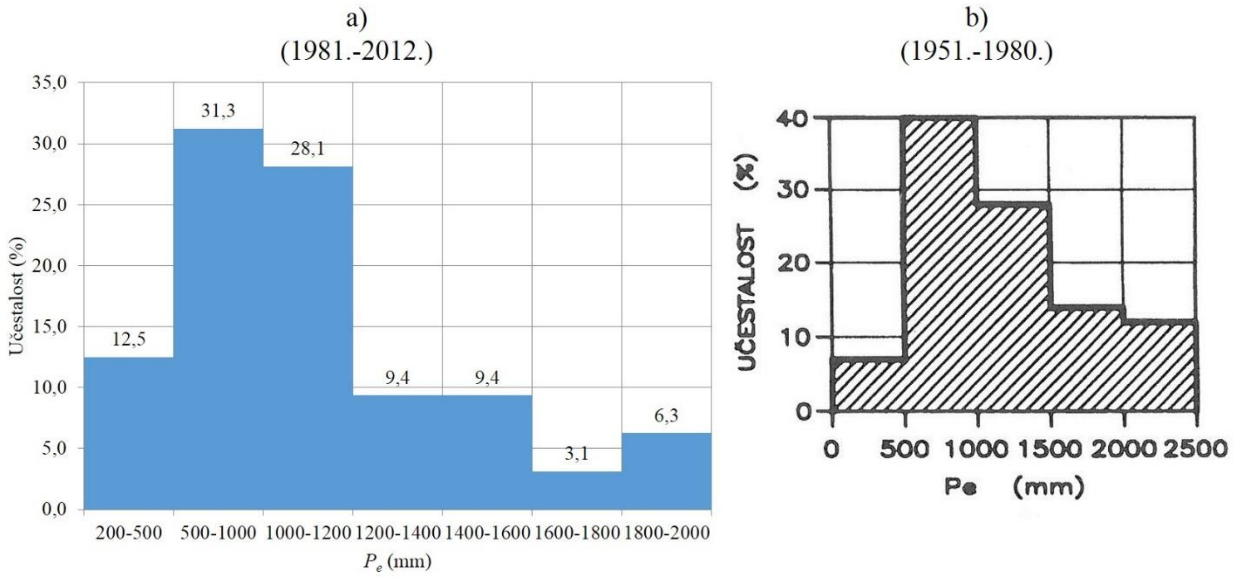
Slika 6.2 Histogram učestalosti srednjih godišnjih protoka *Q*

Srednji godišnji protoci kreću se od 0,050 m^3/s na Sušnju u profilu Plitvički Ljeskovac do 66,5 m^3/s na Kupi u profilu Metlika. Srednji godišnji protok na stanici Metlika je veći nego na stanici Kamanje zbog toga što hidrološkom stanicom Metlika upravlja Agencije Republike Slovenije za okolje – ARSO, čija je protočna krivulja nedostupna, a hidrološkom stanicom Kamanje upravlja DHMZ RH. Prema histogramu učestalosti srednjih godišnjih protoka *Q* na slici 6.2, najučestaliji su protoci između 1,00 i 5,00 m^3/s, njih 25,0%, a najmanje ih ima između 40,0 i 50,0 m^3/s, njih 3,1%.



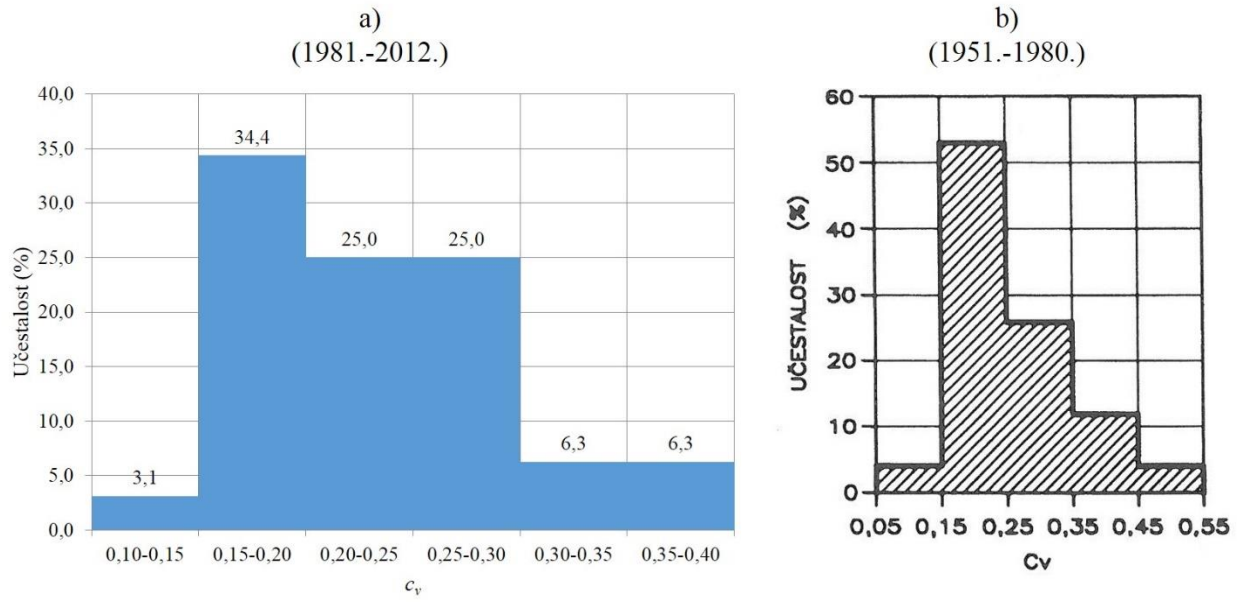
Slika 6.3 Histogram učestalosti godišnjih bruto oborina *P* a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

Količine bruto godišnje oborine kreću se u granicama od 2.510 mm na slivu Kupe do profila Smrečje pa do 1.120 mm na slivu Dobre do profila Stative Donje. Prema histogramu učestalosti na slici 6.3a, najučestalije oborine su između 1.800 i 2.000 mm u 43,8% slučajeva, a osim oborina između 2.000 i 2.400 mm koje izostaju, najmanje učestale su oborine između 2.400 i 2.600 mm u 3,1% slučajeva. U ranijoj regionalnoj hidrološkoj analizi iz 1995. godine, na slici 6.3b prosječne godišnje bruto oborine se u 71 posto slučajeva kreću od 1.300 mm do 1.900 mm i količine oborina nisu slične u ta dva razdoblja, za ovdje razmatrani obrasli i ranije razmatrani cijeli hrvatski krš.



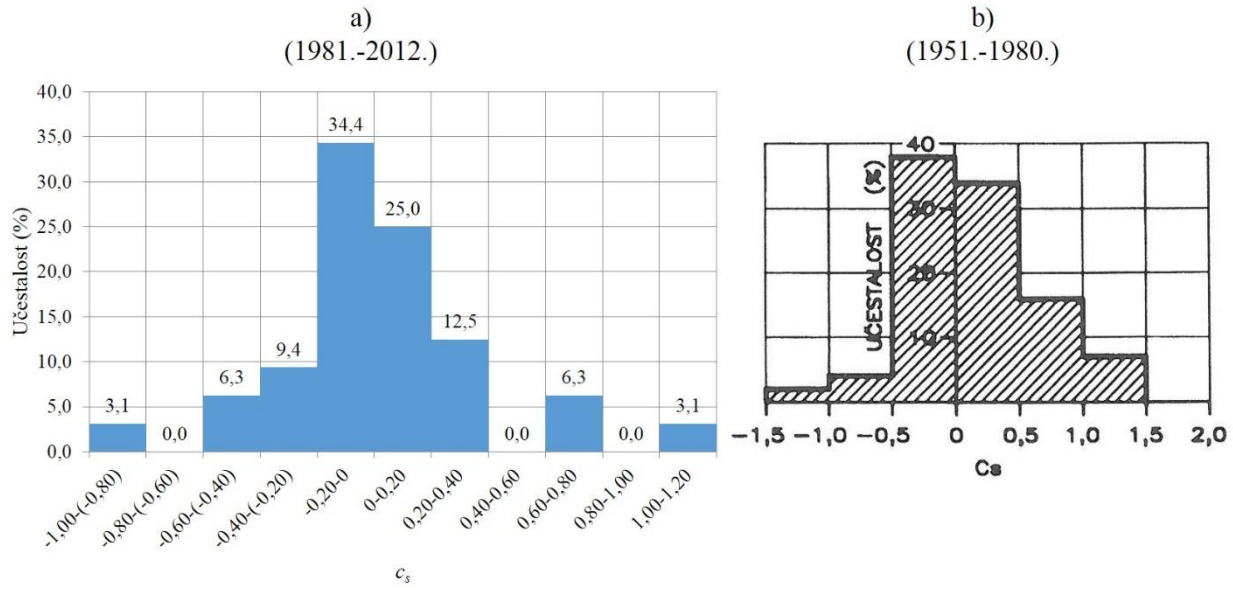
Slika 6.4 Histogram učestalosti godišnje efektivne oborine P_e a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

Efektivna godišnja oborina kreće se u granicama od 1.994 mm na slivu Kupe do profila Kupari, pa do 211 mm na slivu Korane do profila Rodić poljana. Prema histogramu učestalosti na slici 6.4a, najučestalije efektivne oborine su između 500 i 1.000 mm u 31,3% slučajeva, a najmanje učestale su efektivne oborine između 1.600 i 1.800 mm u 3,1% slučajeva. U ranijoj obradi iz 1995. godine na slici 6.4b efektivne godišnje oborine su u 66 posto slučajeva od 500 mm do 1.500 mm i vrlo su slično raspodijeljene kao i na, ovdje razmatranom slivu Kupe.



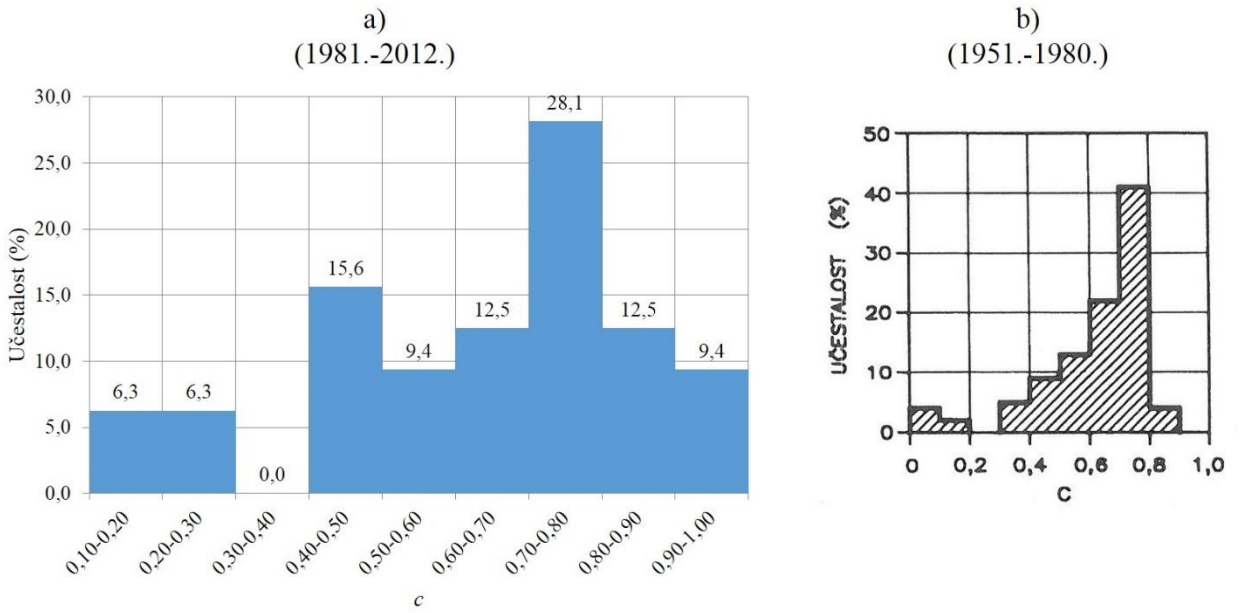
Slika 6.5 Histogram učestalosti koeficijenta varijacije srednjih godišnjih protoka c_v a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

Prema histogramu učestalosti na slici 6.5a, u 34,4% slučajeva vrijednosti koeficijenata varijacije srednjih godišnjih protoka c_v kreću se između 0,15 i 0,20. Najveći koeficijent varijacije je 0,36 na profilu Luketići na Korani, a najmanji 0,15 na profilu Brod na Kupi na Kupici. Vrlo slična raspodjela koeficijenta varijacije je i u ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine (slika 6.5b).



Slika 6.6 Histogram učestalosti koeficijenta asimetrije srednjih godišnjih protoka c_s a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

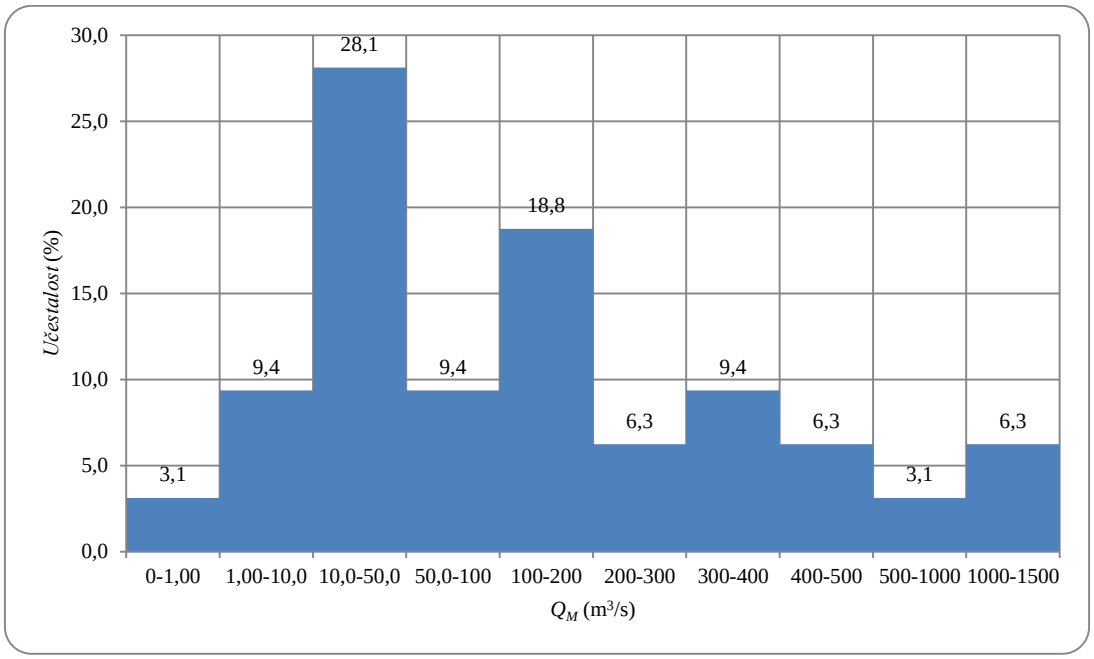
Prema histogramu učestalosti na slici 6.6a, u 34,4% slučajeva vrijednosti koeficijenata asimetrije srednjih godišnjih protoka c_s kreću se između -0,20 i 0,0. Najveći koeficijent asimetrije je c_s = 1,17 na profilu Rodić poljana na Sartuku, a najmanji c_s = -0,82 na profilu Plitvice na Plitvici. Učestalosti su u ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine također slične (slika 6.6b).



Slika 6.7 Histogram učestalosti otjecajnih koeficijenata srednjih voda *c* a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

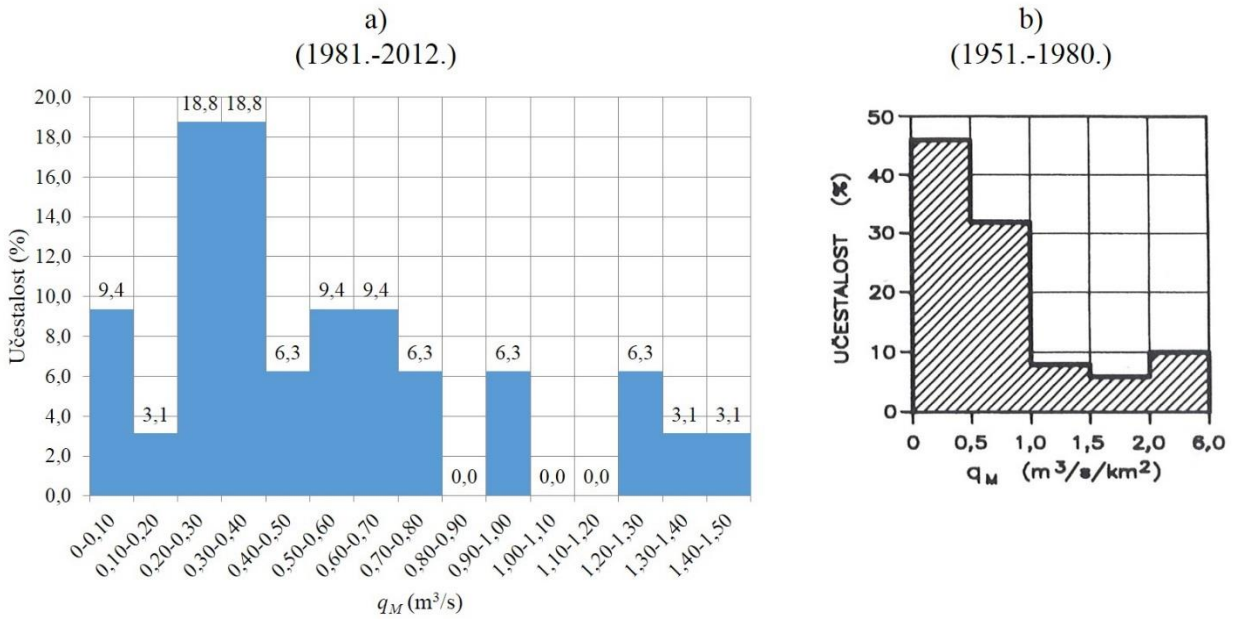
Prema histogramu učestalosti na slici 6.7a, vrijednosti otjecajnog koeficijenta srednjih voda *c* su u 28,1% slučajeva između 0,70 i 0,80. Najviši otjecajni koeficijent je u profilu Kupari i iznosi visokih $c = 0{,}997$, a najniži je u profilu Rodić poljana i iznosi $c = 0{,}11$. Srednja vrijednost otjecajnog koeficijenta je $c = 0{,}64$. Slična je raspodjela i u ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine na slici 6.7b.

Histogrami učestalosti maksimalnih godišnjih protoka Q_M, maksimalnih specifičnih godišnjih protoka q_M, koeficijenata varijacije i asimetrije maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka c_v i c_s razmatranih nizova prikazani su na slikama 6.8 - 6.13.



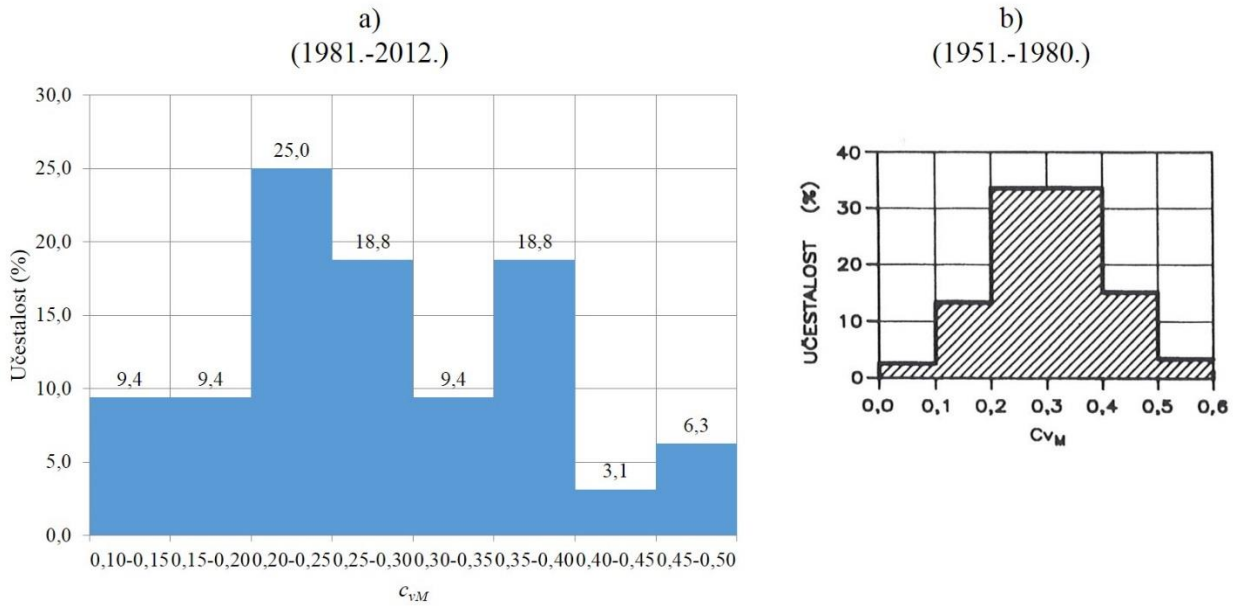
Slika 6.8 Histogram učestalosti maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka Q_M

Maksimalni godišnji protoci kreću se od 0,168 m^3/s na Sušnju u profilu Plitvički Ljeskovac do 1.123 m^3/s na Kupi u profilu Kamanje. Prema histogramu učestalosti maksimalnih godišnjih protoka Q_M na slici 6.8, najučestaliji su protoci između 10,0 i 50,0 m^3/s, njih 28,1%, a najmanje ih ima podjednako između 0 i 1,0 m^3/s te između 500 i 1.000 m^3/s, njih 3,1%.



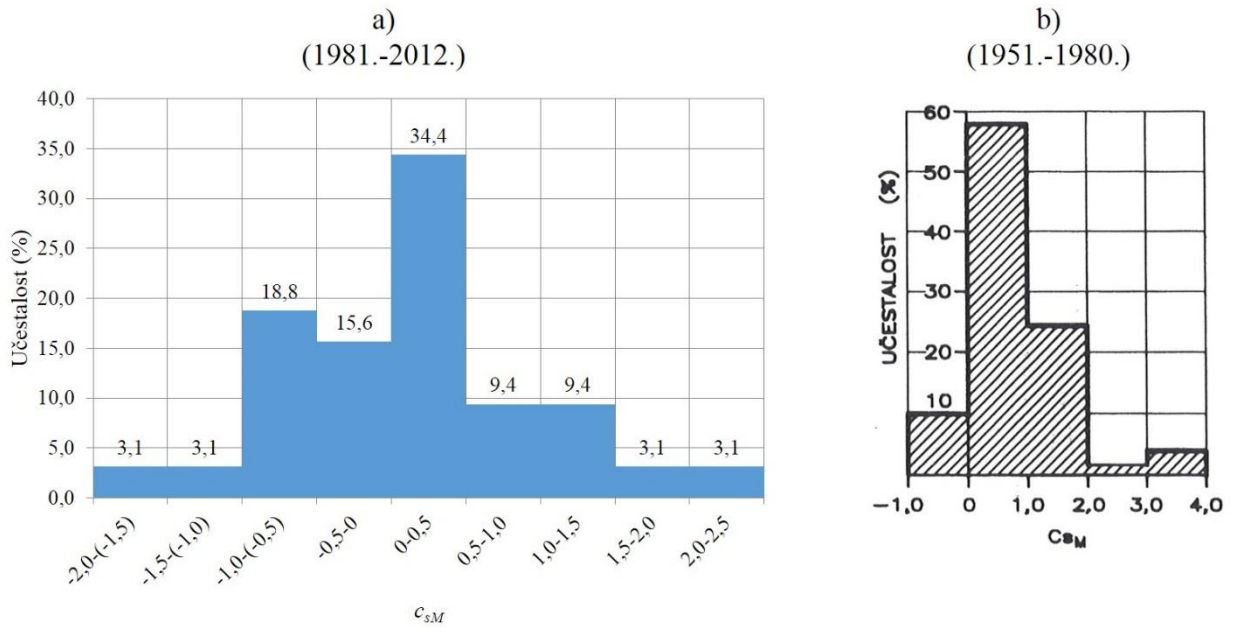
Slika 6.9 Histogram učestalosti maksimalnih zabilježenih specifičnih godišnjih protoka q_M a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

Maksimalni specifični godišnji protoci kreću se od 0,034 m^3/s na Sušnju u profilu Plitvički Ljeskovac do 1,49 m^3/s na Kupici u profilu Brod na Kupi. Prema histogramu učestalosti maksimalnih specifičnih godišnjih protoka q_M na slici 6.9a, najučestaliji su protoci podjednako između 0,20 i 0,30 m^3/s te 0,30 i 0,40 m^3/s, njih 18,8%, a najmanje ih ima podjednako između 0,10 i 0,20 m^3/s te između 1,30 i 1,40 m^3/s i 1,40 i 1,50 m^3/s, njih 3,1%. U ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine (slika 6.9b), histogram učestalosti ima slično raspodijeljene maksimalne specifične protoke.



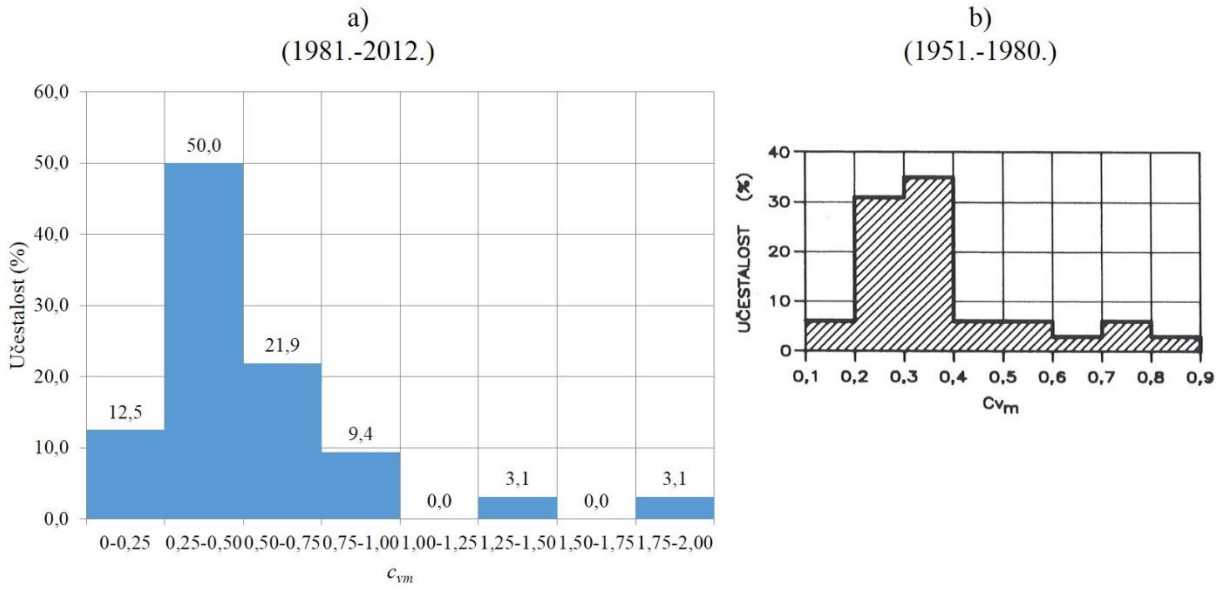
Slika 6.10 Histogram učestalosti koeficijenta varijacije maksimalnih godišnjih protoka c_{vM} a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

Prema histogramu učestalosti na slici 6.10a, u 25,0% slučajeva koeficijent varijacije maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka c_{vM} kreće se između 0,20 i 0,25. Najveći koeficijent varijacije je c_v = 0,46 na profilu Veljun na Korani, a najmanji c_v = 0,12 na profilu Brestovac na Vitunjčici. Prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine, histogram učestalosti na slici 6.10b izgleda slično, ali je raspodjela praktički simetrična zbog širih granica razreda.



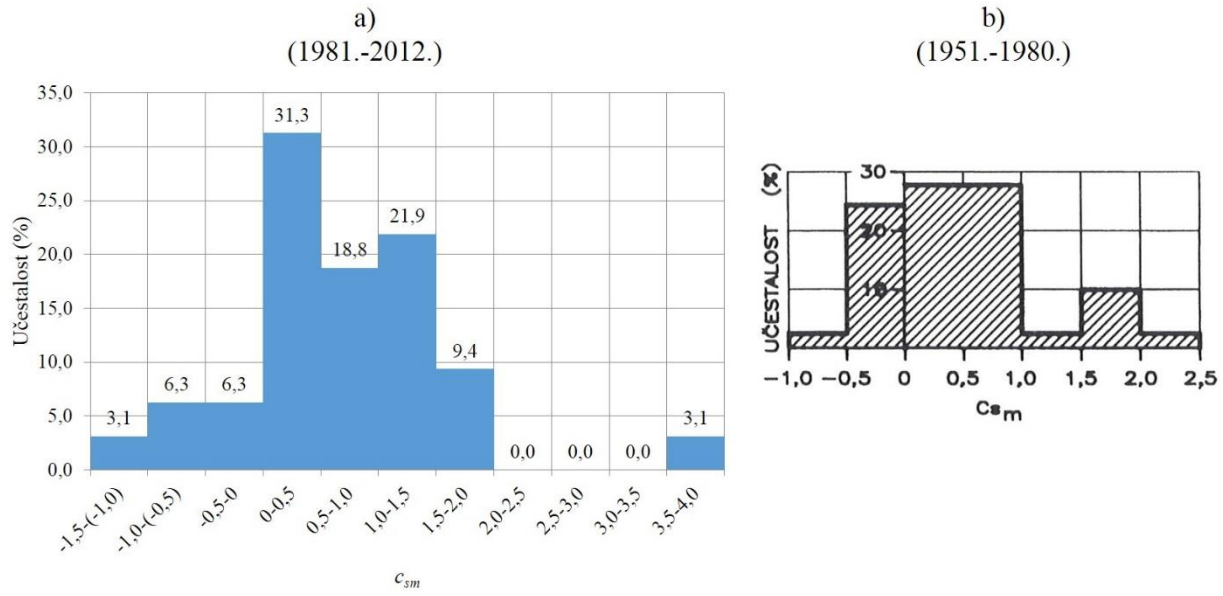
Slika 6.11 Histogram učestalosti koeficijenta asimetrije maksimalnih godišnjih protoka c_{sM} a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

Prema histogramu učestalosti na slici 6.11a, vrijednost koeficijenta asimetrije maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka c_{sM} kreću se u vrlo širokim granicama, od c_{vM} = -1,53 na Matici u profilu Plitvički Ljeskovac do c_{vM} = 2,21 na Kupici u profilu Brod na kupi. U 34,4% slučajeva koeficijent asimetrije maksimalnih godišnjih protoka c_{sM} kreće se između 0 i 0,5. Raspodjela u ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine prikazana na slici 6.11b nije, ali ima veće pozitivne vrijednosti (do 4,0) i niže negativne vrijednosti (do -1,0) u odnosu na ovdje obrađeni sliv Kupe u kršu.



Slika 6.12 Histogram učestalosti koeficijenta varijacije minimalnih godišnjih protoka c_{vm} a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

Prema histogramu učestalosti na slici 6.12a, kod minimalnih godišnjih protoka vrijednosti koeficijenta varijacije minimalnih godišnjih protoka c_{vm} kreću se u rasponu od c_{vm} = 0,00 na Rječici u profilu Plitvička jezera do c_{vm} = 1,82 na Gerovčici u profilu Smrečje. U 50,0% slučajeva vrijednost koeficijenta varijacije c_{vm} kreće se od 0,25 do 0,50. Slična raspodjela učestalosti c_{vm} je i u ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine prikazanoj na slici 6.12b.



Slika 6.13 Histogram učestalosti koeficijenta asimetrije minimalnih godišnjih protoka c_{sm} a) za razdoblje obrade (1981.-2012.), b) prema ranijoj obradi hrvatskog krša iz 1995. godine

Prema histogramu učestalosti na slici 6.13a, koeficijenti asimetrije minimalnih godišnjih protoka kreću se od c_{sm} = -1,19 na Rječici u profilu Plitvička jezera do c_{sm} = 3,51 na Gerovčici u profilu Smrečje. Prema histogramu učestalosti, najučestaliji koeficijent asimetrije minimalnih godišnjih protoka kreće se između 0 i 0,5 u 31,3% slučajeva. U ranijoj obradi iz 1995. godine je raspodjela slična, ali s manjim rasponom vrijednosti.

Iskustveno se pokazalo da su linearne veze oblika $y = ax + b$ i nelinearne veze oblika $y = ax^b$ najjednostavnije, a u hidrologiji često i najprilagodljivije. Treba napomenuti da je broj razmatranih nelinearnih ovisnosti manji od linearnih jer ovisnost nekih varijabli nije moguće dobiti zbog negativnih ili nul-vrijednosti (primjerice koeficijenti asimetrije c_s, minimalni godišnji protoci Q_m).

Za linearnu ovisnost oblika $y = ax + b$, parametar ocjene prilagodbe na izmjerene podatke, koeficijent korelacije r definiran je izrazom:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n\sigma_x\sigma_y} \tag{6.4}$$

gdje su σ_x i σ_y standardna odstupanja nizova x i y, x_i i y_i su i-ti članovi niza, a $\bar{x}$ i $\bar{y}$ su srednjaci nizova i n je broj članova niza.

$$\sigma_x = \pm\sqrt{\frac{1}{n}\sum\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \tag{6.5}$$

$$\sigma_y = \pm\sqrt{\frac{1}{n}\sum\left(y_i - \bar{y}\right)^2} \tag{6.6}$$

Kod nelinearne ovisnosti oblika $y = ax^b$ osnovni oblici izraza (6.4), (6.5) i (6.6) ostaju isti, ali je nizove x i y potrebno normalizirati. Za određivanje pogreške procjene σ^*/σ_y, potrebno je znati rezidualnu varijancu σ^*:

$$\sigma^* = \pm\sqrt{\frac{n-1}{n-2}\sigma_y^2\left(1-r^2\right)} \tag{6.7}$$

Iz izraza (6.7) očito je da rezidualna varijanca σ^*, odnosno standardna pogreška procjene σ^*/σ_y izravno ovisna o koeficijentu korelacije r. Granična vrijednost koeficijenta korelacije $r = 0{,}80$, iznad koje se korelacije smatraju čvrstima, odgovara vrijednosti standardne pogreške procjene $\sigma^*/\sigma_y = 0{,}60$. Drugim riječima, $r \geq |0{,}80|$ odgovara $\frac{\sigma^*}{\sigma_y} < 0{,}60$.

Zbog ove međusobne ovisnosti, koeficijent korelacije r je dovoljan početni pokazatelj kvalitete ovisnosti parametara.

Temeljem koeficijenta korelacije $r \geq |0{,}80|$ utvrđivati će se koje veze ima smisla razmatrati dok će se prihvatljivost tih veza ocjenjivati na temelju širine intervala pouzdanosti. Rasipavanje ulaznih podataka redovito u praksi slijedi normalnu razdiobu, a interval pouzdanosti σ_p, unutar kojeg se nalaze ulazni podaci s 95% vjerojatnosti, je dan:

$$\sigma_p = \pm 1{,}96\,\sigma_0 = \pm 1{,}96\sqrt{\frac{\sum\left(\frac{x_i - x}{x}\right)^2}{n}} \tag{6.8}$$

gdje je σ_0 relativno odstupanje, x_i je ulazni podatak, x dobivena vrijednost prema izvedenoj zakonitosti i n broj ulaznih izračunskih podataka.

7. Dvoparametarske zakonitosti veza

Odabiru dvoparametarskih zakonitosti veza karakterističnih hidroloških i meteoroloških parametara u regionalnoj hidrološkoj analizi, opisanih u poglavlju 6, prvo se pristupilo analizom korelacije između pojedinih karakterističnih parametara. Na prilozima 6 i 7 prikazani su koeficijenti korelacije između razmatranih hidroloških i meteoroloških parametara za linearnu i nelinearnu vezu. Od razmatranih 351 linearne veze, 106 ima koeficijent korelacije $r \geq |0{,}80|$, a od 276 nelinearnih veza, njih 108 ima koeficijent korelacije $r \geq |0{,}80|$. Međutim i od tih veza koje zadovoljavaju kriterij $r \geq |0{,}80|$ bit će analizirane one veze koje ima smisla primijeniti u praksi. Primjerice, razmatrat će se veza $Q_{Mp} = f(Q_M)$ na osnovi koje se na temelju opaženog maksimalnog godišnjeg protoka može realno pretpostaviti koliki se maksimalni protok 10-, 100- ili 1.000-godišnjeg povratnog razdoblja može očekivati na nekom profilu, ili veza $\sigma = f(Q)$, koja govori u kojim su granicama odstupanja srednji godišnji protoci Q u nekom profilu.

Od raspoloživa 32 niza za srednje, 32 niza za maksimalne i 32 niza za minimalne godišnje protoke, razmatrani su svi nizovi, međutim pri ispitivanju pojedinih ovisnosti, neki nizovi su, uz određena obrazloženja, izostavljani. Primjerice, kod analize maksimalnih specifičnih dotoka q_M u ovisnosti o veličini slivova A, analiza je provedena i dala je realne rezultate samo na slivu Kupe od Kupara do Kamanja. Pri detaljnijim analizama pojedinih ovisnosti izostavljani su nizovi gdje se utvrdilo da podaci nisu dovoljno pouzdani (zbog lošeg položaja mjernog profila, prekratkog razdoblja mjerenja, presušivanja vodotoka), a to su stanice Gomirje na Ribnjaku, Smrečje na Gerovčici, Moravice na Gornjoj Dobri, Brestovac na Vitunjčici, Luketići na Korani, Plitvički Ljeskovac na Crnoj rijeci, Bijeloj rijeci, Matici i Sušnju, Plitvička jezera na Rječici, Kozjak most na Kozjak jezeru, Rodić poljana na Sartuku, Plitvice na Plitvici i Rastoke na Slunjčici. U izračunima koeficijenata korelacije navedenim na prilozima 6 i 7 nisu uključeni podaci s navedenih „nepouzdanih“ profila na uzvodnom dijelu vodotoka Korane.

Na osnovi dobivenih koeficijenata korelacije linearne ovisnosti r, prikazanim na prilogu 6, utvrđeno je da između karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka postoje četiri veze koje su čvrste i koje ima smisla dalje razmatrati. Između karakterističnih parametara srednjih i maksimalnih godišnjih protoka postoji 27 čvrstih veza, srednjih i minimalnih godišnjih protoka

postoji devet te između maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka postoji 27 čvrstih veza. Između karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka postoji 36, a između minimalnih godišnjih protoka postoje tri čvrste veze. Važno je napomenuti da svih 106 veza ima vrlo visok koeficijent korelacije, najniži je 0,79 ($P_e = f(P)$) a najviši 1,00 ($Q_{M100} = f(Q_M)$).

Kod koeficijenata korelacije nelinearnih ovisnosti prikazanih na prilogu 7, utvrđeno je da između karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka postoje četiri čvrste veze. Između karakterističnih parametara srednjih i maksimalnih godišnjih protoka postoji 27 čvrstih veza, dok između karakterističnih parametara srednjih i minimalnih godišnjih protoka postoji devet čvrstih veza. Između karakterističnih parametara maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka postoji 27 čvrstih veza. Između karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka postoji 37 čvrstih veza, dok između karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka postoje četiri čvrste veze. Raspon koeficijenata korelacije r u nelinearnoj ovisnosti isti je kao i kod linearne, od $r = 0{,}79$ ($P_e = f(P)$) do $r = 1{,}00$ ($Q_{M100} = f(Q_M)$). Nelinearne ovisnosti srednjih q, maksimalnih q_M i minimalnih q_m specifičnih godišnjih dotoka, čije su vrijednosti za pojedine profile prikazane u prilozima 3, 4 i 5, o veličinama slivova A imaju vrlo niske vrijednosti koeficijenta korelacije r. Kod veze $q = f(A)$ koeficijent korelacije za podatke s čitavog sliva Kupe je $r = 0{,}12$ je vrlo nizak i ukazuje da korelacija ne postoji. Izvede li se ta zakonitost samo na profilima duž vodotoka Kupe zajedno s profilima na Gerovčici i Čabranki, koeficijent korelacije je tada $r = -0{,}34$. Slično i kod veze $q_m = f(A)$, koeficijent korelacije za podatke s čitavog sliva Kupe je $r = -0{,}15$, a za podatke s profila duž vodotoka Kupe i profila Zamost 2 na Čabranki, koeficijent korelacije je $r = 0{,}63$. Zakonitost $q_M = f(A)$ daje prihvatljivije vrijednosti koeficijenta korelacije te je izvedena i obrazložena u poglavlju 7.2. Ovisnost srednjih q i minimalnih q_m specifičnih godišnjih protoka o veličinama sliva A imaju niske vrijednosti koeficijenta korelacije pa se te zakonitosti neće izvoditi i detaljnije analizirati.

7.1. Srednji godišnji protoci

Vrijednosti koeficijenata korelacije karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka za linearne i nelinearne veze prikazane su u tablicama 7.1 i 7.2. Iz priloga 6 i 7 vidljivo je da postoji dosta čvrstih veza između karakterističnih parametara srednjih i maksimalnih te srednjih i minimalnih godišnjih protoka, a neke je veze između njih imalo smisla analizirati.

Tablica 7.1 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka za linearnu ovisnost $y = ax + b$

	A	P	P_e	Q	σ	c_v	c_s	c
A	1	-0,65	-0,29	**0,97**	**0,99**	-0,05	-0,27	0,16
P		1	**0,79**	-0,58	-0,64	-0,13	0,13	0,19
P_e			1	-0,12	-0,23	-0,61	-0,17	0,74
Q				1	**0,97**	-0,23	-0,37	0,31
σ					1	-0,06	-0,27	0,21
c_v						1	0,41	-0,66
c_s							1	-0,29
c								1

Kod nelinearne ovisnosti, veze koeficijenta asimetrije c_s s drugim parametrima nije bilo moguće izvesti zbog negativnih vrijednosti tog parametra, međutim, usporedivši koeficijente korelacije koeficijenta asimetrije c_s s drugim parametrima za linearnu ovisnost u tablici 7.1, očito je da ni nelinearne veze ne bi bile dobre.

Tablica 7.2 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka za nelinearnu ovisnost $y = ax^b$

	A	P	P_e	Q	σ	c_v	c
A	1	-0,79	-0,26	**0,96**	**0,98**	-0,06	0,20
P		1	**0,79**	-0,69	-0,75	-0,16	0,13
P_e			1	0,02	-0,11	-0,70	0,71
Q				1	**0,98**	-0,26	0,45
σ					1	-0,08	0,33
c_v						1	-0,66
c							1

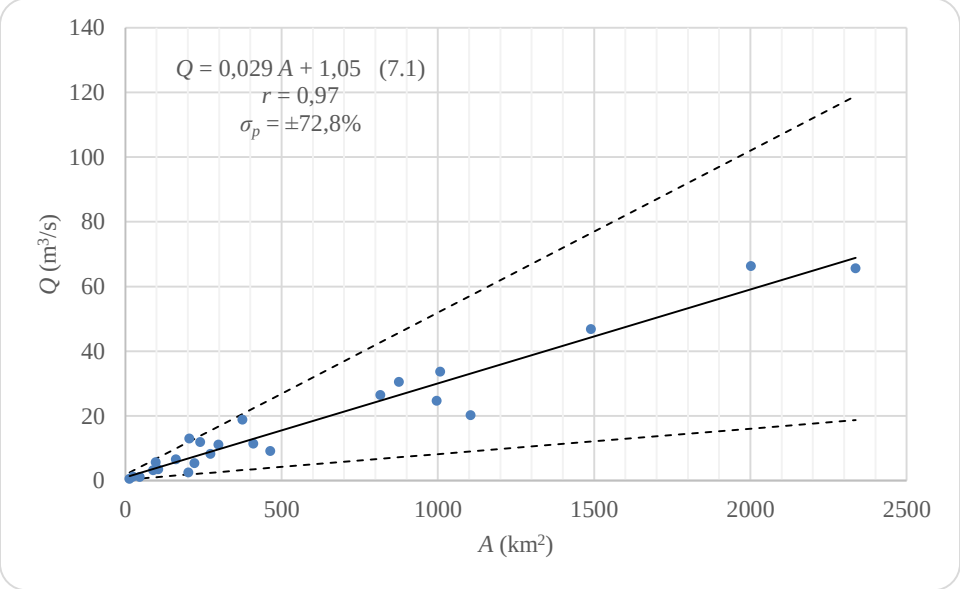
U linearnoj i nelinearnoj vezi isti parametri imaju visok koeficijent korelacije, pa su zanimljive veze $Q = f(A)$, $\sigma = f(Q)$ i $\sigma = f(A)$. Također, iako veza otjecajnog koeficijenta c i efektivne oborine P_e daje visok koeficijent korelacije, ta se veza neće razmatrati jer je po definiciji $c = P_e/P$.

U tablici 7.3 prikazane su regresijske formule između karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka za linearne i nelinearne ovisnosti.

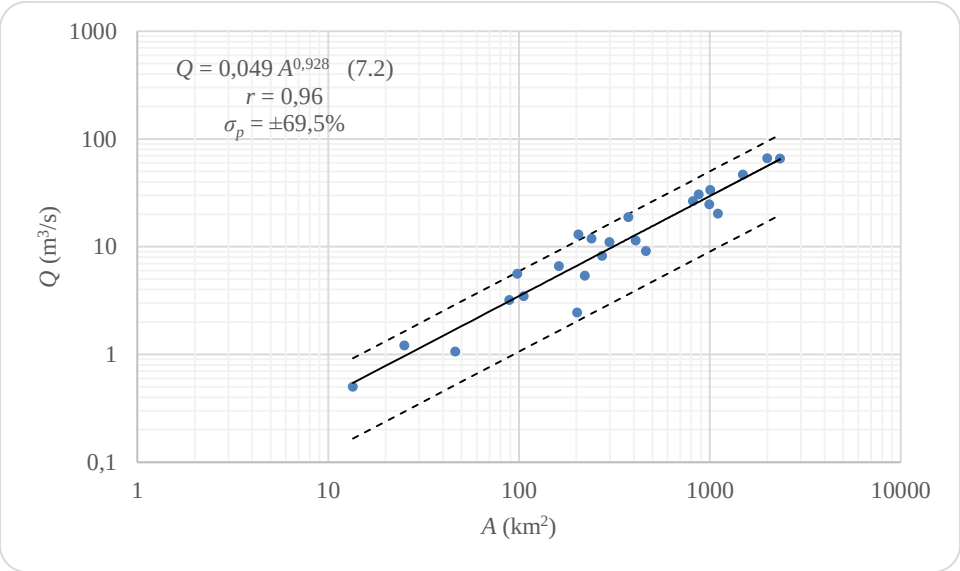
Tablica 7.3 Linearne i nelinearne formule karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka

Broj formule	Formula	n	r	σ_p (%)
7.1	$Q = 0{,}029\ A + 1{,}05$	24	0,97	±72,8
7.2	$Q = 0{,}049\ A^{0{,}928}$	24	0,96	±69,5
7.3	$Q = 0{,}029\ A + 0{,}723$	13	0,96	±48,5
7.4	$Q = 0{,}049\ A^{0{,}927}$	13	0,93	±48,4
7.5	$\sigma = 0{,}194\ Q + 0{,}255$	24	0,97	±58,6
7.6	$\sigma = 0{,}242\ Q^{0{,}949}$	24	0,98	±50,6
7.7	$\sigma = 0{,}191\ Q + 0{,}384$	19	0,97	±52,9
7.8	$\sigma = 0{,}24\ Q^{0{,}958}$	19	0,98	±44,3
7.9	$P_e = 0{,}768\ P - 31$	23	0,71	±33,6
7.10	$P_e = 1{,}00\ P^{0{,}958}$	23	0,73	±34,4

Izrazi (7.1) i (7.2) iz tablice 7.3 prikazuju, na prvi pogled, izvrsno slaganje srednjih godišnjih protoka Q s veličinama slivova A, čemu u prilog ide visok koeficijent korelacije (r = 0,97 kod linearne i r = 0,96 kod nelinearne formule), a prikazane su na slikama 7.1 i 7.2.



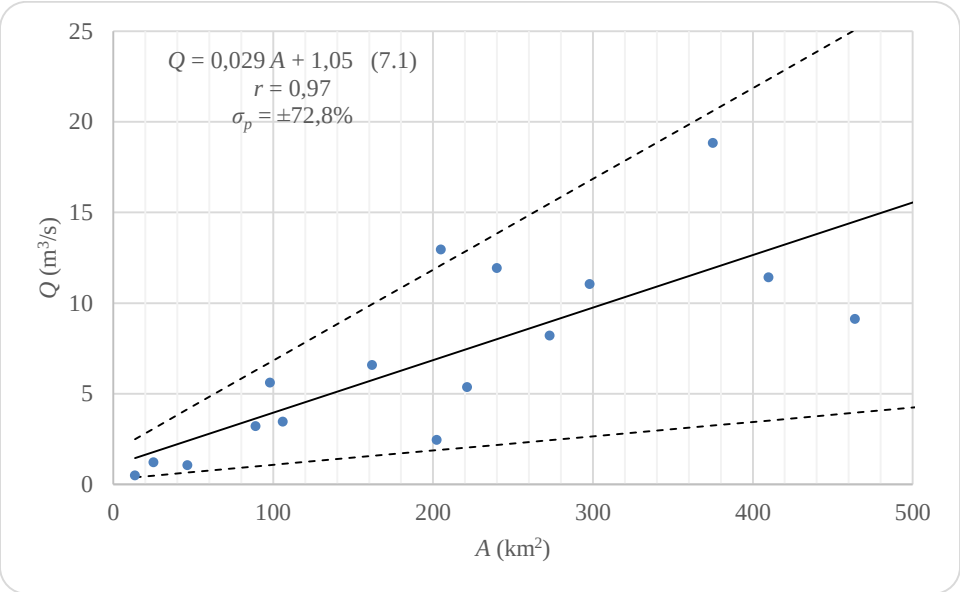
Slika 7.1 Linearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 24 podatka



Slika 7.2 Nelinearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 24 podatka

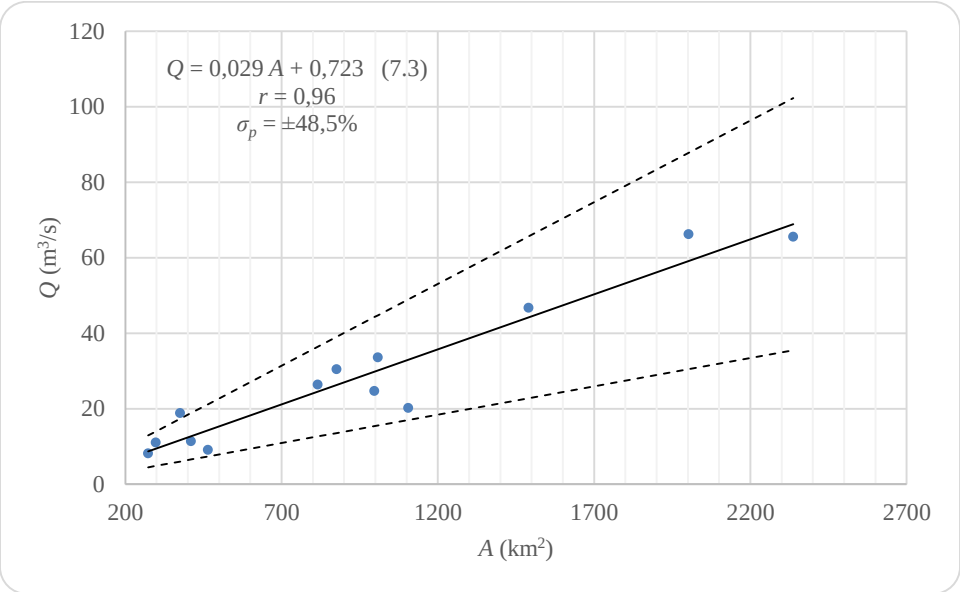
Međutim izvedene formule (7.1) i (7.2) iz tablice 7.3 nisu praktične za primjenu, jer je vjerojatno odstupanje ulaznih podataka na temelju kojih su regresijom dobivene relacije vrlo veliko, a to je potvrđeno velikom vrijednosti intervala pouzdanosti (σ_p = ±72,8% za linearnu i σ_p = ±69,5% za nelinearnu ovisnost).

Na slici 7.3 prikazan je detalj slike 7.1, ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A za vrijednosti slivova do A = 500 km^2, gdje su relativna odstupanja izvedene zakonitosti na slici 7.1 od ulaznih podataka najveća.

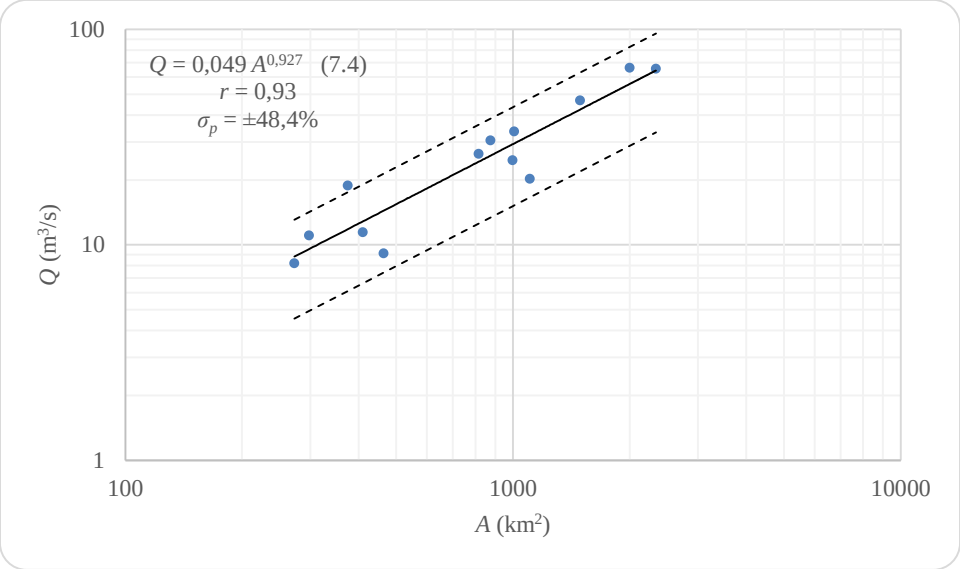


Slika 7.3 Linearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p u području slivnih površina do A = 500 km^2

Odstupanja ulaznih podataka oko izvedene zakonitosti (7.1) su velika jer je na području izostavljenih profila česta pojava ponora. Regresijom su se tada, na podacima s 13 profila, čije su veličine slivova veće od 250 km^2, izvelo formule (7.3) i (7.4), koje imaju nešto manji koeficijent korelacije (r = 0,96 kod linearne i r = 0,93 kod nelinearne formule), ali znatno manje granice pouzdanosti (σ_p = ±48,5% za linearnu i σ_p = ±48,4% za nelinearnu ovisnost). Zakonitosti veza (7.3) i (7.4) su zajedno s ulaznim izračunskim podacima prikazane na slikama 7.4 i 7.5.



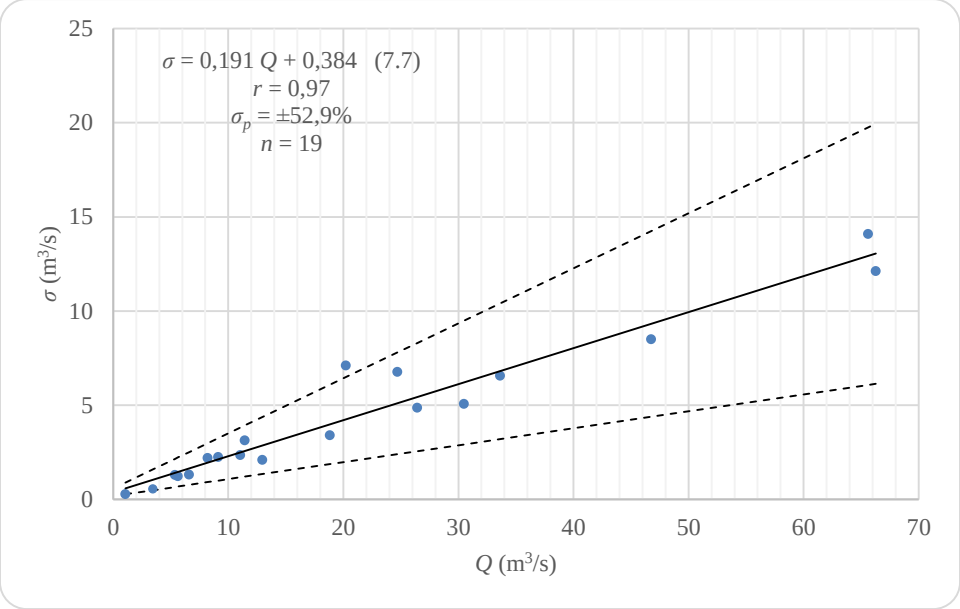
Slika 7.4 Linearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 13 podataka za slivove $A > 250$ km^2



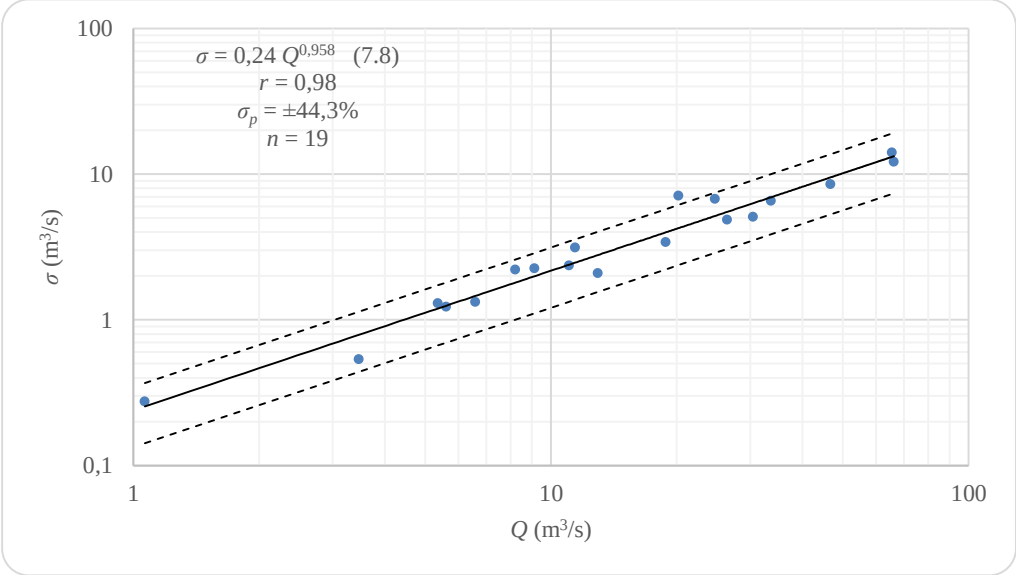
Slika 7.5 Nelinearna ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o površini slivova A s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 13 podataka za slivove $A > 250$ km^2

Na isti način su kod daljnjih analiza izvedeni izrazi $\sigma = f(Q)$ izostavljajući podatke uzvodno od stanice Slunj uzvodni na Korani koji imaju prevelika odstupanja od srednjih vrijednosti i sa stanica koje su neposredno uz izvore. U tablici 7.3 se vidi da su vjerojatna odstupanja pri korištenju svih podataka vrlo velika, posebice kod linearne zakonitosti (7.5). Izostavljanjem podataka s malih slivova gdje su odstupanja izvedene zakonitosti u formulama (7.5) i (7.6) najveća, dobili su se

izrazi (7.7) i (7.8) koji imaju znatno uži interval pouzdanosti, a prikazani su na slikama 7.6 i 7.7. Interval pouzdanosti za oba izraza, a posebno za linearni izraz je višestruko uži nego kada su uključeni svi podaci.



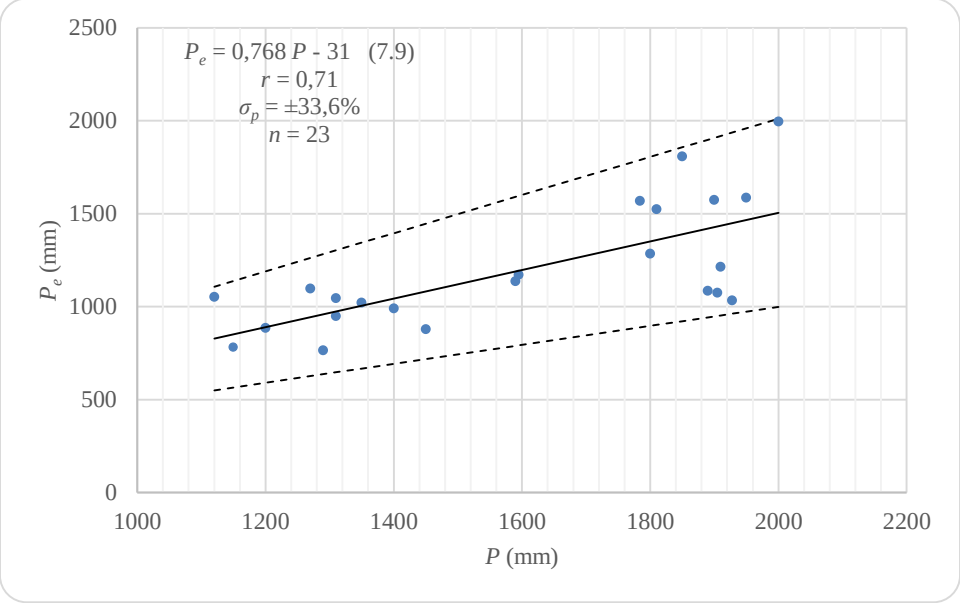
Slika 7.6 Linearna ovisnost standardne devijacije srednjih godišnjih protoka σ o srednjim godišnjim protocima Q s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 19 podatka



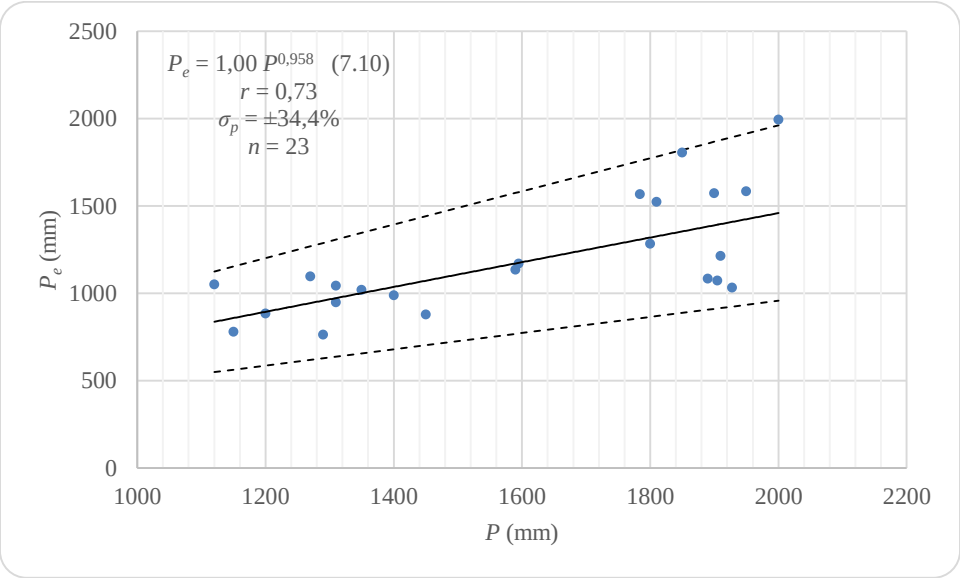
Slika 7.7 Nelinearna ovisnost standardne devijacije srednjih godišnjih protoka σ o srednjim godišnjim protocima Q s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 19 podatka

Zakonitost veze definirana formulom (7.8) prikazana je na slici 7.7. Ona je vrlo zanimljiva jer se iz samog izraza vidi kako srednji godišnji protoci variraju na razmatranom području približno 20% od srednjeg godišnjeg protoka Q (za protok Q = 1,00 m^3/s standardna devijacija je σ = 0,24 m^3/s dok je za protok Q = 100 m^3/s σ = 19,7 m^3/s).

Ovisnosti efektivne oborine P_e o bruto oborini P: formule (7.9) i (7.10) iz tablice 7.3 prikazana je na slikama 7.8 i 7.9. Zakonitost je izvedena za stanice na kojima je otjecajni koeficijent c > 0,50, a stanice koje su izostavljene, na kojima je c < 0,50, su Luketići, Slunj uzvodni i Veljun na Korani, Moravice na Gornjoj Dobri, Smrečje na Gerovčici, Plitvice na Plitvici, Kozjak most na Kozjak jezeru, Plitvički Ljeskovac na Sušnju i Rodić poljana na Sartuku. Koeficijent korelacije linearne zakonitosti je r = 0,71, a nelinearne zakonitosti r = 0,73 i interval pouzdanosti je σ_p = ±33,6% za linearnu i σ_p = ±34,4% za nelinearnu ovisnost. S obzirom da su koeficijenti korelacije i vjerojatna odstupanja približno ista i da je linearna ovisnost u praksi češće korištena, ona je usvojena. Formula (7.9) daje nešto veće vrijednosti, ima znatno manje početne gubitke ali znatno veća vjerojatna odstupanja (±33,6% u odnosu na ±18%) u odnosu na zakonitost koja je izvedena za krš Hrvatske, P_e = 0,83 P - 250 (Žugaj, 1995). Slična zakonitost za krš Hrvatske je dobivena i u radu Žugaja i sur. (1998-2007), P_e = 0,86 P - 380.



Slika 7.8 Linearna ovisnost efektivne oborine P_e o bruto oborini P za slivove na kojima je otjecajni koeficijent c > 0,50



Slika 7.9 Nelinearna ovisnost efektivne oborine P_e o bruto oborini P za slivove na kojima je otjecajni koeficijent $c > 0{,}50$

U svim zakonitostima koje je imalo smisla razmatrati ($r \geq |0{,}80|$) izvedenim s podacima iz 23 hidrološka profila dobivali su se široki intervali pouzdanosti. Najširi intervali pouzdanosti su bili kod linearnih zakonitosti, formula (7.1), slika 7.1, $\sigma_p = \pm 72{,}8\%$, $r = 0{,}97$, dok je kod nelinearnih zakonitosti najširi interval pouzdanosti imala formula (7.2), slika 7.2, $\sigma_p = \pm 69{,}5\%$, $r = 0{,}96$. Nelinearne zakonitosti su imale znatno uži interval pouzdanosti nakon izostavljanja podataka za koje se, za pojedinu zakonitost, opravdano smatralo da se smiju izostaviti, a koeficijenti korelacije r su se vrlo malo mijenjali, pa se može zaključiti da nelinearna ovisnost karakterističnih parametara kod srednjih godišnjih protoka Q daje najbolje međuovisnosti karakterističnih parametara (ovisnost srednjih godišnjih protoka Q o veličini sliva A i standardne devijacije srednjih godišnjih protoka σ o srednjim godišnjim protocima Q). Najbolju prilagodbu podacima za zakonitost $Q = f(A)$ dala je formula (7.3) (slika 7.4) s koeficijentom korelacije $r = 0{,}96$ i intervalom pouzdanosti $\sigma_p = \pm 48{,}5\%$ a za zakonitost $\sigma = f(Q)$ najbolju prilagodbu dala je formula (7.8) (slika 7.7) s koeficijentom korelacije $r = 0{,}98$ i intervalom pouzdanosti $\sigma_p = \pm 44{,}3\%$ iz tablice 7.3.

7.2. Maksimalni godišnji protoci i volumeni velikih vodnih valova

U tablicama 7.4 i 7.5 prikazani su koeficijenti korelacije za karakteristične parametre maksimalnih godišnjih protoka linearnih i nelinearnih ovisnosti. Iako je vidljivo iz priloga 6 i 7 da postoje čvrste veze između karakterističnih parametara maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka (primjerice $Q_M = f(Q_m)$, r = 0,94; $Q_M = f(Q_{msr})$, r = 0,98; $\sigma_m = f(Q_M)$, r = 0,96), takve zakonitosti veza između suštinski različitih karakterističnih parametara nemaju smisla, pa nisu ni razmatrane.

Ovisnost $q_M = f(A)$, koja često daje pouzdanu nelinearnu ovisnost, u ovom slučaju daje vrlo slabu linearnu i nelinearnu ovisnost (r = -0,40 za linearnu i r = -0,49 za nelinearnu ovisnost). Zbog toga je ta ovisnost ispitana samo za užu regiju sliva Kupe uzvodno od glavnih pritoka Korane i Dobre s Mrežnicom.

Tablica 7.4 Koeficijenti korelacije r karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka za linearnu ovisnost $y = ax + b$

	A	Q_M	Q_{Msr}	σ_M	c_{vM}	c_{sM}	q_M	Q_{M10}	Q_{M100}	Q_{M1000}	V_{10}	V_{100}	V_{1000}	Q_M/Q_{Msr}
A	1	**0,93**	**0,94**	**0,91**	-0,28	-0,59	-0,40	**0,94**	**0,93**	**0,91**	**0,96**	**0,95**	**0,94**	-0,39
Q_M		1	**0,99**	**0,98**	-0,24	-0,46	-0,11	**0,99**	**1,00**	**0,98**	**0,97**	**0,98**	**0,97**	-0,24
Q_{Msr}			1	**0,96**	-0,31	-0,54	-0,17	**1,00**	**0,98**	**0,96**	**0,99**	**0,99**	**0,99**	-0,34
σ_M				**1**	-0,12	-0,44	-0,13	**0,98**	**0,98**	**0,98**	**0,95**	**0,95**	**0,95**	-0,19
c_{vM}					1	0,51	0,31	-0,27	-0,22	-0,17	-0,29	-0,30	-0,30	0,79
c_{sM}						1	0,62	-0,52	-0,48	-0,43	-0,57	-0,58	-0,58	0,78
q_M							1	-0,13	-0,13	-0,13	-0,24	-0,23	-0,22	0,72
Q_{10}								1	**0,99**	**0,97**	**0,99**	**0,99**	**0,98**	-0,31
Q_{100}									1	**0,99**	**0,97**	**0,97**	**0,97**	-0,24
Q_{1000}										1	**0,95**	**0,95**	**0,95**	-0,19
V_{10}											1	**1,00**	**0,99**	-0,34
V_{100}												1	**1,00**	-0,34
V_{1000}													1	-0,34
Q_M/Q_{Msr}														1

Tablica 7.5 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka za nelinearnu ovisnost $y = ax^b$

	A	Q_M	Q_{Msr}	σ_M	c_{vM}	q_M	Q_{M10}	Q_{M100}	Q_{M1000}	V_{10}	V_{100}	V_{1000}	Q_M/Q_{Msr}
A	1	**0,90**	**0,93**	**0,88**	-0,16	-0,49	**0,93**	**0,91**	**0,88**	**0,96**	**0,96**	**0,95**	-0,34
Q_M		1	**0,99**	**0,98**	0,00	-0,06	**0,99**	**1,00**	**0,99**	**0,95**	**0,95**	**0,94**	-0,08
Q_{Msr}			1	**0,95**	-0,14	-0,17	**1,00**	**0,98**	**0,96**	**0,98**	**0,97**	**0,97**	-0,25
σ_M				**1**	0,18	-0,05	**0,97**	**0,98**	**0,99**	**0,92**	**0,91**	**0,90**	0,01
c_{vM}					1	0,35	-0,07	0,02	0,09	-0,16	-0,17	-0,18	**0,82**
q_M						1	-0,14	-0,09	-0,04	-0,30	-0,29	-0,29	0,62
Q_{10}							1	1	**0,98**	**0,97**	**0,97**	**0,96**	-0,19
Q_{100}								1	0,9961	**0,96**	**0,95**	**0,94**	-0,09
Q_{1000}									1	0,935	**0,95**	**0,92**	-0,02
V_{10}										1	0,998	**0,99**	-0,30
V_{100}											1	0,999	-0,30
V_{1000}												1	-0,30
Q_M/Q_{Msr}													1

U linearnoj i nelinearnoj vezi istih 45 ovisnosti zadovoljava kriterij $r \geq |0{,}80|$, međutim razmatrane su samo sljedeće zakonitosti: $Q_M = f(A)$, $Q_{Msr} = f(A)$, $Q_M = f(Q_{Msr})$, $\sigma_M = f(A)$, $\sigma_M = f(Q_M)$, $\sigma_M = f(Q_{Msr})$, $V_p = f(A)$, $V_p = f(Q)$, $V_p = f(Q_M)$, $V_p = f(Q_{Msr})$, $V_p = f(Q_{Mp})$, $Q_{Mp} = f(A)$, $Q_{Mp} = f(Q)$, $Q_{Mp} = f(Q_M)$, $Q_{Mp} = f(Q_{Msr})$ za 10-, 100- i 1000-godišnje povratno razdoblje te u nelinearnoj vezi zakonitost $Q_M/Q_{Msr} = f(c_{vM})$. Zakonitosti $V_p = f(\sigma_M)$ i $Q_{Mp} = f(\sigma_M)$ neće biti razmatrane.

U tablici 7.6 prikazane su regresijske relacije između parametara maksimalnih godišnjih protoka za linearne i nelinearne ovisnosti.

Vrlo visoke vrijednosti koeficijenata korelacije *r* između maksimalnih godišnjih protoka Q_M i volumena velikih vodnih valova različitih povratnih razdoblja V_p dokumentiraju vrlo čvrste veze, i one su posebno razmatrane u ovom poglavlju.

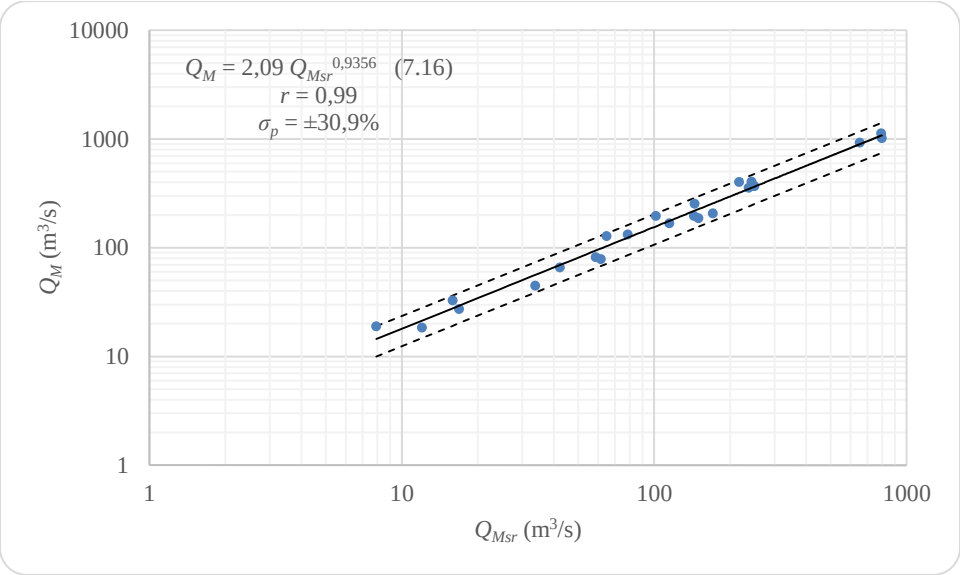
Tablica 7.6 Linearne i nelinearne regresijske formule karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka

Broj formule	Formula	n	r	σ_p (%)
7.11	$Q_M = 0{,}5004\ A - 47$	13	0,92	±128
7.12	$Q_M = 0{,}5914\ A^{0{,}948}$	13	0,83	±101
7.13	$Q_{Msr} = 0{,}373\ A - 57$	13	0,92	±150
7.14	$Q_{Msr} = 0{,}288\ A^{0{,}998}$	13	0,86	±99,4
7.15	$Q_M = 1{,}35\ Q_{Msr} + 20$	23	0,99	±42,6
7.16	$Q_M = 2{,}09\ Q_{Msr}^{0{,}9356}$	23	0,99	±30,9
7.17	$\sigma_M = 0{,}068\ A + 5{,}30$	23	0,91	±110
7.18	$\sigma_M = 0{,}318\ A^{0{,}7695}$	23	0,88	±113
7.19	$\sigma_M = 0{,}143\ Q_M + 6{,}364$	7	0,99	±10,3
7.20	$\sigma_M = 0{,}227\ Q_M^{0{,}94}$	7	0,99	±10,2
7.21	$\sigma_M = 0{,}198\ Q_{Msr} + 6{,}616$	23	0,96	±78,7
7.22	$\sigma_M = 0{,}359\ Q_{Msr}^{0{,}917}$	23	0,95	±70,7
7.23	$Q_M = 15{,}5\ Q + 5{,}46$	23	0,94	±87,7
7.24	$Q_M = 24{,}4\ Q^{0{,}835}$	23	0,93	±82,2
7.25	$Q_{Msr} = 11{,}6\ Q - 15{,}7$	23	0,96	±422
7.26	$Q_{Msr} = 12{,}4\ Q^{0{,}932}$	23	0,97	±59,8
7.27	$q_M = 2{,}89\ A^{-0{,}215}$	7	-0,95	±25,1
7.28	$Q_M/Q_{Msr} = 2{,}89\ c_{vM}^{0{,}4287}$	23	0,81	±23,4

Formule (7.11) i (7.12) iz tablice 7.6 koje definiraju ovisnost maksimalnog zabilježenog godišnjeg protoka Q_M o veličini sliva A izvedene su bez podataka sa stanica uzvodnog dijela sliva Korane i svih stanica do kojih je veličina sliva manja od 250 km^2 jer su te stanice imale najveća relativna odstupanja od izvedene zakonitosti zbog uspora (Brod na Kupi na Kupici, Luke na Gornjoj Dobri), a i zbog hidrauličke ograničenosti kapaciteta izvora blizu kojih se nalaze mjerne stanice, a što je posebno izraženo kada je riječ o maksimalnim protocima. Izvedene zakonitosti imaju visok koeficijent korelacije (r = 0,92 za linearnu i r = 0,83 za nelinearnu formulu) i vrlo široke intervale pouzdanosti (σ_p = ±128% za linearnu i σ_p = ±101% za nelinearnu formulu) pa stoga nisu dovoljno pouzdane za primjenu. Na isti način su izvedene formule (7.13) i (7.14) iz tablice 7.6 koje opisuju ovisnost srednjih maksimalnih godišnjih protoka Q_{Msr} o veličinama sliva A. Koeficijenti korelacije i intervali pouzdanosti su slični formulama (7.11) i (7.12) (r = 0,92, σ_p = ±150% za linearnu i r = 0,86, σ_p = ±99,4% za nelinearnu formulu).

Formule (7.15) i (7.16) iz tablice 7.6 koje opisuju ovisnost maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka Q_M o srednjim maksimalnim godišnjim protocima Q_{Msr} imaju vrlo visoke koeficijente korelacije (r = 0,99 za linearnu i nelinearnu formulu) i prihvatljive intervale pouzdanosti (σ_p = ±42,6% za linearnu i σ_p = ±30,9% za nelinearnu formulu), pa se stoga ta zakonitost može

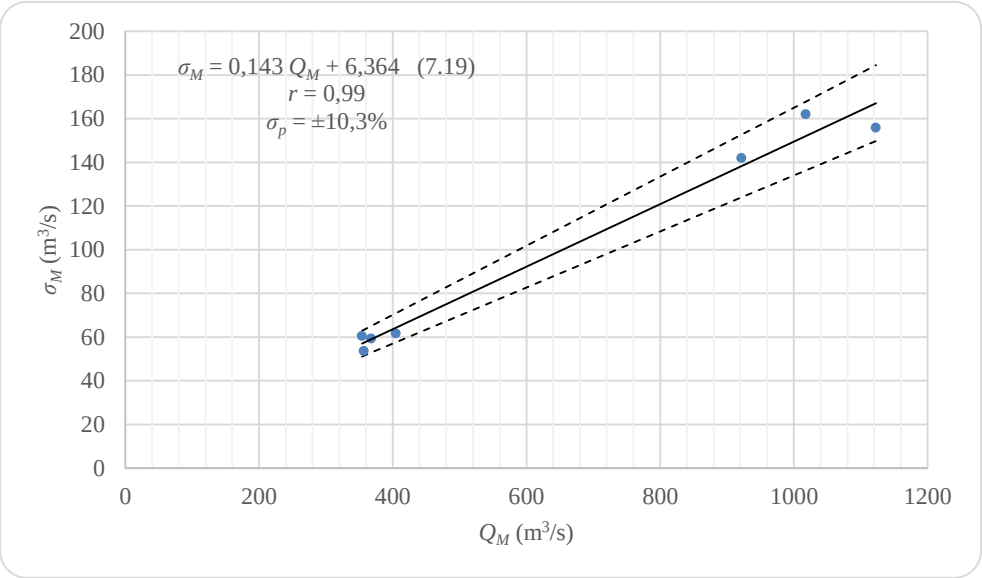
prihvatiti za praktičnu primjenu, posebice zakonitost (7.16) jer ima uži interval pouzdanosti od zakonitosti (7.15). Na slici 7.10 prikazana je zakonitost (7.16).



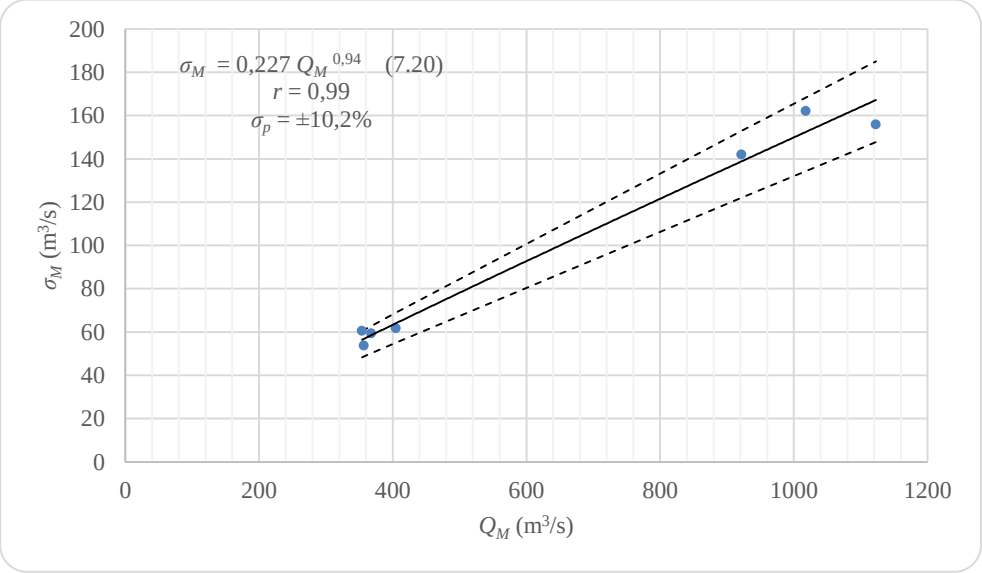
Slika 7.10 Nelinearna ovisnost maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka Q_M o srednjim maksimalnim godišnjim protocima Q_{Msr} s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene s 23 podatka

Formule (7.17) i (7.18) iz tablice 7.6 koje definiraju ovisnost standardne devijacije maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka σ_M o veličini sliva A imaju niske vrijednosti koeficijenata korelacije u odnosu na ostale formule iz tablice 7.6 (r = 0,91 za linearnu i r = 0,88 za nelinearnu formulu) i vrlo široke intervale pouzdanosti ($\sigma_p = \pm 110\%$ za linearnu i $\sigma_p = \pm 113\%$ za nelinearnu formulu) pa stoga nisu preporučljive za primjenu.

Formule (7.19) (slika 7.11) i (7.20) (slika 7.12) iz tablice 7.6 koje opisuju ovisnost standardne devijacije maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka σ_M o maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima Q_M imaju visoke koeficijente korelacije (r = 0,99 za linearnu i nelinearnu formulu) i slične uske intervale pouzdanosti ($\sigma_p = \pm 10{,}3\%$ za linearnu i $\sigma_p = \pm 10{,}2\%$ za nelinearnu formulu) pa se linearna formula (7.19) može prihvatiti za praktičnu primjenu. Formula (7.19) i (7.20) pokazuju kako maksimalni zabilježeni godišnji protoci Q_M imaju variranja od približno 20% oko prosječne vrijednosti maksimalnog zabilježenog godišnjeg protoka Q_M. Zanimljivo je da formule (7.7) i (7.8) pokazuju da su ta variranja srednjih godišnjih protoka Q približno od 19% do 24% oko prosječne vrijednosti godišnjeg protoka.



Slika 7.11 Linearna ovisnost standardne devijacije maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka σ_M o maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima Q_M s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene sa 7 podatka



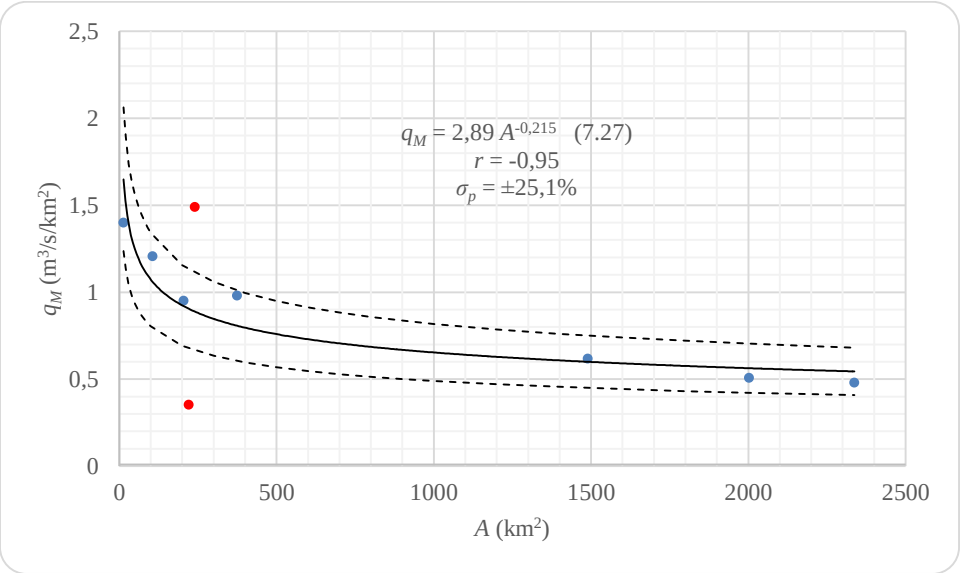
Slika 7.12 Nelinearna ovisnost standardne devijacije maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka σ_M o maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima Q_M s intervalom pouzdanosti σ_p izvedene sa 7 podatka

Formule (7.21) i (7.22) iz tablice 7.6 koje definiraju ovisnost standardne devijacije maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka σ_M o srednjim maksimalnim godišnjim protocima Q_{Msr} imaju visoke koeficijente korelacije (r = 0,96 za linearnu i r = 0,95 za nelinearnu zakonitost) i slične široke intervale pouzdanosti (σ_p = ±78,7% za linearnu i σ_p = ±70,7% za nelinearnu formulu) pa stoga nisu preporučljive za primjenu.

Ovisnosti maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka $Q_M = f(Q)$ i srednjih maksimalnih godišnjih protoka u ovisnosti o srednjim godišnjim protocima $Q_{Msr} = f(Q)$: formule (7.23), (7.24), (7.25) i (7.26) iz tablice 7.6 imaju široke intervale pouzdanosti te nisu primjenjive u praksi.

Na slici 7.13 prikazana je ovisnost (7.27) iz tablice 7.6. Zakonitost je izvedena samo za sliv Kupe do profila Kamanje s uključenim stanicama Kupari, Hrvatsko, Radenci, Metlika i Kamanje na Kupi, Smrečje na Gerovčici i Zamost 2 na Čabranki, bez glavnih pritoka Dobre, Korane s Mrežnicom, s izostavljenim profilima na Kupici i Lahinji (označeni crvenim točkama na slici 7.13). Profil Brod na Kupi na Kupici ima, prema protočnoj krivulji neuobičajen visok maksimalni specifični dotok $q_M = 1{,}49$ m^3/s/km^2 za svoju veličinu sliva A zbog uspora kojeg stvara ušće u Kupu koje je u neposrednoj blizini mjernog profila, dok profil Izvor na Kupici daje vrlo niske vrijednosti maksimalnog specifičnog dotoka $q_M = 0{,}670$ m^3/s/km^2 za svoju veličinu sliva A, a budući da su vrijednosti mjerene na izvoru, izravno su pod utjecajem stanja u podzemlju i hidrauličkog ograničenja kapaciteta izvora. Vrijednosti maksimalnog specifičnog dotoka $q_M = 0{,}354$ m^3/s/km^2 na profilu Gradac na Lahinji su također preniske u odnosu na veličinu sliva A, a za ovu obradu i nije bila poznata protočna krivulja, budući da mjerenja vrši Slovenski hidrometeorološki zavod (ARSO – Agencije Republike Slovenije za okolje). S druge strane, podaci s pritoka Čabranke i Gerovčice su zadržani jer su ti profili pouzdani, a podaci provjereni, i kako je vidljivo sa slike 7.13, odgovaraju izvedenoj zakonitosti $q_M = f(A)$.

Zakonitost $Q_M/Q_{Msr} = f(c_{vM})$ predstavljena nelinearnom formulom (7.28) u tablici 7.6, uz niži koeficijent korelacije od ostalih formula ($r = 0{,}81$), ima prihvatljive intervale pouzdanosti ($\sigma_p = \pm 23{,}4\%$).



Slika 7.13 Maksimalni specifični dotoci q_M u ovisnosti o slivnoj površini A duž Kupe do Kamanja

Formula (7.27), grafički prikazana na slici 7.13 ima čvrstu korelaciju (r = -0,95) i interval pouzdanosti nije širok (σ_p = ±25,1%) pa se zakonitost može koristiti duž rijeke Kupe.

Volumeni vodnih valova 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja V_p analizirani su u ovisnosti o slivnim površinama A, srednjim godišnjim protocima Q, maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima Q_M, srednjim maksimalnim godišnjim protocima Q_{Msr} i maksimalnim godišnjim protocima 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja. Maksimalni godišnji protoci 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{Mp} razmatrani su u ovisnosti o slivnim površinama A, srednjim godišnjim protocima Q, maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima Q_M i srednjim maksimalnim godišnjim protocima Q_{Msr}. Zakonitosti volumena vodnih valova i maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja u ovisnosti o veličini sliva analizirane su na pet profila koji se nalaze na glavnom toku Kupe. Dobivene formule su u tablici 7.7.

Tablica 7.7 Linearne i nelinearne regresijske formule karakterističnih parametara volumena V_p 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja

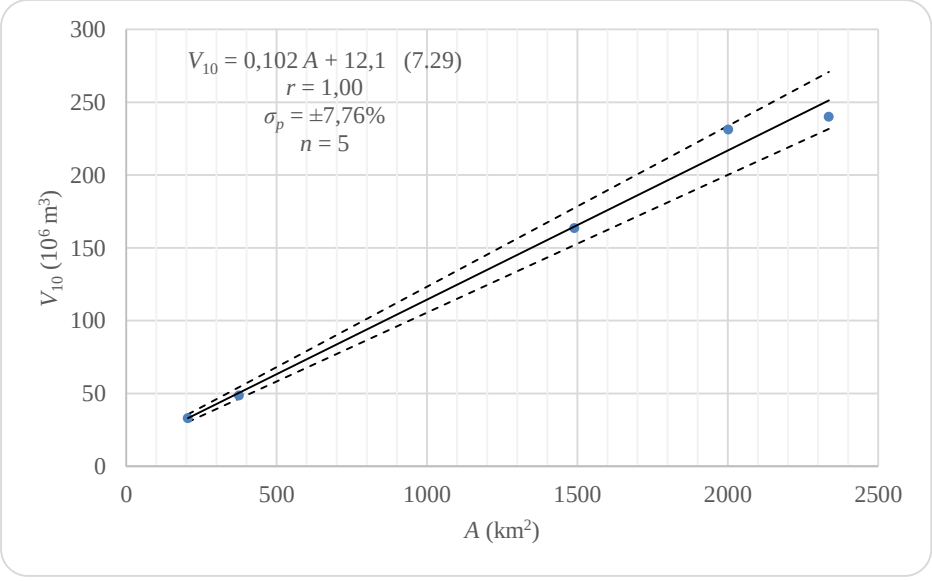
Broj formule	Formula	n	r	σ_p (%)
7.29	$V_{10} = 0{,}102\ A + 12{,}1$	5	1,00	±7,76
7.30	$V_{10} = 0{,}343\ A^{0{,}848}$	5	1,00	±10,5
7.31	$V_{100} = 0{,}134\ A + 22$	5	0,99	±18,1
7.32	$V_{100} = 0{,}443\ A^{0{,}855}$	5	1,00	±8,20
7.33	$V_{1000} = 0{,}1595\ A + 34$	5	0,98	±30,3
7.34	$V_{1000} = 0{,}541\ A^{0{,}857}$	5	0,99	±17,9
7.35	$V_{10} = 3{,}36\ Q - 5{,}29$	23	0,97	±532
7.36	$V_{10} = 3{,}68\ Q^{0{,}919}$	23	0,97	±67,9
7.37	$V_{100} = 4{,}46\ Q - 5{,}1$	23	0,96	±684
7.38	$V_{100} = 5{,}80\ Q^{0{,}869}$	23	0,95	±103
7.39	$V_{1000} = 5{,}38\ Q - 3{,}67$	23	0,95	±807
7.40	$V_{1000} = 7{,}72\ Q^{0{,}846}$	23	0,93	±187
7.41	$V_{10} = 0{,}207\ Q_M - 4{,}23$	23	0,97	±187
7.42	$V_{10} = 0{,}186\ Q_M^{0{,}995}$	23	0,96	±183
7.43	$V_{100} = 0{,}276\ Q_M - 4{,}21$	23	0,98	±404
7.44	$V_{100} = 0{,}332\ Q_M^{0{,}948}$	23	0,94	±77,9
7.45	$V_{1000} = 0{,}334\ Q_M - 2{,}99$	23	0,97	±180
7.46	$V_{1000} = 0{,}471\ Q_M^{0{,}925}$	23	0,93	±173
7.47	$V_{10} = 0{,}285\ Q_{Msr} + 0{,}369$	23	0,99	±182
7.48	$V_{10} = 0{,}35\ Q_{Msr}^{0{,}955}$	23	0,97	±177
7.49	$V_{100} = 0{,}38\ Q_{Msr} + 1{,}88$	23	0,99	±71,4
7.50	$V_{100} = 0{,}614\ Q_{Msr}^{0{,}911}$	23	0,95	±82,6
7.51	$V_{1000} = 0{,}461\ Q_{Msr} + 4{,}356$	23	0,99	±171
7.52	$V_{1000} = 0{,}862\ Q_{Msr}^{0{,}888}$	23	0,94	±162
7.53	$Q_{M10} = 0{,}393\ A + 158$	5	0,98	±27,8
7.54	$Q_{M10} = 4{,}43\ A^{0{,}709}$	5	0,99	±16,0
7.55	$Q_{M100} = 0{,}475\ A + 200$	5	0,97	±30,4
7.56	$Q_{M100} = 5{,}73\ A^{0{,}7}$	5	0,99	±18,9
7.57	$Q_{M1000} = 0{,}5515\ A + 233$	5	0,94	±35,7
7.58	$Q_{M1000} = 6{,}94\ A^{0{,}694}$	5	0,98	±26,3
7.59	$Q_{M10} = 15{,}4\ Q + 11{,}5$	10	0,99	±48,6
7.60	$Q_{M10} = 20{,}1\ Q^{0{,}919}$	10	0,98	±48,6
7.61	$Q_{M100} = 18{,}2\ Q + 40$	10	0,98	±67,7
7.62	$Q_{M100} = 30{,}5\ Q^{0{,}864}$	10	0,96	±65,8
7.63	$Q_{M1000} = 20{,}6\ Q + 73$	10	0,95	±81,6
7.64	$Q_{M1000} = 42{,}1\ Q^{0{,}818}$	10	0,94	±84,3
7.65	$Q_{M10} = 0{,}913\ Q_M - 12{,}5$	23	0,99	±142
7.66	$Q_{M10} = 0{,}762\ Q_M^{1{,}019}$	23	0,99	±23,4
7.67	$Q_{M100} = 1{,}12\ Q_M - 1{,}34$	23	1,00	±16,4
7.68	$Q_{M100} = 1{,}11\ Q_M^{0{,}999}$	23	1,00	±15,6
7.69	$Q_{M1000} = 1{,}306\ Q_M + 11{,}5$	23	0,98	±31,9
7.70	$Q_{M1000} = 1{,}49\ Q_M^{0{,}982}$	23	0,99	±27,0
7.71	$Q_{M10} = 1{,}25\ Q_{Msr} + 10{,}1$	23	1,00	±30,5
7.72	$Q_{M10} = 1{,}537\ Q_{Msr}^{0{,}97}$	23	1,00	±17,6
7.73	$Q_{M100} = 1{,}50\ Q_{Msr} + 31$	23	0,98	±56,3
7.74	$Q_{M100} = 2{,}35\ Q_{Msr}^{0{,}938}$	23	0,99	±38,8
7.75	$Q_{M1000} = 1{,}73\ Q_{Msr} + 54$	23	0,96	±71,9
7.76	$Q_{M1000} = 3{,}25\ Q_{Msr}^{0{,}912}$	23	0,97	±56,5

Nastavak tablice 7.7

Broj formule	Regresijska formulacija	n	r	σ_p (%)
7.77	$V_{10} = 0{,}253\ Q_{M10} - 24$	5	0,99	±61,2
7.78	$V_{10} = 0{,}066\ Q_{M10}^{1{,}175}$	5	0,99	±25,4
7.79	$V_{100} = 0{,}27\ Q_{M100} - 24$	5	0,98	±26,5
7.80	$V_{100} = 0{,}06\ Q_{M100}^{1{,}201}$	5	0,99	±21,2
7.81	$V_{1000} = 0{,}263\ Q_{M1000} - 8{,}39$	5	0,95	±36,0
7.82	$V_{1000} = 0{,}063\ Q_{M1000}^{1{,}199}$	5	0,98	±31,5

Ovisnost volumena vodnih valova 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja V_p u ovisnosti o slivnim površinama A određena je formulama (7.29) - (7.34) u tablici 7.7, pri čemu se ograničilo samo na pet profila na glavnom toku rijeke Kupe. Formula (7.29) ima koeficijent korelacije r = 1,00 i interval pouzdanosti σ_p = ±7,76%, dok formule (7.30) - (7.34) imaju nešto niži koeficijent korelacije i sličan interval pouzdanosti σ_p. Formula (7.29) iz tablice 7.7 prikazana je na slici 7.14. Sve formule zakonitosti $V_p = f(A)$ mogu se praktično koristiti duž rijeke Kupe jer imaju visok koeficijent korelacije i vrlo malo rasipavanja ulaznih podataka oko izvedenih zakonitosti.

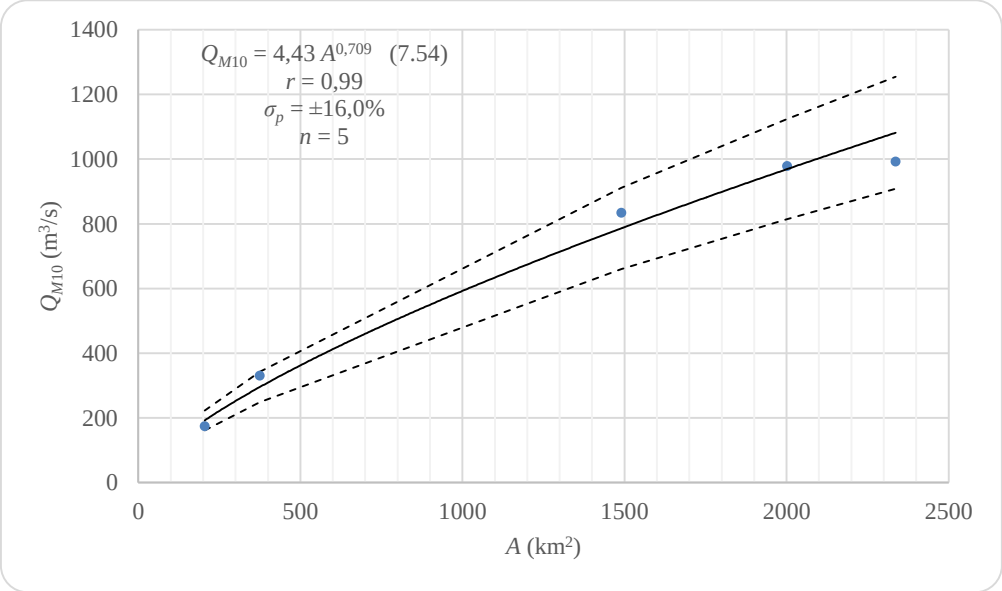
U tablici 7.7 prikazane su zakonitosti po različitim povratnim razdobljima, a daljnja su razmatranja provedena uglavnom za zakonitosti karakterističnih odabranih povratnih razdoblja, pri čemu se najviše razmatralo 100-god. povratno razdoblje.



Slika 7.14 Linearna ovisnost volumena vodnih valova 10-godišnjeg povratnog razdoblja V_{10} o veličinama sliva A s intervalom pouzdanosti σ_p na profilima rijeke Kupe bez profila pritoka

Ovisnost volumena vodnih valova 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja V_p u ovisnosti o srednjim godišnjim protocima Q određena je formulama (7.35) - (7.40) u tablici 7.7. Sve formule zakonitosti $V_p = f(Q)$ imaju širok interval pouzdanosti tako da se ni jedna formula ne preporuča koristiti u praksi. Isti zaključak vrijedi i za zakonitost $V_p = f(Q_M)$ opisanu formulama (7.41) - (7.46) i $V_p = f(Q_{Msr})$ opisanu formulama (7.47) - (7.52) u tablici 7.7, zbog širokog intervala pouzdanosti.

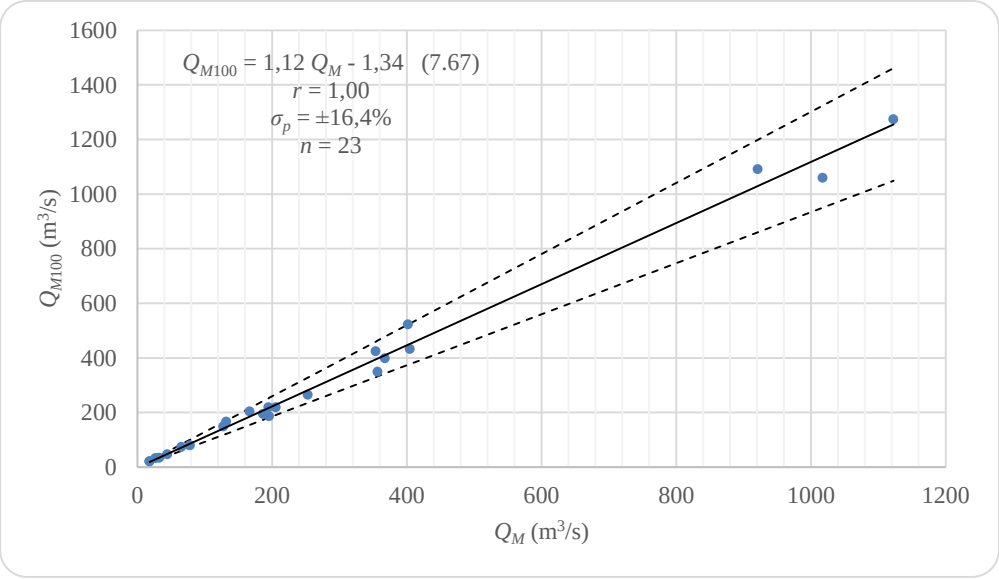
Ovisnost maksimalnih godišnjih protoka 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{Mp} u ovisnosti o slivnoj površini A opisana je formulama (7.53) - (7.58) u tablici 7.7, a izvedene su za područje sliva Kupe bez Dobre, Korane i Mrežnice. Sve izvedene formule za zakonitosti veza mogu se praktično koristiti na području rijeke Kupe. Na slici 7.15 prikazana je nelinearna ovisnost maksimalnog protoka 10-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M10} u ovisnosti o veličini sliva A.



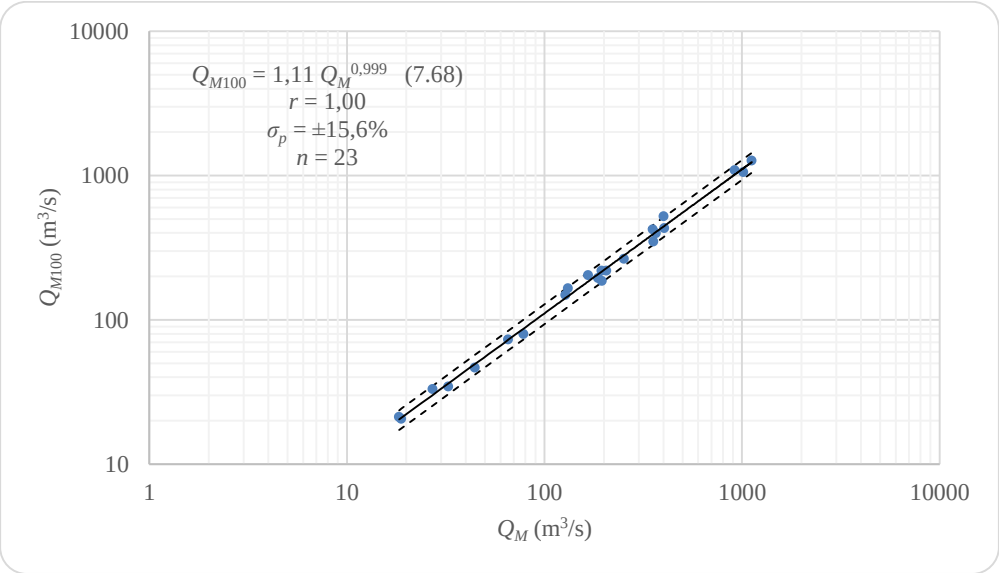
Slika 7.15 Nelinearna ovisnost maksimalnog protoka 10-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M10} o veličinama sliva A s intervalom pouzdanosti σ_p na profilima rijeke Kupe bez pritoka

Zakonitost $Q_{Mp} = f(Q)$ za 10-, 100- i 1000-godišnje povratno razdoblje izvedena je za uže područje sliva Kupe i pritoka bez Dobre, Mrežnice i Korane. Formule zakonitosti (7.59) - (7.64) u tablici 7.7 imaju široki interval pouzdanosti (od $\sigma_p = \pm 48{,}6\%$ za 10-godišnju formulu, pa do $\sigma_p = \pm 84{,}3\%$ za 1000-godišnju formulu) i bez obzira na visok koeficijent korelacije od $r = 0{,}94$ do $r = 0{,}99$, zakonitosti nisu praktične i ne preporučaju se koristiti na vodotoku rijeke Kupe.

Zakonitost $Q_{Mp} = f(Q_M)$ za 10-, 100- i 1000-godišnje povratno razdoblje izvedena je za cijeli sliv Kupe na 23 profila i opisana je formulama (7.65) - (7.70) u tablici 7.7. Formule imaju visoke koeficijente korelacije, ali interval pouzdanosti je promjenjiv, ovisno o povratnom razdoblju. Najuži interval pouzdanosti ima formula (7.68) (σ_p = ±15,6%) za 100-godišnje povratno razdoblje, dok formula (7.65) ima najširi interval pouzdanosti (σ_p = ±142%) za 10-godišnje povratno razdoblje. Zbog toga su formule za 100-godišnje povratno razdoblje preporučljive za upotrebu, dok za 10- i 1000-godišnje razdoblje nisu preporučljive. Iako sve formule nisu upotrebljive, iz njih se može procijeniti odnos maksimalnih zabilježenih protoka Q_M i maksimalnih godišnjih protoka za 10-, 100- i 1000-godišnje povratno razdoblje Q_{Mp}. Iz formule (7.66) se okvirno može reći da su maksimalni protoci 10-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M10} za 24% manji od maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka Q_M, ako se uzme da je eksponent u formuli 1,019 ≈ 1,0, iz formule (7.68) se okvirno može reći da su maksimalni protoci 100-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M100} za 11% veći od maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka Q_M, ako se uzme da je eksponent u formuli 0,999 ≈ 1,0, a iz formule (7.70) se okvirno može reći da su maksimalni protoci 1000-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M1000} za 49% veći od maksimalnih zabilježenih godišnjih protoka Q_M, ako se uzme da je eksponent u formuli 0,9818 ≈ 1,0. Formule 7.67 i 7.68 prikazane su na slikama 7.16 i 7.17.



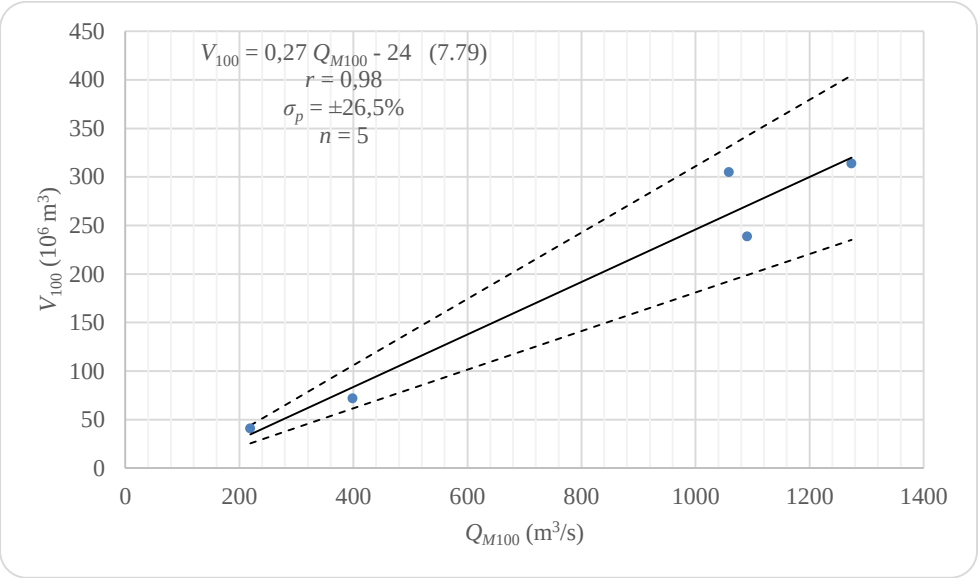
Slika 7.16 Linearna ovisnost maksimalnih godišnjih protoka 100-godišnjeg povratnog razdoblja o maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima s intervalom pouzdanosti σ_p



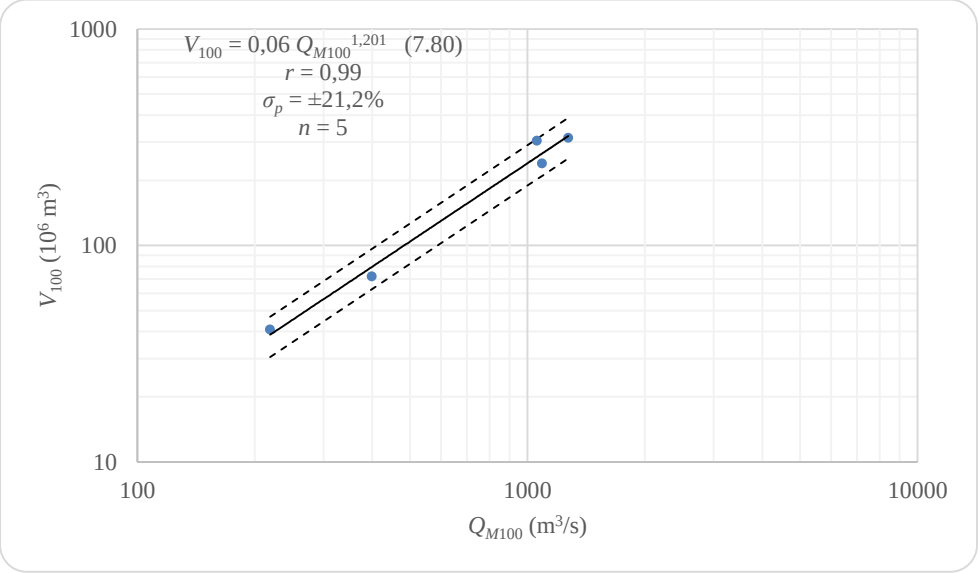
Slika 7.17 Nelinearna ovisnost maksimalnih godišnjih protoka 100-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M100} o maksimalnim zabilježenim godišnjim protocima s intervalom pouzdanosti σ_p

Zakonitost $Q_{Mp} = f(Q_{Msr})$ za 10-, 100- i 1000-godišnje povratno razdoblje izvedena je za cijeli sliv Kupe na 23 profila i opisana je formulama (7.71) - (7.76) u tablici 7.7. Formule imaju visoku vrijednost koeficijenta korelacije (od r = 0,96 do r = 1,00) i interval pouzdanosti koji je za 10-godišnje povratno razdoblje uzak: σ_p = ±17,6% za formulu (7.72), ali se s porastom povratnog razdoblja proširuje, pa je za 1000-godišnje povratno razdoblje vrlo širok: σ_p = ±71,9% za formulu (7.75) te ih se zbog takvog širokog intervala pouzdanosti može koristiti do 10-godišnjeg povratnog razdoblja (σ_p = ±17,6%).

Zakonitost $V_p = f(Q_{Mp})$ za 10-, 100- i 1000-godišnje povratno razdoblje izvedena je samo za vodotok rijeke Kupe s podacima s hidroloških stanica Kupari, Hrvatsko, Radenci, Metlika i Kamanje i opisana je formulama (7.77) - (7.82). Koeficijenti korelacije su visoki (r = 0,95 do r = 0,99) a intervali pouzdanosti su uski: σ_p = ±21,2% za formulu (7.80) do σ_p = ±61,2% za formulu (7.77) pa se zakonitost može koristiti na vodotoku Kupe. Formule (7.79) i (7.80) iz tablice 7.7 prikazane su na slikama 7.18 i 7.19.



Slika 7.18 Linearna ovisnost volumena vodnih valova 100-godišnjeg povratnog razdoblja V_{100} o maksimalnim godišnjim protocima 100-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M100} s intervalom pouzdanosti σ_p izvedena za Kupu



Slika 7.19 Nelinearna ovisnost volumena vodnih valova 100-godišnjeg povratnog razdoblja V_{100} o maksimalnim godišnjim protocima 100-godišnjeg povratnog razdoblja Q_{M100} s intervalom pouzdanosti σ_p izvedena za Kupu

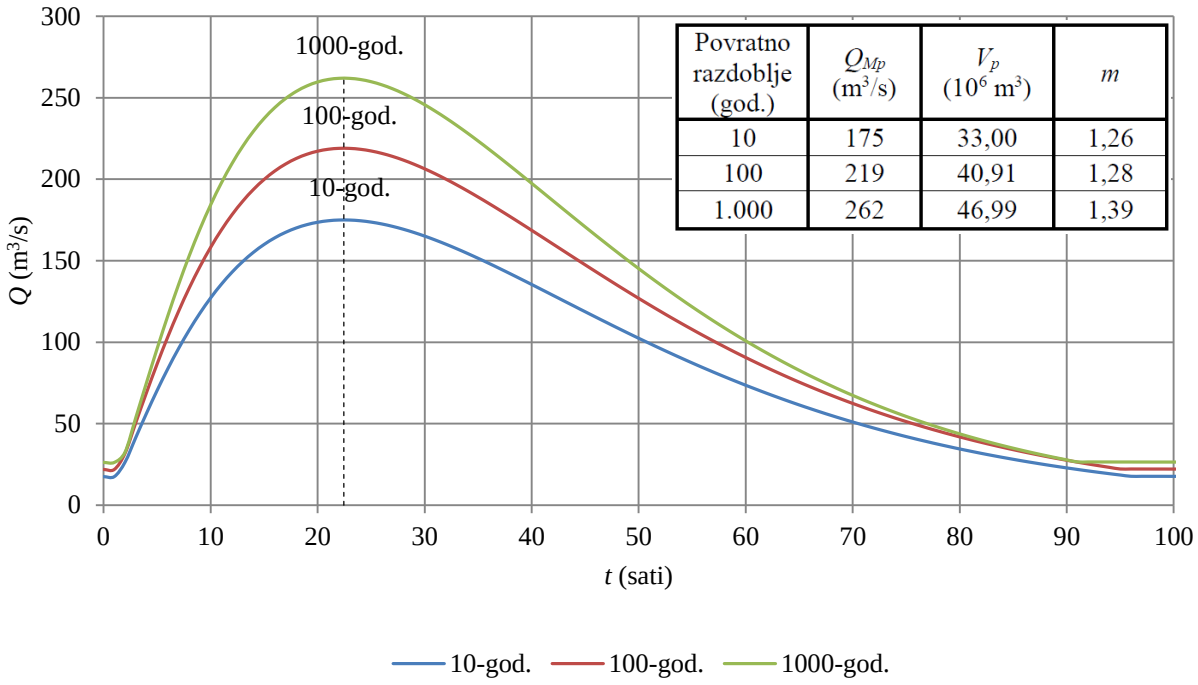
Sve formule karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka imaju velike koeficijente korelacije (od r = 0,83 do r = 1,00), ali neke imaju i široke intervale pouzdanosti: σ_p = ±807% za formulu (7.39). Najuži interval pouzdanosti ima formula (7.29) iz tablice 7.7 i iznosi σ_p = ±7,76%.

Na slikama 7.20 - 7.24 prikazani su vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja za stanice Kupari, Hrvatsko, Radenci, Metlika i Kamanje na Kupi, prema metodi D. Srebrenovića. Hidrogram vodnog vala 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja prema metodi D. Srebrenovića je:

$$Q(t) = Q_{Mp}\left(\frac{t}{\tau}\right)^{m} e^{m\left(1-\frac{t}{\tau}\right)} \tag{7.83}$$

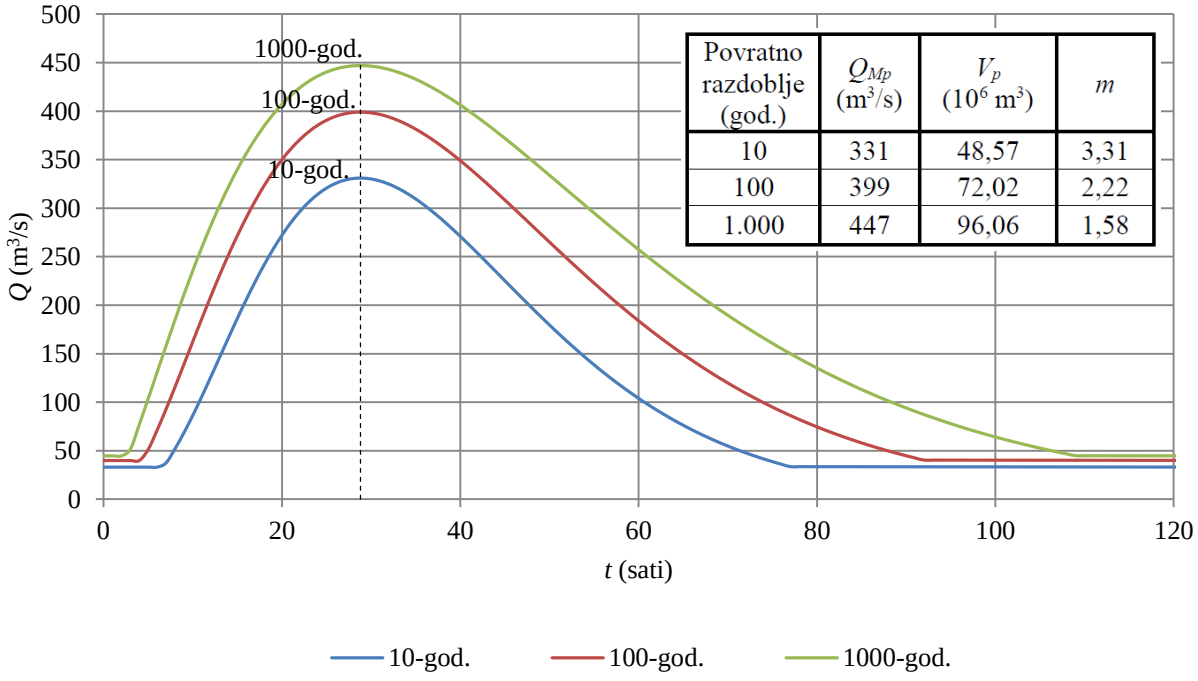
gdje je Q_{Mp} (m^3/s) maksimalni godišnji protok 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja, τ (sati) vrijeme podizanja vodnog vala i $m = \left(\frac{9450\, Q_{Mp}\, \tau}{V}\right)^{1,94}$ koeficijent oblika vodnog vala. V je volumen vodnog vala. Bazni dotok vodnog vala na osnovi analize stvarnih hidrograma velikih vodnih valova, usvojen je deset posto od maksimalnog protoka. Volumeni vodnih valova su volumeni dobiveni raspodjelama za 10-, 100- i 1000-godišnje povratno razdoblje.

Također su za sva povratna razdoblja usvojena jednaka vremena podizanja vodnih valova, što je, s obzirom na način određivanja volumena (na osnovi srednjih dnevnih protoka), prihvatljiva aproksimacija, gdje je inače prema D. Srebrenoviću $T_{p10} > T_{p100} > T_{p1000}$.



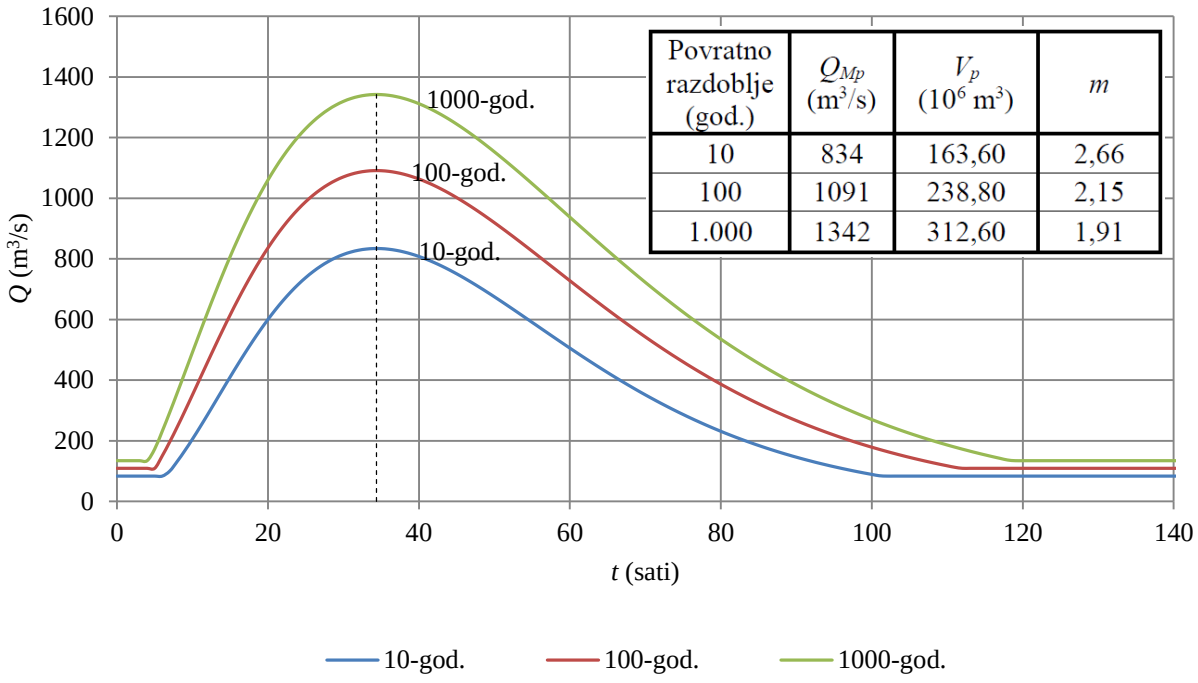
Povratno razdoblje (god.)	Q_{Mp} (m^3/s)	V_p (10^6 m^3)	m
10	175	33,00	1,26
100	219	40,91	1,28
1.000	262	46,99	1,39

Slika 7.20 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Kupari na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 22,5 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 89,8 sati.



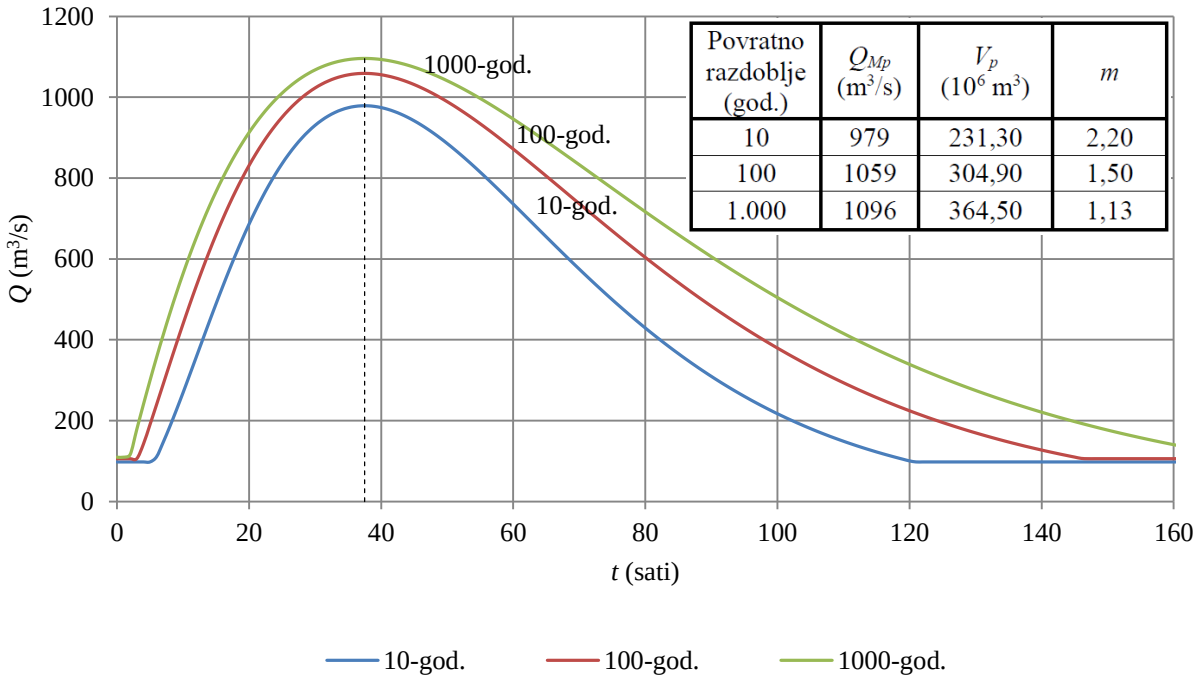
Povratno razdoblje (god.)	Q_{Mp} (m^3/s)	V_p (10^6 m^3)	m
10	331	48,57	3,31
100	399	72,02	2,22
1.000	447	96,06	1,58

Slika 7.21 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Hrvatsko na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 28,8 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 115 sati.



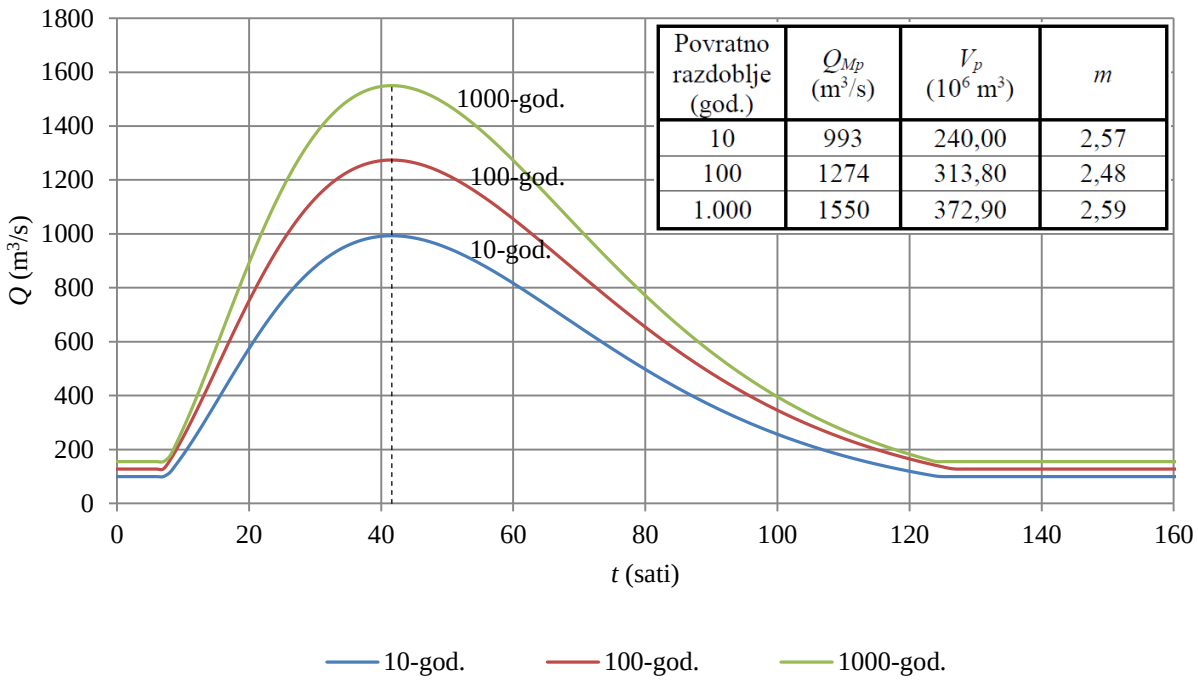
Povratno razdoblje (god.)	Q_{Mp} (m^3/s)	V_p (10^6 m^3)	m
10	834	163,60	2,66
100	1091	238,80	2,15
1.000	1342	312,60	1,91

Slika 7.22 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Radenci na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 34,4 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 138 sati.



Povratno razdoblje (god.)	Q_{Mp} (m^3/s)	V_p (10^6 m^3)	m
10	979	231,30	2,20
100	1059	304,90	1,50
1.000	1096	364,50	1,13

Slika 7.23 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Metlika na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 37,5 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 150 sati.



Povratno razdoblje (god.)	Q_{Mp} (m³/s)	V_p (10^6 m³)	m
10	993	240,00	2,57
100	1274	313,80	2,48
1.000	1550	372,90	2,59

Slika 7.24 Vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na profilu Kamanje na rijeci Kupi. Vrijeme podizanja vodnih valova je 41,6 sata a ukupno trajanje vodnih valova je 166 sati.

Dobiven vodni valovi na slikama 7.20 - 7.24 dobro su prikazani Srebrenovićevim teorijskim oblikom, što je vidljivo prvenstveno po koeficijentu oblika vodnog vala *m*, koji se nalazi u zadanim granicama 1 - 6. Formule (7.77) - (7.82) u tablici 7.7, koje povezuju maksimalne protoke Q_{Mp} i volumene V_p; 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja može se preporučiti za korištenje, jer su teorijski vodni valovi stvarnim vodnim valovima slični po volumenu i obliku.

7.3. Minimalni godišnji protoci

U tablicama 7.8 i 7.9 prikazani su koeficijenti korelacije za karakteristične parametre minimalnih godišnjih protoka za linearne i nelinearne ovisnosti.

Tablica 7.8 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka za linearnu ovisnost $y = ax + b$

	A	Q_m	Q_{msr}	σ_m	c_{vm}	c_{sm}	Q_m/Q_{msr}
A	1	**0,89**	**0,94**	**0,93**	-0,17	-0,10	0,57
Q_m		1	**0,98**	**0,92**	-0,18	-0,02	0,65
Q_{msr}			1	**0,97**	-0,15	-0,06	0,62
σ_m				1	-0,05	0,01	0,52
c_{vm}					1	0,33	-0,41
c_{sm}						1	-0,39
Q_m/Q_{msr}							1

Tablica 7.9 Koeficijenti korelacije *r* karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka za nelinearnu ovisnost $y = ax^b$

	A	Q_m	Q_{msr}	σ_m	c_{vm}	Q_m/Q_{msr}
A	1	**0,86**	**0,93**	**0,90**	-0,16	0,47
Q_m		1	**0,936**	**0,83**	-0,39	**0,80**
Q_{msr}			1	**0,96**	-0,20	0,54
σ_m				1	0,03	0,37
c_{vm}					1	-0,60
Q_m/Q_{msr}						1

Linearne i nelinearne zakonitosti koje zadovoljavaju kriterij $r \geq |0{,}80|$ su $Q_m = f(A)$, $Q_m = f(Q_{msr})$, $Q_{msr} = f(A)$, $\sigma_m = f(A)$, $\sigma_m = f(Q_m)$ i $\sigma_m = f(Q_{msr})$ te nelinearna zakonitost $Q_m/Q_{msr} = f(Q_m)$.

U tablici 7.10 prikazane su regresijske formule između karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka za linearne i nelinearne ovisnosti.

Tablica 7.10 Linearne i nelinearne regresijske formule karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka

Broj formule	Formula	*n*	*r*	σ_p (%)
7.84	$Q_m = 0{,}0005\ A^{1{,}0914}$	21	0,89	±3302
7.85	$Q_m = 0{,}277\ Q_{msr}^{1{,}317}$	21	0,94	±92,7
7.86	$Q_{msr} = 0{,}0078\ A^{0{,}842}$	21	0,93	±83,4
7.87	$\sigma_m = 0{,}001\ A + 0{,}0514$	21	0,93	±99,1
7.88	$\sigma_m = 0{,}0049\ A^{0{,}7581}$	21	0,90	±90,8
7.89	$\sigma_m = 0{,}4966\ Q_m + 0{,}2640$	21	0,91	±123
7.90	$\sigma_m = 0{,}8032\ Q_m^{0{,}5504}$	21	0,83	±155
7.91	$\sigma_m = 0{,}3011\ Q_{msr} + 0{,}1032$	21	0,97	±71,6
7.92	$\sigma_m = 0{,}3922\ Q_{msr}^{0{,}8877}$	21	0,96	±67,0
7.93	$Q_m/Q_{msr} = 0{,}4222\ Q_m^{0{,}3341}$	21	0,80	±75,2

Zakonitost $Q_m = f(A)$ najbolje je predstavljena nelinearnom formulom (7.84) u tablici 7.10 i ima koeficijent korelacije $r = 0{,}89$, ali i vrlo širok interval pouzdanosti ($\sigma_p = \pm 3302\%$). Za izvođenje su korišteni podaci s 21 hidrološke stanice, a izostavljeni su podaci sa stanica gornjeg dijela Korane i profila koji presuše. Zbog vrlo širokog intervala pouzdanosti i vrlo malog koeficijenta u formuli (0,0005), ova zakonitost nema nikakvog smisla. Zakonitost $Q_m = f(Q_{msr})$ predstavljena nelinearnom

formulom (7.85) iz tablice 7.10 ima veći koeficijent korelacije r = 0,94 i znatno uži interval pouzdanosti (σ_p = ±92,7%) ali se i tu zakonitost ne preporuča rabiti u praksi.

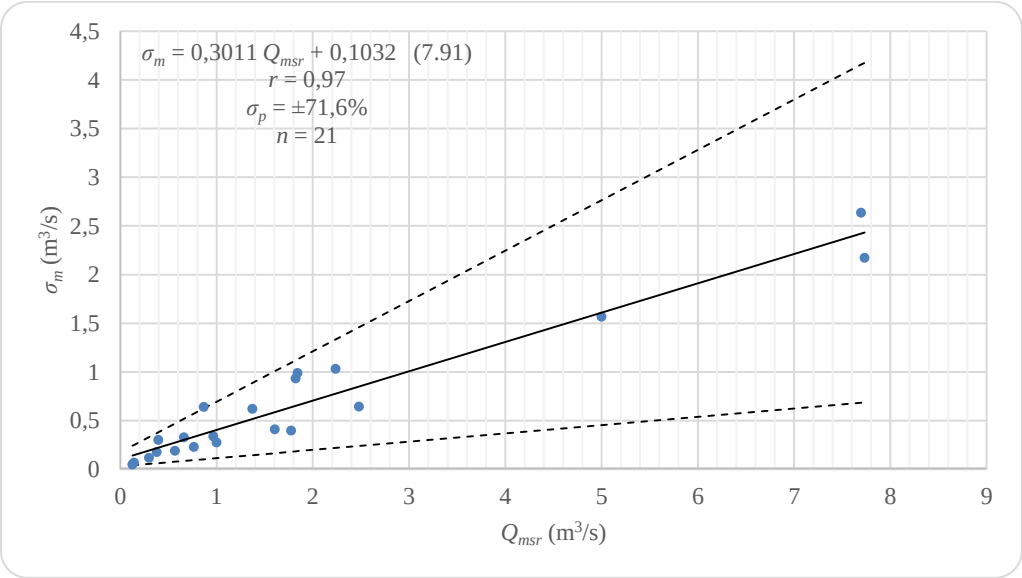
Zakonitost $Q_{msr} = f(A)$ najbolje je predstavljena nelinearnom formulom (7.86) u tablici 7.10 i ima nešto niže koeficijente korelacije od linearne formule (r = 0,93), ali uži interval pouzdanosti, međutim interval pouzdanosti je i dalje toliko širok da ta zakonitost nije preporučljiva za primjenu u praksi.

Zakonitosti $\sigma_m = f(A)$, predstavljene formulama (7.87) i (7.88) iz tablice 7.10 imaju koeficijente korelacije (r = 0,93 i r = 0,90) i intervale pouzdanosti (σ_p = ±99,1% i σ_p = ±90,8%) te se, ni jedna zakonitost ne može koristiti u praksi.

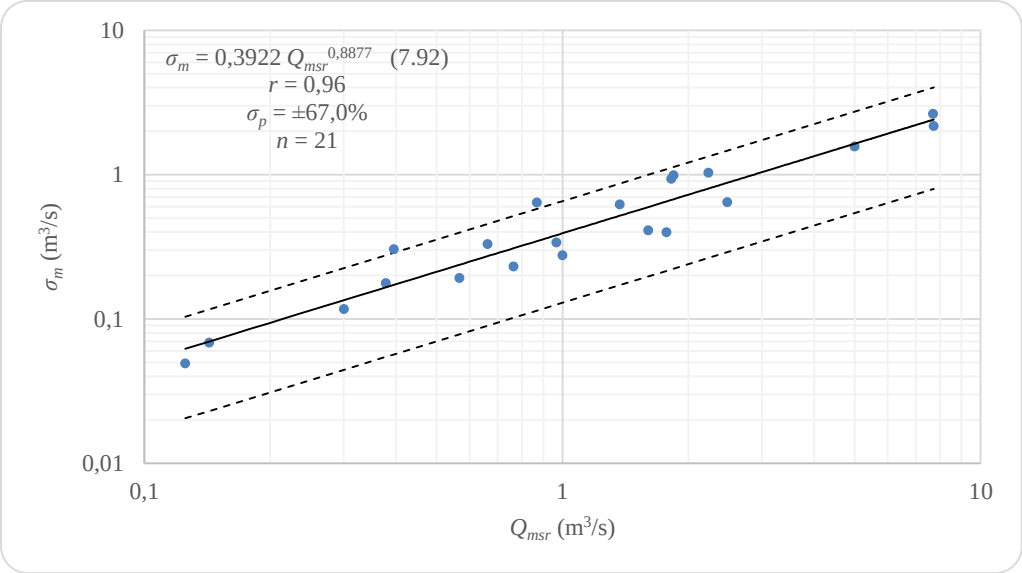
Zakonitost $\sigma_m = f(Q_m)$ predstavljena formulama (7.89) i (7.90), imaju koeficijente korelacije (r = 0,91 i r = 0,83) ali vrlo široke intervale pouzdanosti (σ_p = ±123% i σ_p = ±155%) pa zbog toga nije prikladna za korištenje.

Zakonitost $\sigma_m = f(Q_{msr})$ predstavljena formulama (8.91) (slika 8.25) i (8.92) (slika 8.26) iz tablice 8.10 imaju koeficijent korelacije (r = 0,97 i r = 0,96) a interval pouzdanosti (σ_p = ±71,6% i σ_p = ±67,0%). Obje zakonitosti ne mogu se koristiti u praksi ali budući da od svih zakonitosti imaju najuže intervale pouzdanosti, iz njih se može okvirno ocijeniti da je odstupanje srednjih godišnjih minimalnih protoka od 30% do 40% od srednje godišnje vrijednosti.

Zbog preširokih intervala pouzdanosti σ_p sve zakonitosti iz tablice 7.10 nisu preporučljive za praktičnu upotrebu, kako je ilustrirano primjerima na slikama 7.25 i 7.26.



Slika 7.25 Linearna ovisnost standardne devijacije minimalnih godišnjih protoka σ_m o srednjim minimalnim godišnjim protocima Q_{msr} s intervalom pouzdanosti σ_p



Slika 7.26 Nelinearna ovisnost standardne devijacije minimalnih godišnjih protoka σ_m o srednjim minimalnim godišnjim protocima Q_{msr} s intervalom pouzdanosti σ_p

Sve izvedene zakonitosti karakterističnih parametara srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka prikazanih u tablicama 7.3, 7.6, 7.7 i 7.10 imaju vrlo visoke koeficijente korelacije r ali i široke intervale pouzdanosti σ_p. Zakonitosti karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka imaju najniži koeficijent korelacije r = 0,71 kod zakonitosti (7.9), a najuži interval pouzdanosti σ_p = ±7,76% ima formula (7.29). Zakonitosti karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka imaju veću varijabilnost intervala pouzdanosti. Zakonitosti

karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka imaju nešto niže koeficijente korelacije r i vrlo široke intervale pouzdanosti σ_p, pa se zbog toga općenito zakonitosti karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka ne mogu koristiti.

Zakonitost $Q_m/Q_{msr} = f(Q_m)$ predstavljena nelinearnom formulom (7.93) ima koeficijent korelacije r = 0,80 i širok interval pouzdanosti σ_p = ±75,2% te se ne preporuča za praktičnu upotrebu.

7.4. Usporedba rezultata s rezultatima obrada na drugim područjima

Zakonitosti karakterističnih parametara dobivene ovom analizom uspoređene su s rezultatima drugih regionalnih analiza provedenih na sličnim područjima. Za usporedbu su korišteni rezultati dobiveni regionalnom analizom krša Hrvatske (Žugaj, 1995), regionalnom analizom krških slivova u Hercegovini (Isailović, 1985), s općim formulama za srednju Europu (Keller, 1906), formulama za slivove Hrvatske, Bosne i Slovenije (Srebrenović, 1970) i formulama za sliv Save s utjecajem krša (Srebrenović, 1986). Uspoređene su zakonitosti istih karakterističnih parametara, ali uzevši u obzir bitna obilježja analiziranog područja koja utječu na dobivene zakonitosti i razdoblje obrade pojedinih analiza.

U tablici 7.11 prikazane su i uspoređene formule karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka s drugim obradama.

Tablica 7.11 Usporedba dobivenih zakonitosti karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka s rezultatima istraživanja na drugim područjima

Obrada	Formula	n	r	Formula za krško porječje Kupe	n	r
Žugaj (1995)	$\sigma = 0{,}204\ Q + 0{,}16$	58	0,97	$\sigma = 0{,}191\ Q + 0{,}384$ (7.7)	19	0,97
	$\sigma = 0{,}278\ Q^{0{,}908}$	58	0,99			
Isailović (1985)	$\sigma = 0{,}18\ Q + 0{,}98$	16	1,00	$\sigma = 0{,}24\ Q^{0{,}958}$ (7.8)	19	0,98
	$\sigma = 0{,}221\ Q^{0{,}986}$	16	0,97			
Žugaj (1995)	$P_e = 0{,}83\ P - 250$	47	0,98	$P_e = 0{,}768\ P - 31$ (7.9)	23	0,71
Keller (1906)	$P_e = 0{,}942\ P - 405$	-	-			
Srebrenović (1986)	$P_e = 0{,}88\ P - 244$	64	0,97			

Linearna zakonitost $P_e = f(P)$ u tablici 7.11 dana je za područje hrvatskog krša (Žugaj, 1995), za slivove Srednje Europe (Keller, 1906), slivove Slovenije, Hrvatske i Bosne (Srebrenović, 1970) i za sliv rijeke Save pod kršem (Srebrenović, 1986) te uspoređene sa zakonitošću (7.9) iz tablice 7.3. Navedene zakonitosti nisu slične izvedenoj zakonitosti (7.9).

U tablici 7.12 prikazane su i uspoređene zakonitosti karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka s drugim obradama (Srebrenović, 1970, Jovanović i Radić, 1985 i Žugaj, 1995).

Tablica 7.12 Usporedba dobivenih zakonitosti karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka s rezultatima istraživanja na drugim područjima

Obrada	Formula	*n*	*r*	Formula za krško porječje Kupe	*n*	*r*
Žugaj (1995)	$q_M = 5{,}76\ A^{-0{,}446}$	53	-0,68	$q_M = 2{,}89\ A^{-0{,}215}$ (7.27)	7	-0,95
Srebrenović (1970)	$q_M = 4{,}915\ A^{-0{,}362}$	104	-0,75			

Iz tablice 7.12 je vidljivo da formula (7.27) nije slična onoj za krš Hrvatske (Žugaj, 1995) ni onoj za slivove Slovenije, Hrvatske i Bosne (Srebrenović, 1970). Ovo neslaganje je lako objasniti činjenicom da je formula (7.27) izvedena za usku regiju sliva rijeke Kupe na temelju sedam podataka, dok su druge dvije formule izvedene za cijelo područje hrvatskog krša (golog i obraslog) i područje Slovenije, Hrvatske i Bosne. Upravo zbog uže regionalizacije pri izvođenju formule (7.27), dobivena je formula s većim koeficijentom korelacije $r = -0{,}95$ nego što ga imaju druge dvije zakonitosti i može ju se preporučiti za praktično korištenje na slivu Kupe.

8. Višeparametarske zakonitosti

Uz uobičajene dvoparametarske zakonitosti, u regionalnoj hidrološkoj analizi se razmatraju i višeparametarske zakonitosti karakterističnih hidroloških i meteoroloških parametara. Za praktičnu primjenu zanimljive su troparametarske zakonitosti karakterističnih parametara.

Dva su uvjeta za kvalitetne veze više varijabli:

a) veze između zavisne i nezavisnih varijabli bi trebale biti što bolje,
b) veze između nezavisnih varijabli bi trebale biti što slabije.

Prema Jovanović i Radić (1985) i Radić i sur. (1986), najčešće korištene veze tri varijable u regionalnim analizama su:

$$P_e = f(A, c_v) \tag{8.1}$$

$$c_v = f(A, P_e) \tag{8.2}$$

$$q_M = f(A, P_e) \tag{8.3}$$

$$c_{vM} = f(A, P_e) \tag{8.4}$$

U tablicama 8.1 i 8.2 prikazani su koeficijenti korelacije linearne i nelinearne ovisnosti između karakterističnih parametara koji se najčešće koriste u vezama više varijabli za krš i iz nje je vidljivo da su zahtjevi djelomično zadovoljeni samo za zakonitosti veza (8.1) i (8.3). Koeficijenti korelacije proračunani su koristeći podatke sa sva 32 profila.

Tablica 8.1 Koeficijenti korelacije linearnih ovisnosti između karakterističnih parametara koji se najčešće koriste za višestruku regresiju u kršu

	q_M	A	P_e	c_v	c_{vM}
q_M	1	-0,40	0,59	-0,47	0,31
A		1	-0,29	-0,05	-0,28
P_e			1	-0,61	-0,35
c_v				1	0,55
c_{vM}					1

Tablica 8.2 Koeficijenti korelacije nelinearnih ovisnosti između karakterističnih parametara koji se najčešće koriste za višestruku regresiju u kršu

	q_M	A	P_e	c_v	c_{vM}
q_M	1	-0,47	0,68	-0,48	0,23
A		1	-0,26	-0,12	-0,31
P_e			1	-0,66	-0,37
c_v				1	0,53
c_{vM}					1

Kod višeparametarskih ovisnosti, međuovisnost parametara opisuje se koeficijentom višestruke korelacije *R*, koji je definiran kao:

$$R_{z,xy} = \sqrt{\frac{r_{xz}^2 + r_{yz}^2 - 2r_{xz}r_{yz}r_{xy}}{1 - r_{xy}^2}} \tag{8.5}$$

gdje su *x* i *y* nezavisne varijable a *z* je zavisna varijabla, a r_{ij} je koeficijent korelacije između parametara *i* i *j*. Međutim, *R* nije nepristrana procjena koeficijenta višestruke korelacije za mali broj uzoraka. Relativno nepristrana veličina je *prilagođeni R*, definiran kao:

$$R' = \sqrt{1 - \frac{\left(1 - R^2\right)(n-1)}{n-k-1}} \tag{8.6}$$

gdje su *R* koeficijent višestruke korelacije, *n* je broj ulaznih podataka i *k* je broj nezavisnih varijabli.

U tablici 8.3 dane su vrijednosti koeficijenata višestruke korelacije *R* i prilagođene vrijednosti koeficijenata višestruke korelacije *R′* između karakterističnih parametara iz spomenutih zakonitosti.

Tablica 8.3 Vrijednosti koeficijenata višestruke korelacije *R* i prilagođene vrijednosti koeficijenata višestruke korelacije *R′* između zavisne varijable *z* i nezavisnih varijabli *x* i *y* za linearnu i nelinearnu ovisnost

			linearna ovisnost		nelinearna ovisnost	
z	*x*	*y*	*R*	*R′*	*R*	*R′*
P_e	*A*	c_v	0,69	0,66	0,70	0,67
c_v	*A*	P_e	0,65	0,62	0,64	0,61
q_M	*A*	P_e	0,63	0,60	0,65	0,62
c_{vM}	*A*	P_e	0,52	0,47	0,43	0,36

Iz tablice 8.3 je vidljivo da ni jedna višeparametarska zakonitost nema zadovoljen uvjet $R > |0{,}80|$, međutim zakonitosti veza (8.1) i (8.3) imaju najviše koeficijente višestruke korelacije *R*, pa su te dvije zakonitosti izvedene.

U tablici 8.4 prikazane su izvedene linearne i nelinearne višeparametarske zakonitosti veza (8.1) i (8.3).

Tablica 8.4 Linearne i nelinearne troparametarske zakonitosti

Broj formule	Regresijska relacija	*n*	*R*	σ_p (%)
8.1a	$P_e = 1929 - 0{,}1665\ A - 0{,}00354\ c_v$	32	0,69	±149
8.1b	$P_e = 261\ A^{0{,}0015}\ c_v^{-0{,}8487}$	32	0,70	±129
8.3a	$q_M = 0{,}0296 - 0{,}0000275\ A + 0{,}000493\ P_e$	32	0,63	±242
8.3b	$q_M = 0{,}0000905\ A^{0{,}0855}\ P_e^{\ 1{,}1619}$	32	0,65	±136

Kao i kod dvoparametarskih zakonitosti, linearne zakonitosti imaju šire intervale pouzdanosti nego što imaju nelinearne. Koeficijenti višestruke korelacije *R* su niski i intervali pouzdanosti σ_p su široki za sve četiri izvedene zakonitosti pa zbog toga te zakonitosti nisu preporučljive za upotrebu.

9. Spektralna analiza hidroloških i meteoroloških podataka

Fourierova analiza, kao tip spektralne analize se u vrlo sofisticiranom obliku koristi u hidrologiji u znanstvene svrhe već dulje vrijeme. Kite (1989) je analizirao vremenski niz vodostaja jezera i protoka rijeka, tražeći linearne trendove, periodičnosti, autoregresiju i moguće fizičke uzročnike koji bi pokazali utjecaj na promjene klime. Lall i Mann (1995) su isto tako analizirali utjecaje na klimu koristeći nelinearne dinamičke metode i dugogodišnja klimatološka mjerenja volumena Velikog Slanog Jezera u Saveznoj državi Utah u Sjedinjenim američkim državama. Robin i sur. (1993) i Gelhar (1993) su radili geostatističke analize, Pasternack i sur. (1999) i Kirchner i sur. (2000) su analizirali nelinearna (kaotična i fraktalna) ponašanja.

Tek se u novije vrijeme spektralna analiza praktično koristi kao tipična metoda za inženjere pri rješavanju praktičnih problema u projektiranju. U radovima Denić-Jukić i Jukić (2003) i Jukić i Denić-Jukić (2004, 2006, 2008, 2009) prikazan je novi oblik transfer funkcije krških vodonosnika, tzv. kompozitne transfer funkcije (KTF) u „*Rainfall-runoff*“ (RR) modelu. U tim radovima je pokazana i metodologija određivanja hidrološke površine sliva krškog izvora i procjene količina pritjecanja voda izvan izravnog slivnog područja. Metodologija se temelji na primjeni RR modela baziranog na KTF i korelacijskoj analizi dobivenih rezultata. Primjena na izvor Jadra (Jukić i Denić-Jukić, 2011) je pokazala da značajan dio vode iz izvora ne potječe s njegovog izravnog slivnog područja. Dobiveni rezultati su potvrđeni primjenom klasičnih hidroloških metoda tj. analizom krivulje trajanja protoka na papiru vjerojatnosti, primjenom regionalne formule, a izvršena je i analiza gubitaka vode iz korita i pripadajućeg sliva rijeke Cetine između vodomjernih postaja Gardunska mlinica i Čikotina lađa. Labat i sur. (2000) su analizirali linearni odziv oborine i otjecanja te su zaključili da nije primjenjiv kod malih i velikih voda. Fleming i sur. (2002) su u svom radu opisali praktičan postupak primjene Fourierove analize vremenskog niza hidroloških i meteoroloških podataka. Bailly-Comte i sur. (2008) su analizirali konkretnu poplavu koju je prouzročila rijeka Coulazou u kršu u južnom dijelu Francuske, koristeći analizu vremenskog niza podataka protoka i oborina. Jemcov i Petric (2009) su u svojim istraživanjima krških sustava zaključili da je bitno uzeti efektivnu infiltraciju umjesto oborine kao ulaznu funkciju u spektralnoj analizi. Jukić i Denić-Jukić (2011) koriste spektralnu analizu vremenskih nizova meteoroloških i hidroloških podataka kako bi našli vezu između oborine, temperature zraka i relativne vlažnosti zraka s količinama otjecanja krških izvora na primjeru izvora Jadro. Sang i sur. (2012) koristeći

spektralnu analizu lakše utvrđuju najpogodnije vremenske nizove za analizu. Fan i sur. (2013) su vremenski niz otjecanja razdvojili na tri komponente (trend, periodičnost i rezidual, odnosno ostatak). Koristeći metode Kolmogorov-Smirnova izolirali su reziduale u tom vremenskom nizu te pokazali da su oni stacionarni u vremenu. Daljnjom analizom te tri komponente otjecanja dobili su raspodjelu ekstremnih mjesečnih vrijednosti otjecanja na temelju kojih su dobili prognozu otjecanja izvora.

Postoji velika količina alata kojima se analizira vremenski niz i mogu se izvoditi zaključci, međutim Fourierova transformacija je najčešće korištena u različitim granama znanosti, poput elektrotehnike, biomedicine, geofizike, astronomije, meteorologije i oceanografije. Dobiveni rezultati su fizikalno neposredno spoznajni i mogu se koristiti kao podloga za druge analize u domeni frekvencija. Postoji velika količina softvera koji imaju implementiranu Fourierovu metodu i isto tako velika količina literature koja se bavi tom tematikom, poput Dobrin (1976), Press i sur. (1992), Bates (1998), Emery i Thomson (1998), Peters (1998), Peters i Bates (1998), Smith (1998), Bracewell (2000), Gubbins (2004) i mnogi drugi.

Fourierova transformacija transformira vremenski signal *g(t)* (u ovom slučaju hidrološki i meteorološki vremenski niz) u frekvencijski signal *G(f),* gdje je *f* frekvencija i *t* vrijeme (proteklo vrijeme od početka zapisa vremenskog niza). Ako je vremenska jedinica *t* ulaznog signala *g(t)* dan, tada je jedinica frekvencije *f* dan^{-1}. Fourierova transformacija je dakle:

$$G(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(t) e^{-2\pi i f t} dt \tag{9.1}$$

Fourierovu transformaciju možemo zamisliti kao dekompoziciju vremenskog niza na sinusne valove različitih amplituda, faza i perioda. Sumiranjem svih tih sinusnih valova dobio bi se početni vremenski signal, a to je inverzna Fourierova transformacija:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) e^{2\pi i f t} df \tag{9.2}$$

Za ulazni signal *g(t)* s realnim vrijednostima, Fourierova transformacija *G(f)* je kompleksna, i može se napisati kao:

$$G(f) = R(f) + iI(f) \tag{9.3}$$

gdje su *R(f)* realni ili kosinusni dio i *I(f)* imaginarni ili sinusni dio od *G(f)*. U polarnom zapisu je to:

$$G(f) = A(f)e^{i\Phi(f)} \tag{9.4}$$

gdje su *A(f)* amplituda i *Φ(f)* faza spektra signala i mogu se izraziti kao:

$$A(f) = \sqrt{R(f)^2 + I(f)^2} \tag{9.5}$$

$$\Phi(f) = arctan\left[\frac{I(f)}{R(f)}\right] \tag{9.6}$$

U praktičnoj primjeni, vremenski signal se analizira kao niz konačnih i diskretnih vrijednosti pa se i izrazi od (9.1) do (9.6) računaju kao sume, a ne integrali. Fourierova transformacija vremenskog niza od N vrijednosti jednolikog vremenskog intervala Δt, daje frekventni signal duljine $N + 1$ s jednolikim koracima frekvencije $(N\ \Delta t)^{-1}$. Nyquistova frekvencija f_c je najveća frekvencija koju Fourierova transformacija može prepoznati u vremenskom nizu. Kaže se da su frekvencije veće od kritične frekvencije f_c „*preklopljene*“ (engl.: *aliasing*). Kritična (Nyquistova) frekvencija je:

$$f_c = \frac{1}{\pm 2\Delta t} \tag{9.7}$$

Najčešća mjera kojom se određuju značajke niza koji se analizira je gustoća snage spektra (PSD, engl.: *power spectral density*) i dana je (Press i sur., 1992):

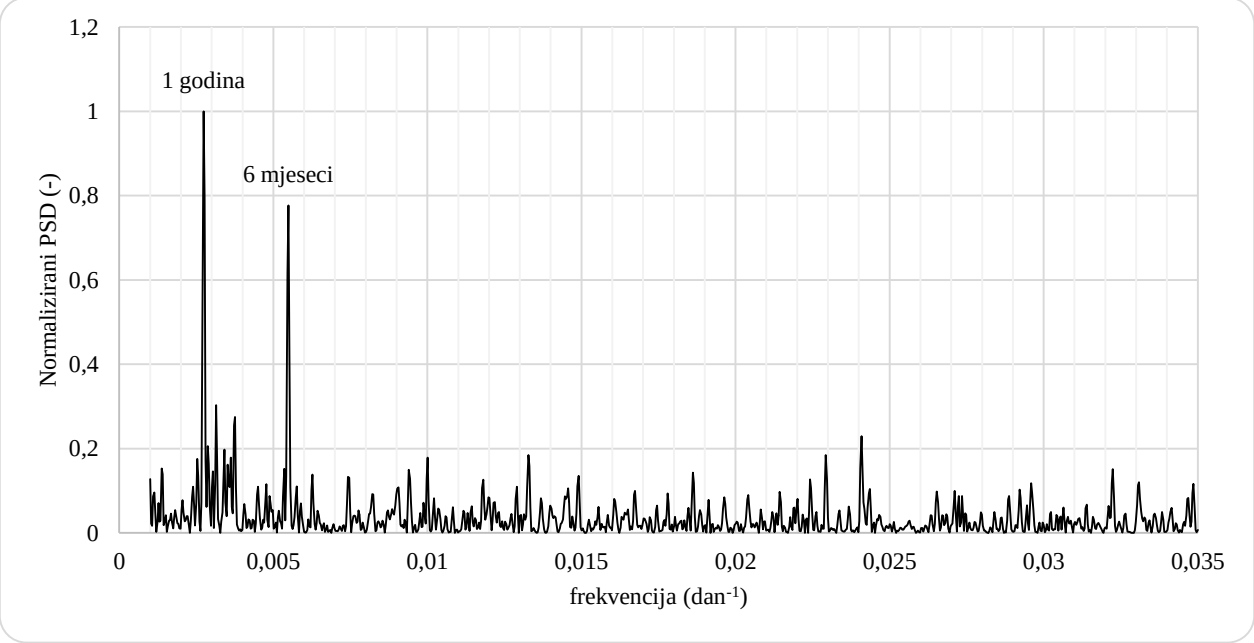
$$PSD(f) = 2A(f)^2 = 2\left[R(f)^2 + I(f)^2\right] \tag{9.8}$$

Fourierova analiza provedena je na hidrološkim podacima dnevnih protoka i meteorološkim podacima dnevnim količinama oborine. Hidrološki i meteorološki podaci analizirani su kroz dva vremenska niza, od 1951. do 1980. godine i od 1981. do 2012. godine na stanicama Zamost 2 na Čabranki, Stative Donje na Donjoj Dobri te na meteorološkim stanicama Parg, Ogulin i Karlovac.

Transformacija svih nizova je provedena od frekvencije f = 0,001 dan^{-1} do f = 0,035 dan^{-1}, što odgovara periodima $T = \frac{1}{f}$ od T = 1000 dana do T = 28,6 dana. Više frekvencije od 0,035 dan^{-1}

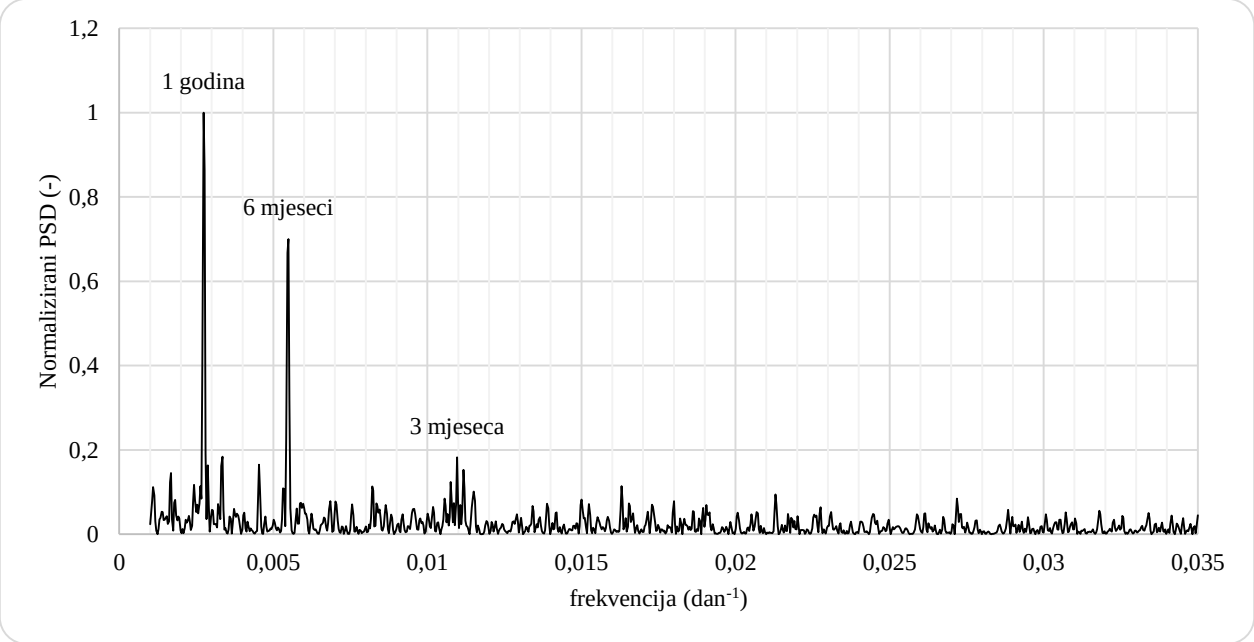
odnosno periode manje od 28,6 dana nije imalo smisla analizirati jer se u tom području frekvencija ne očekuju maksimumi i pojavljuje se veliki šum, odnosno ne očekuje se periodičnost manja od mjesec dana.

Uspoređivani su spektri između dva razmatrana razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.) za srednje dnevne protoke i srednje dnevne oborine. Na slici 9.1 prikazana je normalizirana gustoća spektra snage: jednadžba (9.8) srednjih dnevnih protoka Q na stanici Zamost 2 na Čabranki za razdoblje (1951.-1980.), a na slici 9.2 za razdoblje (1981.-2012.).



Slika 9.1 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka Q na stanici Zamost 2 na Čabranki u razdoblju (1951.-1980.)

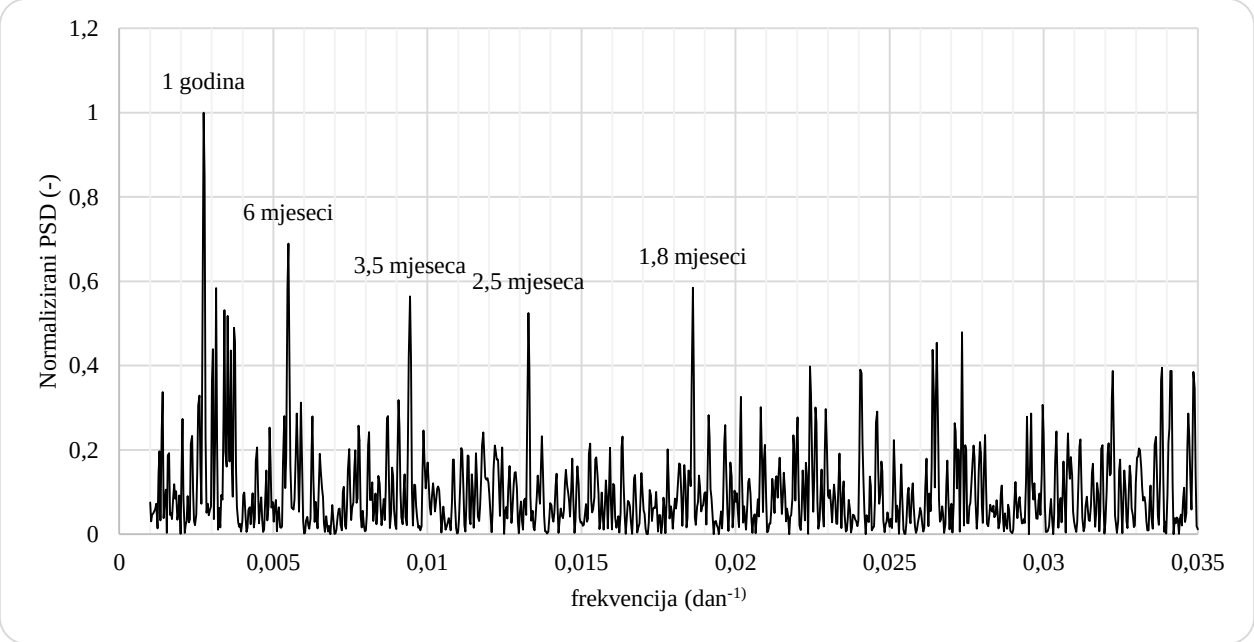
U spektru snage su odmah uočljiva dva glavna vrha, najvećem odgovara frekvencija f = 0,002734 dan^{-1}, odnosno periodičnost T = 1 godina, a manjem odgovara frekvencija f = 0,005488 dan^{-1}, odnosno periodičnost T = 6 mjeseci. U ostatku spektra nije uočljivo isticanje ijedne frekvencije pa se može zaključiti da su tijekom jedne godine izražena dva glavna ekstrema dok se tijekom ostatka godine ekstremi više ne ističu.



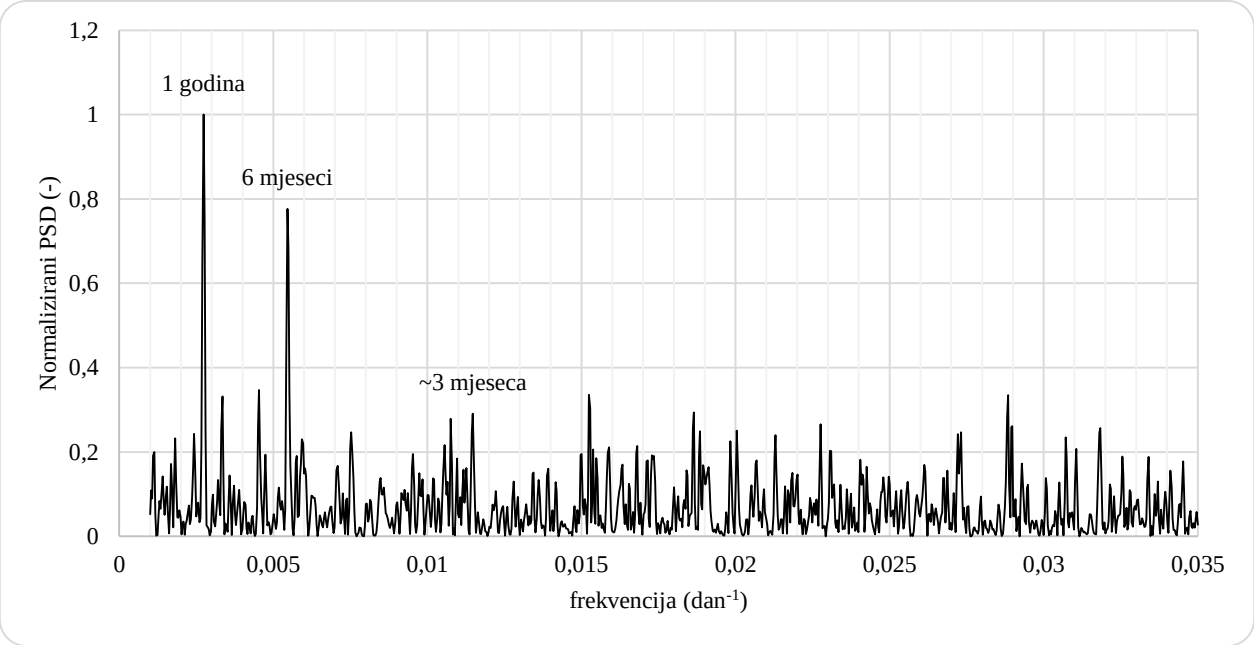
Slika 9.2 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka *Q* na stanici Zamost 2 na Čabranki u razdoblju (1981.-2012.)

U spektru novijeg razdoblja (1981.-2012.) također su uočljiva dva glavna vrha kojima odgovara jedna godina i šest mjeseci, ali se ističe i frekvencija $f = 0{,}010962$ dan^{-1} čemu odgovara periodičnost $T = 3$ mjeseca. U ostalom dijelu spektra ne ističe se posebno ni jedna druga frekvencija. Usporedbom spektara na slikama 9.1 i 9.2 vidi se da je u starijem razdoblju protok tijekom godine ujednačeniji i većeg intenziteta, dok je u novijem razdoblju protok tijekom godine manjeg intenziteta, ali uz izraženije ekstreme koji se događaju češće nego prije.

Na slici 9.3 prikazana je normalizirana gustoća spektra snage ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Parg za razdoblje (1951.-1980.), a na slici 9.4 za razdoblje (1981.-2012.).



Slika 9.3 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Parg u razdoblju (1951.-1980.)



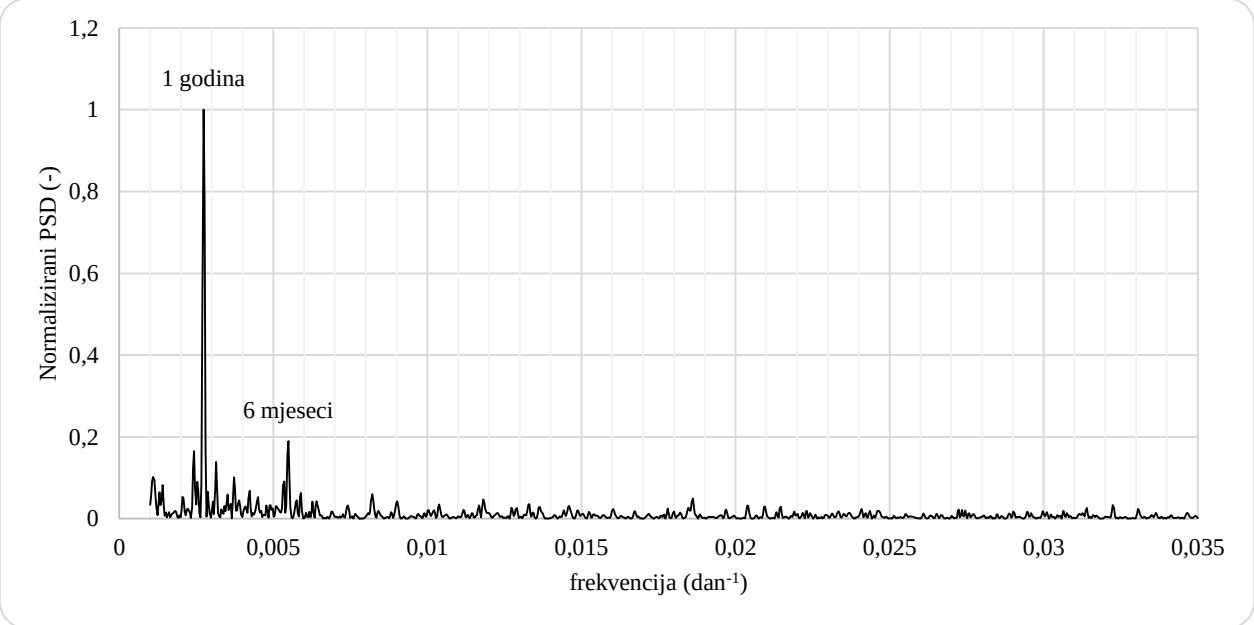
Slika 9.4 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Parg u razdoblju (1981.-2012.)

U oba spektra na slikama 9.3 i 9.4 jasno su vidljivi vrhovi kojima odgovara periodičnost od jedne godina i šest mjeseci, ali za razliku od spektara protoka, kod oborine se u starijem razdoblju jasno ističe još nekoliko drugih vrhova dok se u novijem razdoblju blago ističe vrh kojemu

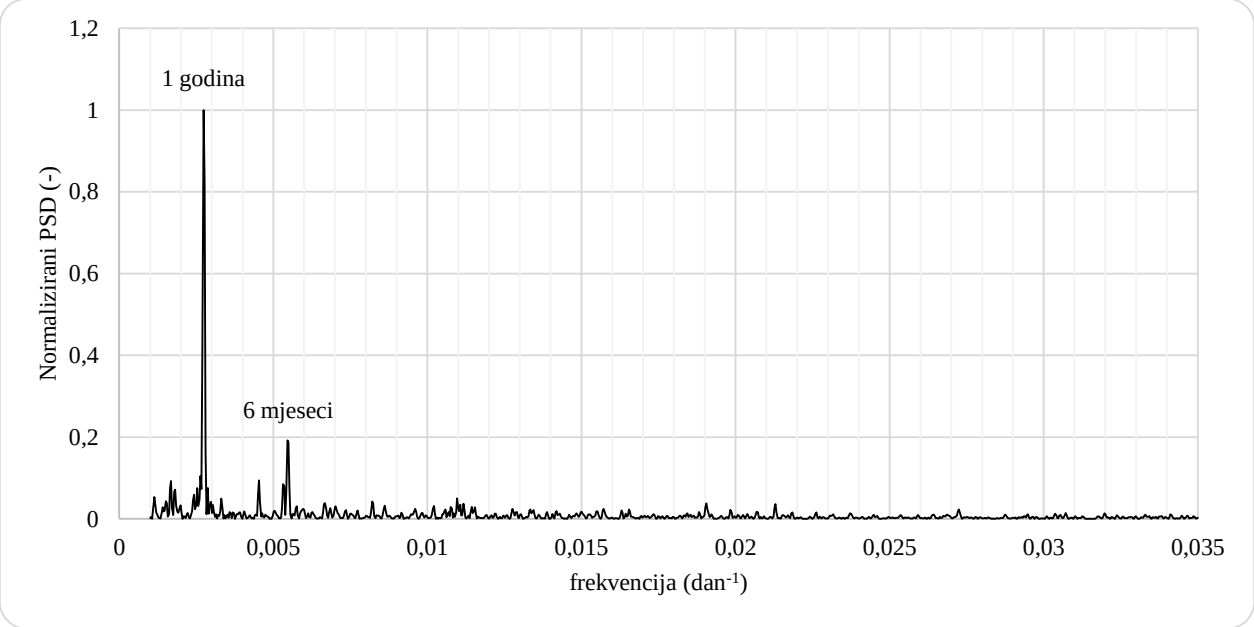
odgovara približno periodičnost od tri mjeseca. Intenzitet u starijem razdoblju je manji nego u novijem.

Usporedivši slike 9.3 i 9.1 može se dovesti u vezu utjecaj oborine na protok, budući da je meteorološka stanica Parg u slivnom području hidrološke stanice Zamost 2 na Čabranki. Jasno je da godišnji i polugodišnji maksimumi oborine utječu na godišnje i polugodišnje maksimume u protoku, no očekivalo bi se još sekundarnih maksimuma u protoku, budući da su vidljivi u spektru oborine. To se može objasniti time da je oborina u starijem razdoblju (1951.-1980.) bila ujednačenija i ekstremi, koji su bili puno manjeg intenziteta nego u novije razdoblju su se pravilnije događali, pa je zbog toga i protok u tom razdoblju bio ujednačeniji. Usporedivši slike 9.4 i 9.2 također se može zaključiti da godišnji i polugodišnji maksimumi oborine utječu na godišnje i polugodišnje maksimume protoka i da blago izraženi sekundarni maksimum oborine kojemu odgovara periodičnost T = ~3 mjeseca, uzrokuje sekundarni maksimum protoka na T = 3 mjeseca.

Na slikama 9.5 i 9.6 prikazane su normalizirane gustoća spektra snage srednjih dnevnih protoka Q na stanici Stative Donje na Donjoj Dobri za razdoblje (1951.-1980.) i (1981.-2012.).



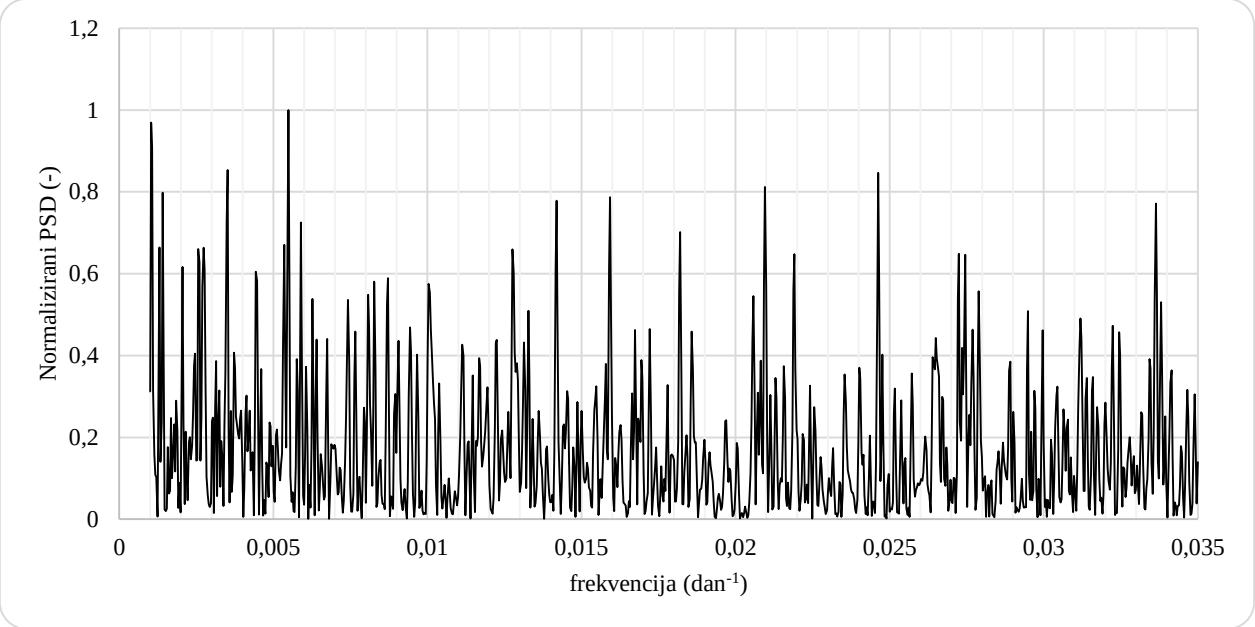
Slika 9.5 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka Q na stanici Stative Donje na Donjoj Dobri u razdoblju (1951.-1980.)



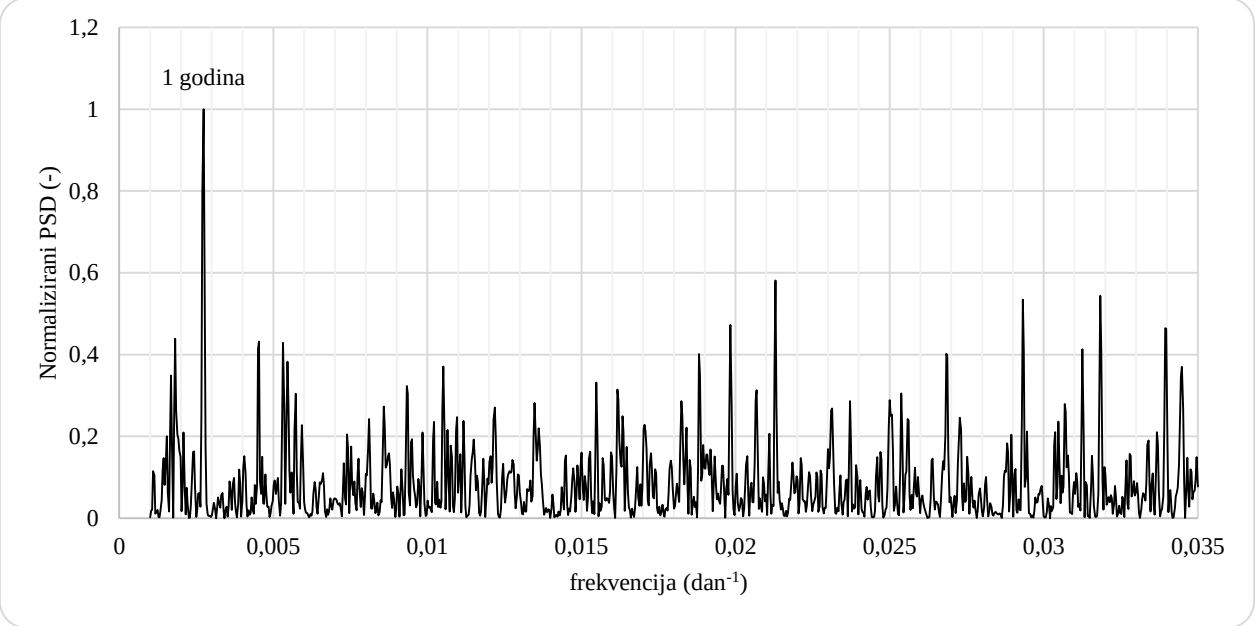
Slika 9.6 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka *Q* na stanici Stative Donje na Donjoj Dobri u razdoblju (1981.-2012.)

Oba spektra normaliziranih gustoća spektra snage izgledaju praktički isto, imaju 1-godišnji i 6-mjesečni maksimum, međutim razlika im je da spektar novijeg razdoblja ipak ima nešto niže vrijednosti snage u ostatku spektra i da su mu ekstremi puno većeg iznosa.

Na slici 9.7 prikazana je normalizirana gustoća spektra snage ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Karlovac za razdoblje (1951.-1980.), a na slici 9.8 za razdoblje (1981.-2012.).



Slika 9.7 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Karlovac u razdoblju (1951.-1980.)

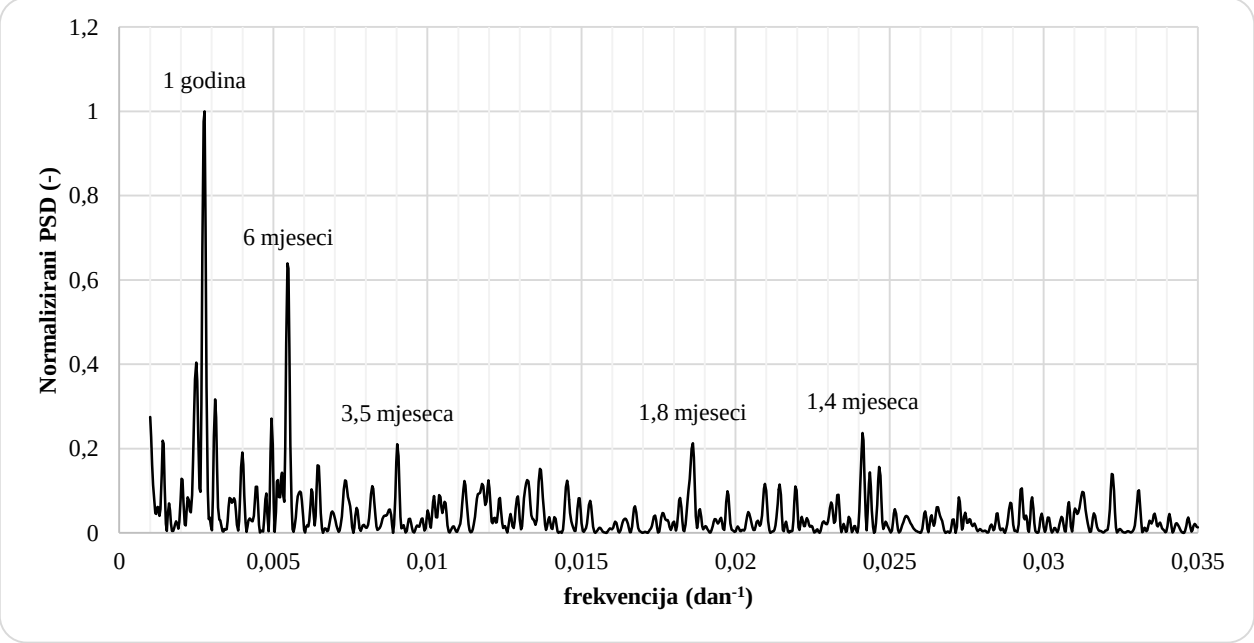


Slika 9.8 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Karlovac u razdoblju (1981.-2012.)

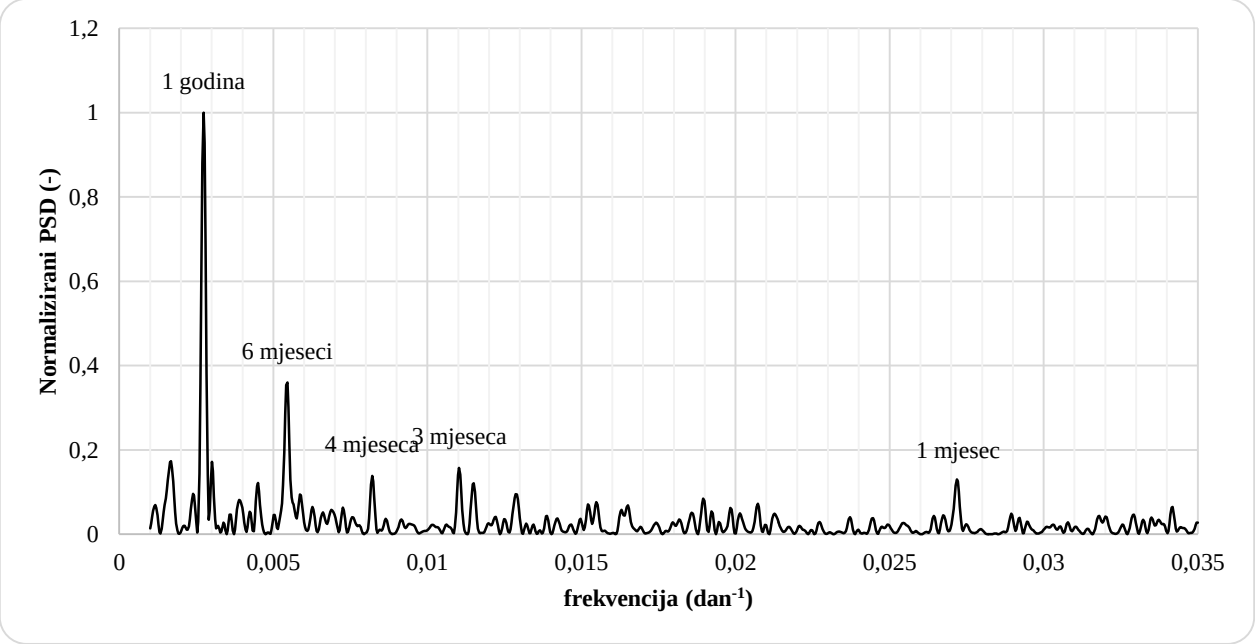
Na slici 9.7 nema istaknute niti jedne frekvencije, nego su kroz cijeli spektar jednoliko zastupljene sve frekvencije podjednakim intenzitetom. Na slici 9.8 je pak vidljiv godišnji ekstrem. Usporedivši oba razdoblja, može se zaključiti da je u starijem razdoblju (1951.-1980.) oborina bila ujednačenija ali manjeg intenziteta, dok je u novijem razdoblju (1981.-2012.) tijekom većeg dijela

godine intenzitet manji, ali je više izraženiji godišnji ekstrem koji ima puno veći intenzitet nego prijašnje razdoblje.

Na slikama 9.9 i 9.10 prikazane su normalizirane gustoća spektra snage srednjih dnevnih protoka *Q* na stanici Turkovići na Gornjoj Dobri za razdoblje (1963.-1980.) i (1997.-2012.). Hidrološka stanica Turkovići počela je s radom 1963. godine te je imala prekid u radu od 1995. do početka 1997. godine, međutim Fourierova transformacija se može smatrati pouzdanom i na kraćem razdoblju.



Slika 9.9 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka *Q* na stanici Turkovići na Gornjoj Dobri u razdoblju (1963.-1980.)

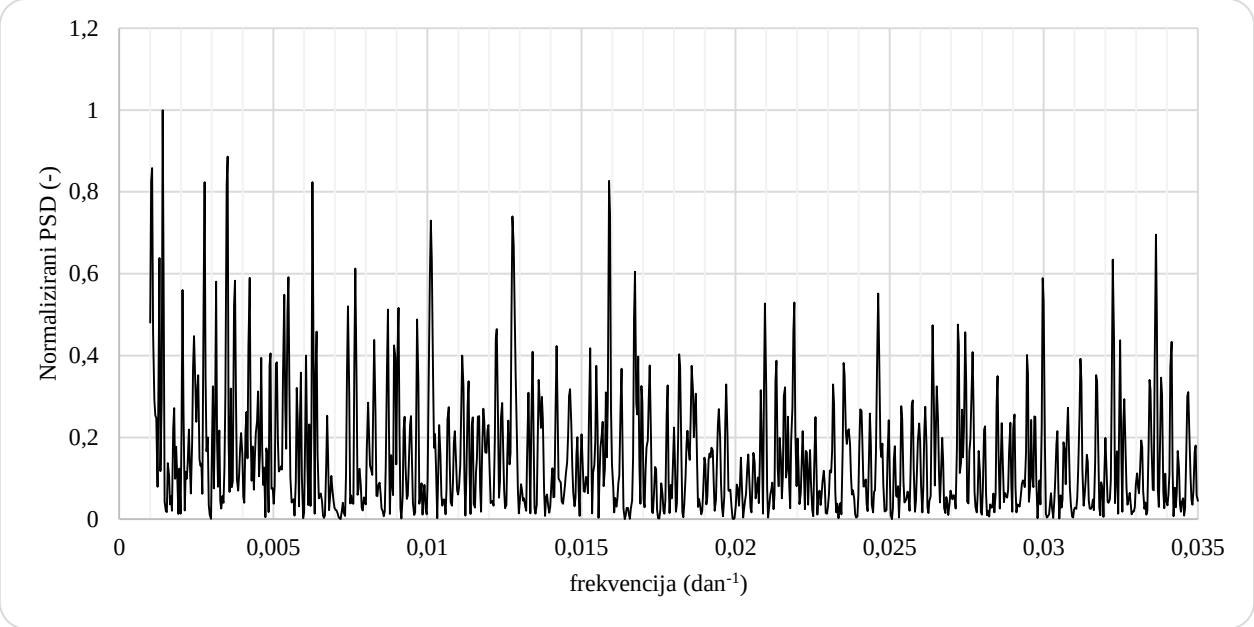


Slika 9.10 Normalizirana gustoća snage spektra srednjih dnevnih protoka *Q* na stanici Turkovići na Gornjoj Dobri u razdoblju (1997.-2012.)

Spektar frekvencija u starijem razdoblju (1963.-1980.), kao na stanicama Zamost 2 i Stative Donje, ima manji intenzitet nego u novijem razdoblju (1997.-2012.) te s blago istaknutim vrhovima, dva glavna godišnji i 6-mjesečni, te još tri manje periodičnosti. Međutim snaga čitavog spektra manjih periodičnosti od šest mjeseci je vrlo mala, pa se dobiveni vrhovi u tom području i ne zamjećuju kao dovoljno jaki ekstremi.

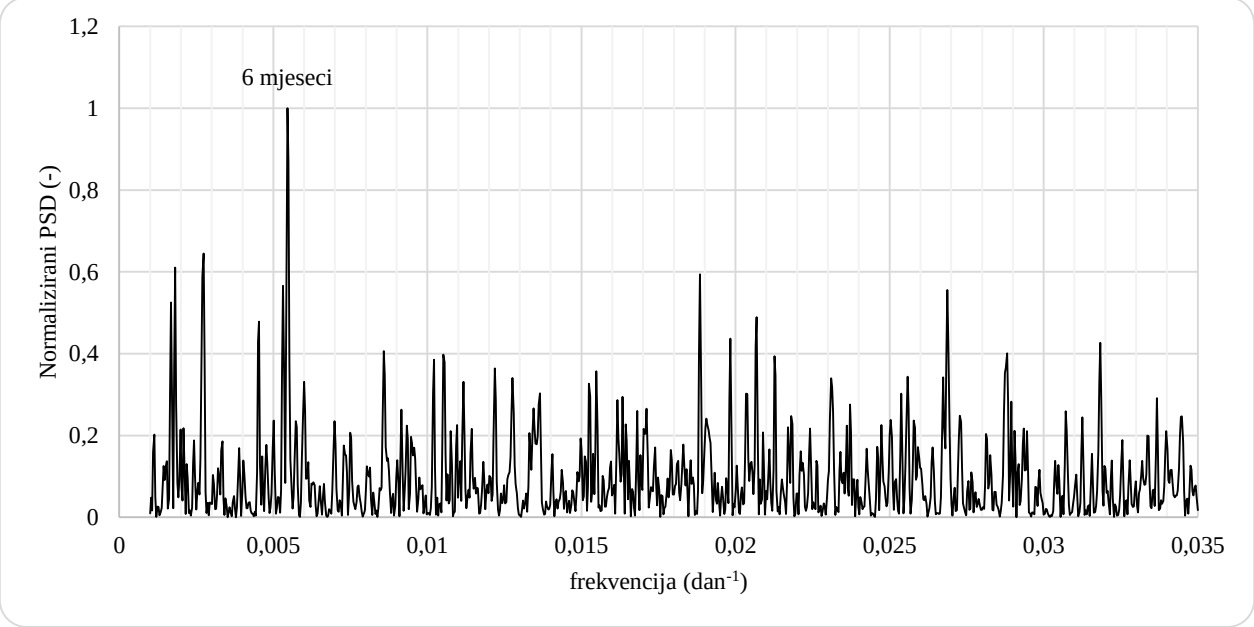
U novijem razdoblju (1997.-2012.) intenzitet snage ekstrema se povećao i pojavila su se, osim godišnjeg i 6-mjesečnog vrha, tri pravilno raspoređena vrha periodičnosti četiri, tri i jednog mjeseca.

Na slici 9.11 prikazana je normalizirana gustoća spektra snage ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Ogulin za razdoblje (1951.-1980.), a na slici 9.12 za razdoblje (1981.-2012.).



Slika 9.11 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Ogulin u razdoblju (1951.-1980.)

Spektar snage ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Ogulin za razdoblje (1951.-1980.) nema izražen ni jedan ekstrem, kao i na stanici Karlovac za isto razdoblje.



Slika 9.12 Normalizirana gustoća snage spektra ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Ogulin u razdoblju (1981.-2012.)

Spektar snage ukupnih dnevnih oborina *P* na stanici Ogulin za razdoblje (1981.-2012.) ima izražen samo jedan ekstrem, i to 6-mjesečni, što znači da na tom području dva puta godišnje nastupaju ekstremi oborine.

Spektralna analiza protoka i oborina pokazala je da su se u razdoblju istraživanja (1981.-2012.) ekstremi protoka i oborina pojačali i više istaknuli, ali da se ukupna količina oborine i protoka smanjila u odnosu na ranije razdoblje (1951.-1980.). Tijekom godine su se istaknula sušnija i vlažnija razdoblja, što je nedvojbeno pokazatelj da se klima promijenila u razdoblju (1981.-2012.) u odnosu na ranije razdoblje (1951.-1980.). Time se mogu objasniti i velika rasipavanja ulaznih podataka kod izvođenja zakonitosti karakterističnih parametara maksimalnih i minimalnih protoka a u prilog idu česte suše i velike poplave koje su se dogodile tijekom zadnjih desetak godina.

10. Zaključak

Hidrološka istraživanja u krškim područjima neophodna su i uvijek aktualna, bilo da se radi o znanstvenim istraživanjima ili hidrološkim podlogama za projektiranja. Svojstva otjecanja u kršu su bitno drugačija nego u nekrškim područjima. Upravo zbog velikog broja nepoznanica koja utječu na vodni režim u kršu, potrebno je istraživanja provoditi regionalno. Regionalna hidrološka analiza je zato opravdan pristup u hidrološkim istraživanjima u kršu.

U ovoj disertaciji istraživano je područje hrvatskog obraslog krša, koje je u odnosu na goli krš, posebno zanimljivo zbog gušće mreže površinskih tokova, velikih prosječnih protoka i ekstremnih velikih protoka vode koji se pojavljuju periodično. Analizirani vodotoci na krškom slivu Kupe obuhvaćaju Kupu, Gerovčicu, Čabranku, Kupicu i Lahinju na slivu Kupe, Gornju i Donju Dobru, Ribnjak i Vitunjčicu na slivu Gornje i Donje Dobre, Mrežnicu te Koranu, Crnu rijeku, Bijelu rijeku, Maticu, Sušanj, Rječicu, Kozjak jezero, Sartuk, Plitvicu i Slunjčicu na slivu Korane. Na razmatranim vodotocima su 32 hidrološka profila, međutim, zbog lošeg položaja mjernih profila, prekratkog razdoblja mjerenja i presušivanja vodotoka, podaci s pojedinih stanica su izostavljeni iz analize, a to su stanice Gomirje na Ribnjaku, Smrečje na Gerovčici, Moravice na Gornjoj Dobri, Brestovac na Vitunjčici, Luketići na Korani, Plitvički Ljeskovac na Crnoj rijeci, Bijeloj rijeci, Matici i Sušnju, Plitvička jezera na Rječici, Kozjak most na Kozjak jezeru, Rodić poljana na Sartuku, Plitvice na Plitvici i Rastoke na Slunjčici. Nepobitno je da se na Zemlji klima mijenja, i kao dio hidrološkog ciklusa, otjecanje se također promijenilo. Razdoblje obrade podataka u ovoj disertaciji (1981.-2012.) izabrano je, jer su početkom 80-ih godina 20. stoljeća primijećeni i dokumentirani izraženi opadajući trendovi u nizovima protoka vode.

Na osnovi provedene regionalne hidrološke analize krškog dijela porječja Kupe, Dobre, Mrežnice i Korane izvedeni su sljedeći zaključci:

1. U odnosu na raniju regionalnu hidrološku analizu u kršu Hrvatske, s podacima iz razdoblja (1951.-1990.), ova je analiza, s podacima iz novog razdoblja (1981.-2012.), pokazala znatne razlike i promjene. Ustanovljene značajne razlike opravdavaju regionalnu analizu podataka iz razdoblja (1981.-2012.). Osim standardnih postupaka, na osnovi karakterističnih protoka, dodane su obrade hidrograma velikih vodnih valova i spektralna analiza, koja je sada prvi puta razrađena na slivu Kupe pod kršem. Na toj

je osnovi izveden važan zaključak o određenim promjenama vezanim za klimatske promjene i dokumentiralo se sadašnju nepovoljniju situaciju u odnosu na prosječne protoke i ekstreme.

2. Uspoređujući 32-godišnje razdoblje obrade podataka u ovoj disertaciji (1981.-2012.) s prethodnim 30-godišnjim homogenim razdobljem (1951.-1980.) u obradi u ranijoj regionalnoj analizi u kršu, ustanovljeno je da su se trendovi u srednjim, maksimalnim i minimalnim protocima promijenili. Maksimalni godišnji protoci su, od 19 mjernih profila u razdoblju (1951.-1980.), u 12 hidrometrijskih profila s rastućim trendom, a u samo sedam profila s opadajućim trendom. Srednji godišnji protoci su bili u 11 mjernih profila s rastućim trendom te osam s opadajućim trendom, dok su minimalni godišnji protoci imali 12 rastućih i sedam opadajućih trendova. U novijem razdoblju (1981.-2012.) trendovi za maksimalne i srednje godišnje protoke su se promijenili. Od 32 obrađena mjerna profila u tom razdoblju maksimalnih godišnjih protoka, samo pet ih ima rastući trend, a čak 27 opadajući trend. Srednji godišnji protoci u 12 mjernih profila imaju rastući trend, a u 20 mjernih profila imaju opadajući trend. Kod minimalnih godišnjih protoka razlika između rastućih i opadajućih trendova se samo smanjila u odnosu na ranije razdoblje obrade: 17 profila ima rastući, a 15 profila opadajući trend, kako je vidljivo iz tablica 5.2, 5.3 i 5.4 u poglavlju 5. Razmatrani nizovi u oba razmatrana razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.) su dovoljno dugi (tablice 5.8, 5.9 i 5.10) da se pouzdano može zaključiti kako su se u novijem razdoblju obrade promijenili trendovi maksimalnih, srednjih i minimalnih godišnjih protoka.
3. Izvedene formule za karakteristične parametre srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka imaju visoke koeficijente korelacije *r*, ali intervali pouzdanosti σ_p su često vrlo široki (tablice 7.3, 7.6, 7.7 i 7.10).
4. Zakonitosti srednjih godišnjih protoka $Q = f(A)$ najbolje su određene formulama (7.3) i (7.4) iz tablice 7.3, međutim, unatoč visokoj vrijednosti koeficijenta korelacije *r* za obje jednadžbe, interval pouzdanosti σ_p je vrlo širok. Isto vrijedi i za zakonitost $\sigma = f(Q)$, predstavljenu izrazima (7.7) i (7.8). No bez obzira na široki interval pouzdanosti, jednadžba (7.8) daje zanimljivu vezu standardne devijacije srednjih godišnjih protoka σ i srednjih godišnjih protoka, variranja srednjih godišnjih protoka Q približno su jednaka 24% oko prosječne vrijednosti godišnjeg protoka. Zanimljiva ovisnost u

hidrologiji, a posebno u području krša je zakonitost $P_e = f(P)$. Izvedena formula (7.9) ima manji koeficijent korelacije nego druge zakonitosti karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka ($r = 0{,}71$), ali ima prihvatljiv interval pouzdanosti. Na osnovi izloženog, a i usporedbom te jednadžbe s jednadžbama izvedenim na drugim područjima (tablica 7.11), zakonitost veze (7.9) se može smatrati dovoljno pouzdanom za razmatrano područje.

5. Izvedene formule karakterističnih parametara maksimalnih godišnjih protoka prikazane u tablicama 7.6 i 7.7 imaju visoke koeficijente korelacije, ali kao i kod zakonitosti karakterističnih parametara srednjih godišnjih protoka, intervali pouzdanosti σ_p jako variraju. No posebno treba obratiti pozornost na dvije zakonitosti, $q_M = f(A)$ i $V_p = f(A)$. Obje zakonitosti izvedene su podacima sa stanica na Kupi i manjih pritoka. Formula (7.27) iz tablice 7.6, izvedena na osnovi sedam podataka, dala je visoki koeficijent korelacije $r = -0{,}95$ i uski interval pouzdanosti u odnosu na druge zakonitosti, tako da se ta formula može praktično koristiti. Druge formule (7.29) - (7.34) su dale visok koeficijent korelacije ($r = 0{,}98$ do $r = 1{,}00$) i vrlo uske intervale pouzdanosti: $\sigma_p = \pm 7{,}76\%$ za formulu (7.29), pa su te formule preporučljive za praktičnu upotrebu na području sliva rijeke Kupe.
6. Dobiveni maksimalni godišnji protoci Q_{Mp} i volumeni velikih vodnih valova V_p 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja su pokazali čvrste međusobne veze, a stvarni hidrogrami dobro se daju aproksimirati Srebrenovićevim teorijskim oblikom, te su dobiveni vodni valovi 10-, 100- i 1000-godišnjeg povratnog razdoblja na hidrološkim profilima na rijeci Kupi. Na osnovi izvedenih odnosa $V_{Mp} = f(Q_{Mp})$ mogu se definirati veliki vodni valovi u bilo kojem profilu duž Kupe, ukoliko su poznate vrijednosti maksimalnih godišnjih protoka različitih povratnih razdoblja Q_{Mp}.
7. Izvedene zakonitosti karakterističnih parametara minimalnih godišnjih protoka prikazane u tablici 7.10, imaju nešto niže koeficijente korelacije od zakonitosti za karakteristične parametre srednjih i maksimalnih godišnjih protoka, ali vrlo velika vjerojatna odstupanja σ_p, pa se ni jedna od izvedenih zakonitosti ne može pouzdano koristiti za praktičnu primjenu.
8. Osim dvoparametarskih, razmatrane su i neke višeparametarske zakonitosti. Zakonitosti koje djelomično zadovoljavaju kriterije za izvođenje veza više varijabli su

$P_e = f(A, c_v)$ i $q_M = f(A, P_e)$, a imaju koeficijent višestruke korelacije $R = 0{,}70$: zakonitost (8.1) i $R = 0{,}65$: zakonitost (8.3) (tablica 8.3). Ta vrijednost ne zadovoljava kriterij $R \geq |0{,}80|$, a izvedene zakonitosti su prikazane u tablici 8.4. Iz tablice je vidljivo da je uz nisku vrijednost koeficijenta višestruke korelacije R, interval pouzdanosti σ_p vrlo širok i izvedene zakonitosti nisu upotrebljive.

9. Na razmatranom području primijenjena je i na zadovoljavajući način provedena Fourierova analiza srednjih dnevnih protoka na stanicama Zamost 2 na Čabranki, Stative Donje na Donjoj Dobri i Turkovići na Gornjoj Dobri i srednjih dnevnih oborina na klimatološkim stanicama Parg, Karlovac i Ogulin. Uspoređeni su spektri protoka i oborina između dva razdoblja (1951.-1980.) i (1981.-2012.) na svakoj stanici, ali i međusobno spektri protoka i oborina na stanicama Parg i Zamost 2 na Čabranki, Karlovac i Stative Donje na Donjoj Dobri i Ogulin i Turkovići na Gornjoj Dobri. Na svim stanicama je primijećeno da su kod protoka i oborina u ranijem razdoblju (1951.-1980.) vrijednosti tijekom godine uravnotežene bez posebnog isticanja ekstrema. U novijem su se pak razdoblju (1981.-2012.) ekstremi u spektru više istaknuli intenzitetom i ponegdje brojem, a intenzitet tijekom ostatka godine se smanjio.
10. Zajedničko svojstvo zakonitosti svih karakterističnih parametara srednjih, maksimalnih i minimalnih godišnjih protoka je visoka vrijednost koeficijenta korelacije r, ali često i visoka vrijednost vjerojatnog odstupanja σ_p. Spektralna analiza srednjih dnevnih protoka i srednjih dnevnih oborina je pokazala da se u razdoblju obrade (1981.-2012.) promijenio režim otjecanja i da su ekstremi puno veći nego prije, a da se otjecanje tijekom ostatka godine smanjilo, što upućuje na zaključak da se klima na razmatranom području sliva Kupe promijenila u razdoblju (1981.-2012.) u odnosu na ranije razdoblje (1951.-1980.).
11. Osim što se dio izvedenih zakonitosti može sa sigurnošću preporučiti za korištenje u hidrotehničkoj praksi, ova je analiza pokazala da su klimatske promjene tijekom zadnjih 30-ak godina utjecale na režim otjecanja u krškom porječju Kupe i pritoka. Zbog tih promjena u otjecanju su se nešto češće nego ranije, počeli pojavljivati ekstremi, naročito kod pojavljivanja velikih voda.
12. Potvrđene su hipoteze o sušnom razdoblju koje nastupa u 1980-im godinama i traje sve do danas i da je analizirano razdoblje obrade podataka od 32 godine (1981.-2012.)

dovoljno pouzdano za provođenje regionalne hidrološke analize. Provedeno razmatranje pretpostavljene troparametarske ovisnosti $P_e = f(A, c_v)$ je pokazalo kao neupotrebljivu u praksi na razmatranom području.

Regionalnom hidrološkom analizom krškog porječja Kupe pokazale su se značajne promjene vodnog i oborinskog režima na tom slivnom području, a potvrđene su spektralnom analizom dnevnih protoka i oborina na tri reprezentativna mjesta na tom slivu. Budući da su regionalnom hidrološkom analizom karakterističnih parametara i spektralnom analizom dnevnih protoka i oborina obuhvaćena i međusobno uspoređena dva dovoljno duga razdoblja, od 1951. do 1980. i od 1981. do 2012. godine, opravdano je zaključiti da su se klimatološke i hidrološke prilike neupitno promijenile u novijem razmatranom razdoblju. Iako je analiza provedena na krškom području sliva Kupe, dobiveni zaključak o klimatskim promjenama se može općenito proširiti i na druga područja.

11. Literatura

1. *Bailly-Comte, V., Jourde, H., Roesch, A., Pistre, S., Batiot-Guilhe, C.,* Time series analyses for Karst/River interactions assessment: Case of the Coulazou river (southern France). Journal of Hydrology 349 (2008) 98-114
2. *Bates, J.H.T.*, Linear systems and the 1-D Fourier transform. *The Fourier Transform in Biomedical Engineering*, Peters, TM., Williams, J. (ur.). Birkhauser: Boston, MA (1998) 25-52
3. *Biondić, B., Biondić, R., Kapelj, S.,* Karst groundwater protection of the Kupa River catchment area and sustainable development. Environmental Geology (2006) doi: 10.1007/s00254-006-0178-4
4. *Biondić, D.,* Velike vode hrvatskih vodotoka crnomorskog sliva. Doktorska disertacija, Zagreb (2005)
5. *Biondić, D., Barbalić, D., Petraš, J.,* Creager's and Francou-Rrodier's envelopes of extrem floods in the Danube river basin in Croatia. Kick-off Workshop on IAHS decade of prediction in ungauged basins: Hydrological Sciences on Mission: Communications (2007) 221-228
6. *Biondić, R.,* Zaštita voda gornjega dijela sliva Kupe. Doktorska disertacija, Zagreb (2005)
7. *Bogunović, M., Bensa, A.,* Tla krša - temeljni čimbenik biljne proizvodnje. *Hrvatski krš i gospodarski razvoj*, Biondić B., Božičević J. (ur.). Centar za krš: Zagreb/Gospić (2005) 41-50
8. *Bracewell, R.N.,* The Fourier Transform and its Applications, 3rd edn., McGraw-Hill, New York, NY (2000) 640 str.
9. *Brkić, B.*, Zaštita grada Ogulina od velikih voda, idejno rješenje, Hidrološke obrade, knjiga 1, Vodoprivredno-projektni biro (VPB) d.d., Zagreb (2001a)
10. *Brkić, B.,* Zaštita grada Ogulina od velikih voda, idejno rješenje, Hidrotehničko rješenje zaštite grada Ogulina izgradnjom retencije, knjiga 2, Vodoprivredno-projektni biro (VPB) d.d., Zagreb (2001b)
11. *Brkić, B.,* Stručna podloga za izradu studije o utjecaju na okoliš retencije Ogulin, studija, Hidrološko-hidraulički proračuni, Vodoprivredno-projektni biro (VPB) d.d., Zagreb (2005)
12. *Bukovac, J., Poljak, M., Šušnjar, M. i Čakalo, M.,* Osnovna geološka karta za list Črnomelj u mjerilu 1:100.000, Geološki zavod, Zagreb, Geološki zavod Ljubljana (1983a)

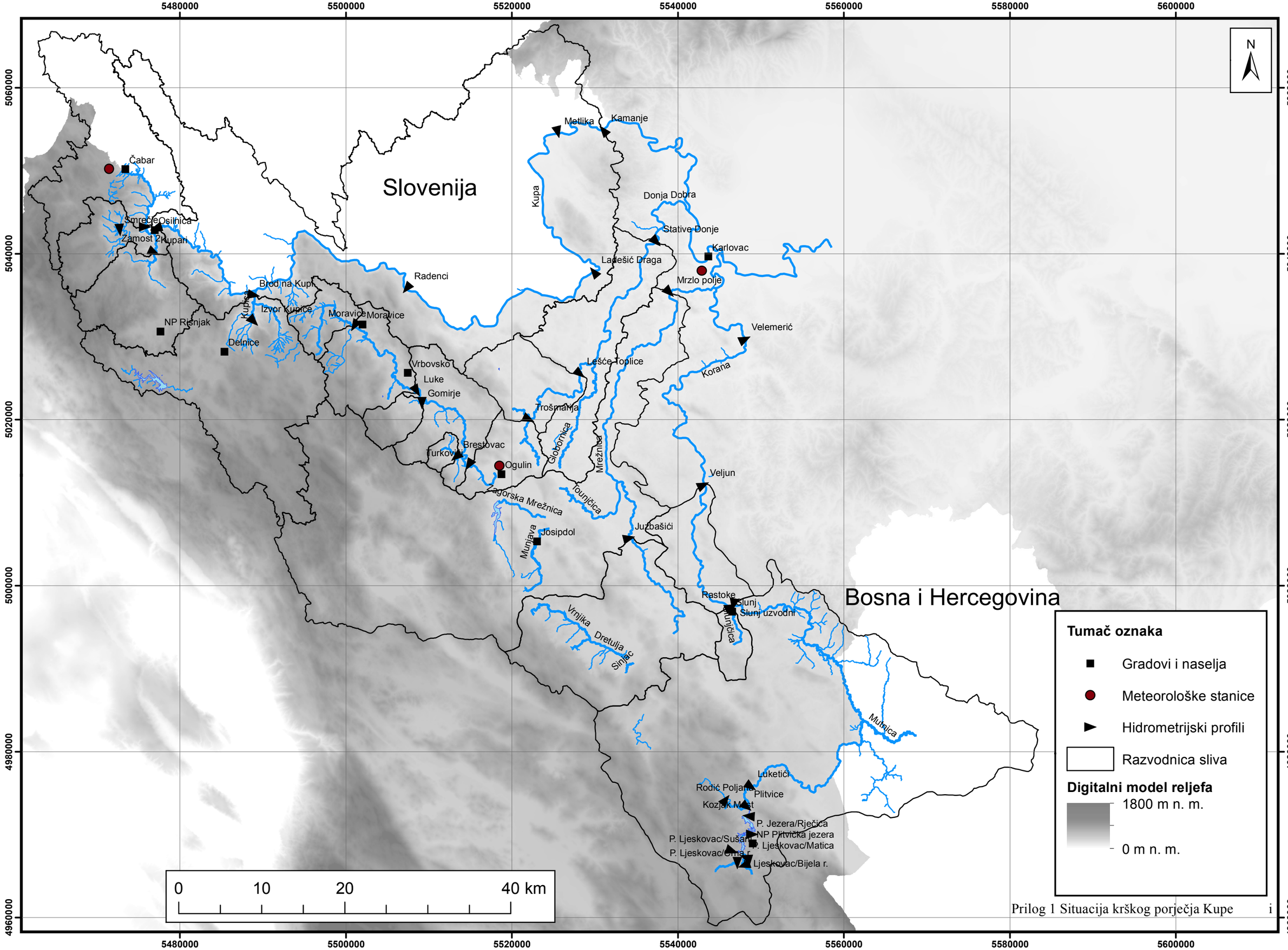
13. *Bukovac, J., Poljak, M., Šušnjar, M. i Čakalo, M.,* Tumač za osnovnu geološku kartu za list Črnomelj u mjerilu 1:100.000, Geološki zavod, Zagreb, Geološki zavod Ljubljana (1983b)
14. *Chow, V.T., i dr.*, Handbook of Applied Hydraulics, McGraw-Hill, New York, NY (1964) 1481 str.
15. *Denić-Jukić, V., Jukić, D.*, Composite transfer functions for karst aquifers. Journal of Hydrology 274 (2003) 80-94
16. *Dobrin, M.B.*, Introduction to Geophysical Prospecting, McGraw-Hill, New York, NY (1976) 630 str.
17. *Emery, W.J., Thomson, R.E.,* Data Analysis Methods in Physical Oceanography, Pergamon Press, London, UK (1998) 650 str.
18. *Fan, Y., Huo, X., Hao, Y., Liu, Y., Wang, T., Liu, Y., Yeh, T. J.,* An assembled extreme value statistical model of karst spring discharge. Journal of Hydrology 504 (2013) 57-68
19. *Fleming, S. W., Lavenue, A. M., Aly, A. H., Adams, A.,* Practical applications of spectral analysis to hydrologic time series. Hydrological Processes 16 (2002) 565-574
20. *Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M. i Patarčić, M.*, Digitalna godišnja oborinska karta Hrvatske. Hrvatski meteorološki časopis 38 (2003) 21-33
21. *Gelhar, L.W.* Stochastic Subsurface Hydrology, Prentice Hall, Englewood, NJ (1993) 390 str.
22. *Grimani, I., Šušnjar, M., Bukovac, J., Milan, A., Nikler, L., Crnolatac, I., Šikić, D. i Blašković, I.*, Tumač za osnovnu geološku kartu za list Crikvenica u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1963)
23. *Gubbins, D.,* Time Series Analysis and Inverse Theory for Geophysicists, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2004) 255 str.
24. *Habič, P.,* Sledenje kraških voda v Sloveniji. Zgodovinski pregled in raziskave po letu 1965. Geografski vestnik LXI (1989) 3-19
25. *Habič, P. i Kogovšek, J.,* Sledenje voda v kraškem zaledju Krupe v JV Sloveniji. Acta carsologica 21 (1992) 37-76
26. *Isailović, D.*, Hidrološke karakteristike Hercegovine i njihov utjecaj na koncepciju vodoprivrednih sistema. Naučna konferencija Voda i krš, Mostar (1985) 33-57
27. *Jemcov, I., Petric, M.,* Measured precipitation vs. effective infiltration and their influence on the assessment of karst systems based on results of the time series analysis. Journal of Hydrology 379 (2009) 304-314

28. *Jevđević, V.,* Tendencije u hidrološkim istraživanjima i njihova primjena u 21. vijeku. Vodoprivreda 23 (131-132) (1991) 127-140
29. *Jovanović, S., Radić, Z. M.,* Regionalna analiza hidroloških parametara. Vodoprivreda 17, 93 (1985) 3-12
30. *Jukić, D., Denić-Jukić, V.*, A frequency domain approach to groundwater recharge estimation in karst. Journal of Hydrology 289 (2004) 95-110
31. *Jukić, D., Denić-Jukić, V.*, Nonlinear kernel functions for karst aquifers. Journal of Hydrology 328 (2006) 360-374
32. *Jukić, D., Denić-Jukić, V.*, Estimating parameters of groundwater recharge model in frequency domain: Karst springs Jadro and Žrnovnica. Hydrological Processes 22 (2008) 4532-4542
33. *Jukić, D., Denić-Jukić, V.*, Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model. Journal of Hydrology 373 (2009) 302-315
34. *Jukić, D., Denić-Jukić, V.,* Partial spectral analysis of hydrological time series. Journal of Hydrology 400 (2011) 223-233
35. *Keller, H.*, Niederschlag, Abfluss und Verdunstung in Mitteleuropa, Berlin, DE (1906)
36. *Kirchner, J.W., Feng, X., Neal, C.*, Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments. Nature 403 (2000) 524-526
37. *Kite, G.*, Use of time series ananlysis to detect climate change. Journal of Hydrology 111 (1989) 259-279
38. *Kljaić, B.,* Izvještaj o mjerenjima protoka velikih voda u profilu Turkovići, Hidroing, Zagreb (2004)
39. *Korolija, B., Živaljević, T. i Šimunić, An.,* Osnovna geološka karta za list Slunj u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1968 i 1972a)
40. *Korolija, B., Živaljević, T. i Šimunić, An.,* Tumač za osnovnu geološku kartu za list Slunj u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1968 i 1972b)
41. *Labat, D., Ababou, R., Mangin, A.*, Rainfall–runnoff relations for karstic springs. Part I: convolution and spectral analyses. Journal of Hydrology 238 (2000) 123-148
42. *Lall, U., Mann, M.,* The Great Salt Lake: a barometer of low-frequency climate variability. Water Resources Research 31 (10) (1995) 2503-2515
43. *Marković, R.*, Analiza homogenosti voda metodom rangiranja, Vodoprivreda (13-14) (1971) 815-820.

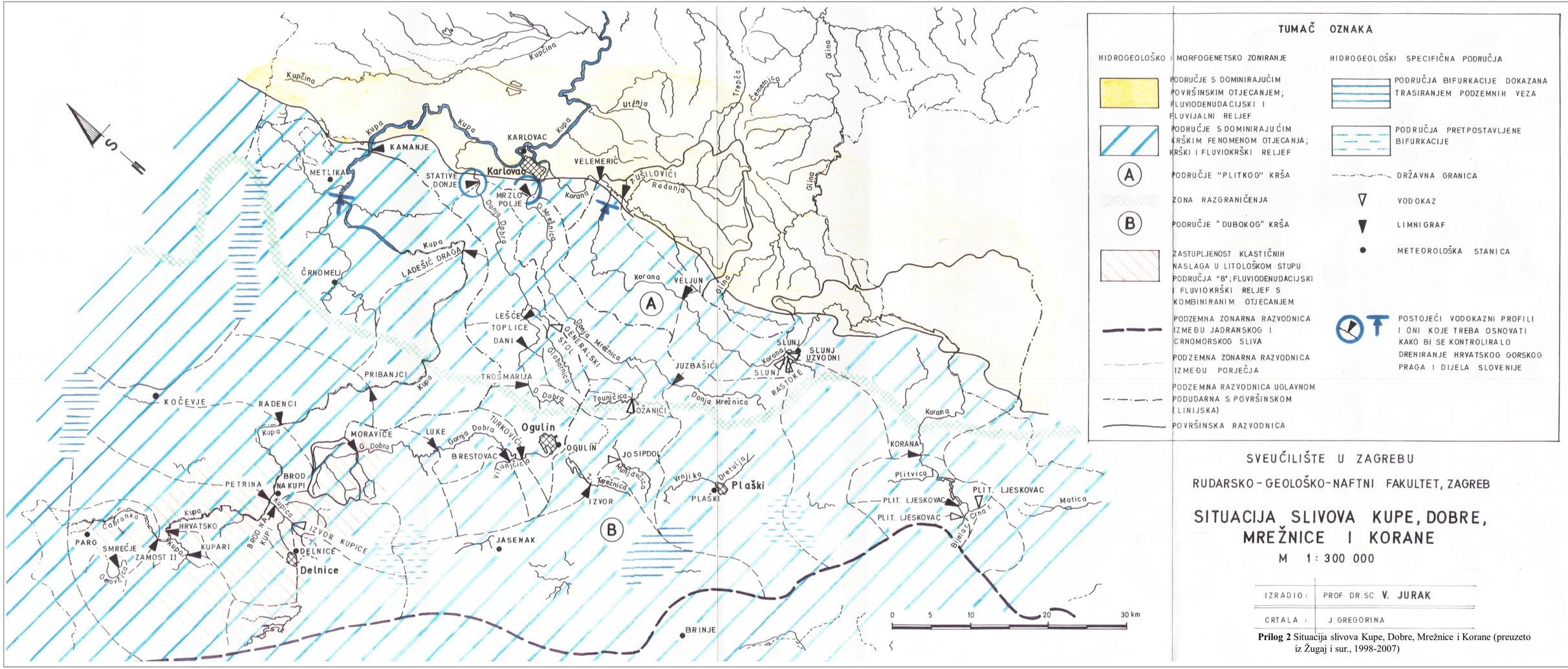
44. *Marković, S.*, Hrvatske mineralne sirovine, Institut za geološka istraživanja, Zavod za geologiju, Zagreb (2002) 544 str.
45. *Matas, M.*, Krš Hrvatske - Geografski pregled i značajke, Geografsko društvo Split, Split (2009) 264 str.
46. *McMahon, T.A.*, Hydrological Characteristics of Selected Rivers in the World, International Hydrological Programme, UNESCO, Paris (1982)
47. *Pasternack, G.B.*, Does the river run wild? Assessing chaos in hydrological systems. Advances in Water Resources 23 (3) (1999) 253-260
48. *Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M.,* Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana. Nakladna kuća „Dr. Feletar“, Hrvatski hidrografski institut Split, Zagreb (2001), 258 str.
49. *Peters, T.M.,* Introduction to the Fourier transform. *The Fourier Transform in Biomedical Engineering*, Peters, T.M., Williams, J. (ur.). Birkhauser: Boston, MA (1998) 1-24
50. *Peters, T.M., Bates, J.H.T.*, The discrete Fourier transform and the fast Fourier transform. *The Fourier Transform in Biomedical Engineering*, Peters, T.M., Williams, J. (ur.). Birkhauser: Boston, MA (1998) 175-194
51. *Pleničar, M i Premru, U.,* Osnovna geološka karta za list Novo Mesto u mjerilu 1:100.000, Geološki zavod Ljubljana (1970a)
52. *Pleničar, M i Premru, U.,* Tumač za osnovnu geološku kartu za list Novo Mesto u mjerilu 1:100.000, Geološki zavod Ljubljana (1970b)
53. *Pleško, N., Gajić-Čapka, M., Zaninović, K.*, Meteorološke oborinske podloge, Centar za meteorološka istraživanja RHMZ, Zagreb (1984) KARTE IZOHIJETA
54. *Polšak, A., Šparica, M., Crnko, J. i Juriša, M.,* Osnovna geološka karta za list Bihać u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1967a)
55. *Polšak, A., Crnko, J., Šimunić, A., Šimunić, A., Šparica, M. i Juriša, M.,* Tumač za osnovnu geološku kartu za list Bihać u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1967b)
56. *Ponce, V.M.*, Engineering Hydrology Principles and Practices, Prentice Hall, New Jersey (1989) 640 str.
57. *Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., Flannery, B.P.*, Numerical Recipes in Fortran 77: the Art of Scientific Computing, 2nd edn., Cambridge University Press: Cambridge, UK (1992) 966 str.

58. *Radić, Z. M., Jovanović, S., Melovska-Trpinac, O.,* Regionalne hidrološke analize. Drugi kongres o vodama Jugoslavije, Ljubljana, 27.-29. listopada 1986. 318-330
59. *Robin, M.J.L., Gutjahr, A.L., Sudicky, E.A., Wilson, J.L.,* Cross-correlated random field generation with the direct Fourier transform method. Water resources Research 29 (7) (1993) 2385-2397
60. *Sang, Y. F., Wang, Z., Liu, C.,* Period identification in hydrologic time series using empirical mode decomposition and maximum entropy spectral analysis. Journal of Hydrology 424-425 (2012) 154-164
61. *Savić, D. i Dozet, S.,* Osnovna geološka karta za list Delnice u mjerilu 1:100.000, Geološki zavod, OOUR za geologiju i paleontologiju, Zagreb, Geološki zavod Ljubljana (1983a)
62. *Savić, D. i Dozet, S.,* Tumač za osnovnu geološku kartu za list Delnice u mjerilu 1:100.000, Geološki zavod, OOUR za geologiju i paleontologiju, Zagreb, Geološki zavod Ljubljana (1983b)
63. *Smith, S.W.,* The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishing, San Diego, CA (1998), 640 str.
64. *Sokač, B., Bahun, S., Velić, I. i Galović, I.,* Tumač za osnovnu geološku kartu za list Otočac u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1970)
65. *Soulios, G.,* Effective Infiltration into Greek Karst. Journal of Hydrology (75) (1984) 343-356
66. *Srebrenović, D.,* Problemi velikih voda, Tehnička knjiga, Zagreb (1970) 278 str.
67. *Srebrenović, D.,* Primijenjena hidrologija, Tehnička knjiga, Zagreb (1986) 509 str.
68. *Šegota, T. i Filipčić, A.,* Köppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje. Geoadria 8 (1) (2003) 17-37
69. *Šikić, K., Basch, O. i Šimunić, A.,* Osnovna geološka karta za list Zagreb u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1972a)
70. *Šikić, K., Basch, O. i Šimunić, A., Tumač za o*snovnu geološku kartu za list Zagreb u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1972b)
71. *Šušnjar, M., Bukovac, J., Nikler, L., Crnolatac, I., Milan, A., Šikić, D., Grimani, I., Vulić, Ž. i Blašković, I.,* Osnovna geološka karta za list Crikvenica u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1963)
72. *Velić, I., Bahun, S., Sokač, B. i Galović, I.,* Osnovna geološka karta za list Otočac u mjerilu 1:100.000, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1970)

73. *Velić, I. i Sokač, B.,* Osnovna geološka karta za list Ogulin u mjerilu 1:100.000, Geološki zavod, Zagreb (1980)
74. *Velić, I., Sokač, B. i Šćavničar, B.,* Tumač za osnovnu geološku kartu za list Ogulin u mjerilu 1:100.000, Geološki zavod, Zagreb (1980)
75. *Wilcoxon, F.,* Individual comparisons by ranking methods. Biometrics Bulletin 1 (6) (1945) 80-83
76. *Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katušin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnec, L., Vučetić, V.,* Klimatski atlas Hrvatske, Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb (2008)
77. *Žugaj, R.,* Regionalna analiza hidroloških parametara u kršu. Doktorska disertacija, Zagreb (1993) 167 str.
78. *Žugaj, R.,* Regionalna hidrološka analiza u kršu Hrvatske, Monografija hrvatskog hidrološkog društva, Zagreb (1995)
79. *Žugaj, R., Jurak, V., Plantić, K., Galović, I., Košćal, S.*, Regionalna analiza slivova Kupe i pritoka u Kršu, Znanstveni projekt MZOS, RGNF, Zagreb (1998-2007)
80. *Žugaj, R., Andreić, Ž., Pavlić, K., Fuštar, L.,* Krivulje trajanja protoka. Građevinar (63) 12 (2011) 1061-1068
81. *Žugaj, R.,* Hidrologija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb (2015) 538 str.
82. *** Methods of Computation of Low Streamflow. *UNESCO*, Pariz (1982) 111 str.
83. *** Zaštita grada Ogulina od velikih voda: Knjiga 1 - Hidrološke obrade. *VPB*, Zagreb (2001)



Prilog 1 Situacija krškog porječja Kupe i



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET, ZAGREB

SITUACIJA SLIVOVA KUPE, DOBRE, MREŽNICE I KORANE

M 1:300 000

IZRADIO:	PROF. DR. SC. V. JURAK
CRTALA:	J. GREGORINA

Prilog 2 Situacija slivova Kupe, Dobre, Mrežnice i Korane (preuzeto iz Žugaj i sur., 1998-2007)

Prilog 3 Karakteristični parametri srednjih godišnjih protoka

Redni broj	Sliv	Vodotok	Profil	A (km^2)	Broj godina n	SREDNJI DOTOCI							
						Q m^3/s	σ	c_v	c_s	q (m^3/s/km^2)	P mm	P_e mm	c
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.	Kupa	Kupa	Kupari	205	32	13,0	2,09	0,16	0,05	0,063	2000	1994	0,997
2.			Hrvatsko	375	15	18,8	3,41	0,18	-0,09	0,050	1950	1585	0,813
3.			Radenci	1490	32	46,8	8,50	0,18	-0,10	0,031	1400	990	0,707
4.			Metlika	2002	32	66,3	12,1	0,18	-0,36	0,033	1310	1044	0,797
5.			Kamanje	2337	15	65,6	14,1	0,21	-0,25	0,028	1200	885	0,738
6.		Gerovčica	Smrečje	13,5	15	0,502	0,11	0,22	0,68	0,037	2510	1172	0,467
7.		Čabranka	Zamost 2	106	32	3,47	0,54	0,15	-0,47	0,033	1928	1033	0,536
8.		Kupica	Izvor	98,0	12	5,61	1,23	0,22	0,21	0,057	1850	1807	0,977
9.			Brod na Kupi	240	18	11,9	1,77	0,15	0,05	0,050	1784	1568	0,879
10.		Lahinja	Gradac	221	32	5,37	1,30	0,24	-0,07	0,024	1290	765	0,593
11.	Dobra	Gornja Dobra	Moravice	46,4	32	1,07	0,274	0,26	-0,12	0,023	1610	724	0,450
12.			Luke	162	19	6,59	1,32	0,20	0,10	0,041	1800	1284	0,713
13.			Turkovići	298	15	11,1	2,36	0,21	-0,06	0,037	1595	1170	0,734
14.		Donja Dobra	Trošmarija	816	28	26,4	4,86	0,18	-0,24	0,032	1350	1021	0,756
15.			Lešće Toplice	876	28	30,5	5,08	0,17	-0,04	0,035	1270	1097	0,864
16.			Stative Donje	1008	32	33,6	6,56	0,20	0,26	0,033	1120	1052	0,939
17.		Ribnjak	Gomirje	25,1	15	1,21	0,330	0,27	-0,03	0,048	1810	1524	0,842
18.		Vitunjčica	Brestovac	89	32	3,21	0,525	0,16	0,19	0,036	1590	1136	0,715
19.	Mrežnica	Mrežnica	Juzbašići	410	16	11,4	3,13	0,27	-0,06	0,028	1450	879	0,606
20.			Mrzlo polje	997	32	24,7	6,76	0,27	0,36	0,025	1150	781	0,679
21.	Korana	Korana	Luketići	202	17	2,46	0,922	0,38	0,29	0,012	1890	383	0,203
22.			Slunj uzvodni	464	10	9,14	2,26	0,25	0,76	0,020	1310	621	0,474
23.			Veljun	1105	16	20,2	7,12	0,35	0,39	0,018	1214	577	0,476
24.		Crna rijeka	Plitvički Ljeskovac	33,6	12	1,29	0,337	0,26	0,19	0,038	1910	1214	0,636
25.		Bijela rijeka	Plitvički Ljeskovac	8,9	12	0,444	0,170	0,38	-0,22	0,050	1900	1573	0,828
26.		Matica	Plitvički Ljeskovac	57,2	12	1,97	0,490	0,25	0,29	0,034	1890	1085	0,574
27.		Sušanj	Plitvički Ljeskovac	4,95	10	0,053	0,009	0,17	-0,53	0,011	1895	340	0,180
28.		Rječica	Plitvička jezera	11,2	10	0,382	0,073	0,19	0,83	0,034	1905	1074	0,564
29.		Kozjak jezero	Kozjak most	169	12	2,47	0,690	0,28	0,34	0,015	1910	462	0,242
30.		Sartuk	Rodić poljana	12,7	11	0,085	0,026	0,31	1,21	0,007	1915	211	0,110
31.		Plitvica	Plitvice	20,3	12	0,582	0,145	0,25	-0,82	0,029	1900	906	0,477
32.		Slunjčica	Rastoke	273	17	8,21	2,21	0,27	-0,06	0,030	1310	949	0,724

Prilog 4 Karakteristični parametri maksimalnih godišnjih protoka

Redni broj	Sliv	Vodotok	Profil	A (km^2)	Broj godina n	MAKSIMALNI PROTOCI												
						Q_M	Q_{Msr}	σ_M	c_{vM}	c_{sM}	Q_M/Q_{Msr}	q_M (m^3/s/km^2)	Q_{M10}	Q_{M100}	Q_{M1000}	V_{10}	V_{100}	V_{1000}
						m^3/s							m^3/s			10^6 m^3		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1.	Kupa	Kupa	Kupari	205	32	195	144	23,8	0,17	0,15	1,36	0,951	175	219	262	33,00	40,91	46,99
2.			Hrvatsko	375	32	368	250	60,0	0,24	-0,05	1,47	0,981	331	399	447	48,57	72,02	96,06
3.			Radenci	1490	32	922	652	140	0,21	-0,77	1,41	0,618	834	1091	1342	163,6	238,80	312,6
4.			Metlika	2002	32	1018	797	160	0,20	-0,93	1,28	0,508	979	1059	1096	231,3	304,90	364,5
5.			Kamanje	2337	32	1123	792	153	0,19	-0,73	1,42	0,481	993	1274	1550	240	313,80	372,9
6.		Gerovčica	Smrečje	13,5	32	18,9	7,93	3,54	0,45	0,84	2,38	1,40	12,9	20,6	29,2	4,34	10,10	16,23
7.		Čabranka	Zamost 2	106	32	128	64,8	22,6	0,35	1,54	1,97	1,21	93,2	149	222	11,17	17,06	22,84
8.		Kupica	Izvor	98,0	28	65,7	42,4	8,85	0,21	1,32	1,55	0,670	53,8	73,3	96,2	19,75	28,56	36,97
9.			Brod na Kupi	240	32	357	141	53,1	0,38	2,16	2,54	1,49	211	349	485	39,95	57,58	74,88
10.		Lahinja	Gradac	221	32	78,4	61,5	11,4	0,19	-0,98	1,27	0,354	74,5	79,8	82,2	19,61	27,96	36,16
11.	Dobra	Gornja Dobra	Moravice	46,4	32	32,7	15,9	5,92	0,37	1,21	2,06	0,705	23,6	34,5	45,6	3,39	4,34	5,03
12.			Luke	162	32	196	102	26,8	0,26	1,06	1,93	1,21	137	186	234	20,23	27,28	33,15
13.			Turkovići	298	32	253	145	38,3	0,26	0,49	1,75	0,850	195	265	334	32,75	44,64	54,81
14.		Donja Dobra	Trošmarija	816	28	187	150	21,5	0,14	-0,32	1,25	0,229	177	195	207	46,8	61,93	76,79
15.			Lešće Toplice	876	32	206	171	20,9	0,12	-0,03	1,20	0,235	198	219	235	54,76	76,00	96,86
16.			Stative Donje	1008	32	405	243	60,7	0,25	0,75	1,67	0,402	322	433	543	64,94	78,73	89,72
17.		Ribnjak	Gomirje	25,1	19	18,4	12,0	3,16	0,26	0,15	1,53	0,733	15,6	21,3	26,9	2,43	3,02	3,4
18.		Vitunjčica	Brestovac	89	32	44,6	33,8	4,14	0,12	0,27	1,32	0,501	39,2	46,8	54,2	9,35	14,45	19,87
19.	Mrežnica	Mrežnica	Juzbašići	410	16	132	78,7	27,8	0,35	0,33	1,68	0,322	115	166	216	34,08	50,72	67,07
20.			Mrzlo polje	997	32	354	237	59,5	0,25	-1,03	1,49	0,355	315	424	531	90,99	129,60	167,5
21.	Korana	Korana	Luketići	202	17	27,2	16,9	6,82	0,40	0,09	1,61	0,134	25,7	33,2	38,8	6,74	10,49	14,16
22.			Slunj uzvodni	464	10	167	115	36,4	0,32	0,17	1,45	0,360	162	204	237	36,08	49,87	63,96
23.			Veljun	1105	16	402	217	97,4	0,45	0,54	1,85	0,364	344	523	698	72,4	86,61	95,48
24.		Crna rijeka	Plitvički Ljeskovac	33,6	12	10,8	6,65	2,20	0,33	-0,11	1,62	0,321	9,52	13,6	17,5	2,93	3,42	3,72
25.		Bijela rijeka	Plitvički Ljeskovac	8,9	12	1,97	1,46	0,427	0,29	-0,50	1,35	0,221	1,98	2,3	2,49	0,65	0,964	1,29
26.		Matica	Plitvički Ljeskovac	57,2	12	11,8	8,87	2,39	0,27	-1,16	1,33	0,206	11,8	12,6	12,7	4,95	7,98	10,97
27.		Sušanj	Plitvički Ljeskovac	4,95	10	0,168	0,126	0,030	0,24	-0,89	1,33	0,034	0,161	0,177	0,184	0,05	0,057	0,059
28.		Rječica	Plitvička jezera	11,2	10	1,65	1,16	0,320	0,27	0,22	1,42	0,147	1,58	1,96	2,25	0,62	0,690	0,723
29.		Kozjak most	Kozjak jezero	169	12	15,7	8,96	3,14	0,35	0,30	1,75	0,093	14,1	21,5	29,3	4,26	5,85	7,40
30.		Sartuk	Rodić poljana	12,7	11	1,25	0,731	0,295	0,40	0,21	1,71	0,099	1,12	1,66	2,19	0,18	0,277	0,375
31.		Plitvica	Plitvice	20,3	12	12,0	8,45	2,64	0,31	0,31	1,42	0,592	11,9	15,2	17,8	1,01	1,57	2,13
32.		Slunjčica	Rastoke	273	17	81,7	58,7	12,2	0,21	-0,08	1,39	0,299	74,6	96,9	119	14,66	17,59	19,78

Prilog 5 Karakteristični parametri minimalnih godišnjih protoka

Redni broj	Sliv	Vodotok	Profil	A (km^2)	Broj godina n	MINIMALNI PROTOCI						
						Q_m	Q_{msr}	σ_m	c_{vm}	c_{sm}	q_m (m^3/s/km^2)	Q_m/Q_{msr}
						m^3/s						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1.	Kupa	Kupa	Kupari	205	32	0,311	0,968	0,339	0,35	0,27	0,00152	0,321
2.			Hrvatsko	375	32	0,659	1,82	0,935	0,51	1,65	0,00176	0,362
3.			Radenci	1490	32	2,35	5,00	1,57	0,31	0,36	0,00158	0,470
4.			Metlika	2002	32	4,60	7,73	2,17	0,28	0,95	0,00230	0,595
5.			Kamanje	2337	32	4,07	7,70	2,64	0,34	1,21	0,00174	0,529
6.		Gerovčica	Smrečje	13,5	32	0,000	0,016	0,030	1,80	3,57	0,00000	0,000
7.		Čabranka	Zamost 2	106	32	0,159	0,567	0,192	0,34	0,99	0,00150	0,280
8.		Kupica	Izvor	98,0	28	0,051	0,395	0,304	0,77	0,64	0,00052	0,129
9.			Brod na Kupi	240	32	0,793	1,606	0,411	0,26	0,35	0,00330	0,494
10.		Lahinja	Gradac	221	32	0,111	0,378	0,177	0,47	1,29	0,00050	0,293
11.	Dobra	Gornja Dobra	Moravice	46,4	32	0,007	0,143	0,069	0,48	0,27	0,00015	0,049
12.			Luke	162	32	0,384	0,764	0,231	0,30	0,33	0,00237	0,502
13.			Turkovići	298	32	0,073	0,870	0,641	8,78	1,50	0,00024	0,084
14.		Donja Dobra	Trošmarija	816	28	0,470	1,00	0,276	0,28	1,31	0,00058	0,470
15.			Lešće Toplice	876	32	0,720	1,77	0,399	0,22	-0,57	0,00082	0,406
16.			Stative Donje	1008	32	0,923	2,48	0,645	0,26	-0,13	0,00092	0,372
17.		Ribnjak	Gomirje	25,1	15	0,033	0,125	0,049	0,39	-0,33	0,00131	0,263
18.		Vitunjčica	Brestovac	89	32	0,071	0,300	0,117	0,39	0,40	0,00080	0,237
19.	Mrežnica	Mrežnica	Juzbašići	410	16	0,504	1,37	0,622	0,45	0,88	0,00123	0,367
20.			Mrzlo polje	997	32	0,222	2,24	1,03	0,46	0,56	0,00022	0,099
21.	Korana	Korana	Luketići	202	17	0,000	0,153	0,197	1,29	1,95	0,00000	0,000
22.			Slunj uzvodni	464	10	0,243	0,663	0,330	0,50	0,35	0,00052	0,366
23.			Veljun	1105	16	0,537	1,84	0,989	0,54	0,48	0,00049	0,291
24.		Crna rijeka	Plitvički Ljeskovac	33,6	12	0,021	0,343	0,249	0,73	0,10	0,00063	0,061
25.		Bijela rijeka	Plitvički Ljeskovac	8,9	12	0,001	0,079	0,069	0,88	0,62	0,00011	0,013
26.		Matica	Plitvički Ljeskovac	57,2	12	0,492	0,692	0,172	0,25	0,79	0,00860	0,711
27.		Sušanj	Plitvički Ljeskovac	4,95	10	0,120	0,200	0,053	0,27	0,28	0,02424	0,600
28.		Rječica	Plitvička jezera	11,2	10	0,154	0,183	0,025	0,14	0,81	0,01375	0,841
29.		Kozjak most	Kozjak jezero	169	12	0,602	0,829	0,252	0,30	1,80	0,00357	0,726
30.		Sartuk	Rodić poljana	12,7	11	0,003	0,016	0,014	0,86	1,52	0,00024	0,183
31.		Plitvica	Plitvice	20,3	12	0,022	0,065	0,037	0,57	0,71	0,00109	0,337
32.		Slunjčica	Rastoke	273	17	0,121	0,945	0,731	0,77	1,14	0,00044	0,128

Prilog 6 Koeficijenti korelacije linearne ovisnosti ($y = ax + b$)

	Srednji godišnji protoci								Maksimalni godišnji protoci													Minimalni godišnji protoci					
	A	P	P_e	Q	σ	c_v	c_s	c	Q_M	Q_{Msr}	σ_M	c_{vM}	c_{sM}	q_M	Q_{10}	Q_{100}	Q_{1000}	V_{10}	V_{100}	V_{1000}	Q_M/Q_{Msr}	Q_m	Q_{msr}	σ_m	c_{vm}	c_{sm}	Q_m/Q_{ms}
A	1	-0,65	-0,29	**0,97**	**0,99**	-0,05	-0,27	0,16	**0,93**	**0,94**	**0,91**	-0,28	-0,59	-0,40	**0,94**	**0,93**	**0,91**	**0,96**	**0,95**	**0,94**	-0,39	**0,89**	**0,94**	**0,93**	-0,17	-0,10	0,57
P		1	**0,79**	-0,58	-0,64	-0,13	0,13	0,19	-0,46	-0,46	-0,48	0,35	0,51	0,73	-0,47	-0,47	-0,47	-0,52	-0,50	-0,49	0,51	-0,39	-0,48	-0,48	0,13	0,50	-0,42
P_e			1	-0,12	-0,23	-0,61	-0,17	0,74	-0,09	-0,10	-0,16	-0,35	0,32	0,59	-0,11	-0,12	-0,12	-0,15	-0,15	-0,14	0,06	-0,08	-0,11	-0,15	0,01	-0,15	0,15
Q				1	**0,97**	-0,23	-0,37	0,31	**0,94**	**0,96**	**0,90**	-0,39	-0,56	-0,30	**0,95**	**0,93**	**0,90**	**0,97**	**0,96**	**0,95**	-0,41	**0,93**	**0,96**	**0,92**	-0,16	-0,12	0,64
σ					1	-0,06	-0,27	0,21	**0,93**	**0,93**	**0,92**	-0,29	-0,58	-0,37	**0,94**	**0,93**	**0,92**	**0,96**	**0,95**	**0,94**	-0,38	**0,88**	**0,94**	**0,94**	-0,15	-0,10	0,57
c_v						1	0,41	-0,66	-0,21	-0,22	-0,10	0,55	-0,15	-0,47	-0,19	-0,17	-0,15	-0,15	-0,16	-0,17	0,05	-0,23	-0,20	-0,07	0,06	0,16	-0,49
c_s							1	-0,29	-0,35	-0,37	-0,27	0,39	0,13	-0,05	-0,35	-0,32	-0,30	-0,33	-0,33	-0,33	0,22	-0,42	-0,38	-0,32	0,03	0,15	-0,43
c								1	0,24	0,23	0,15	-0,65	0,02	0,19	0,22	0,21	0,19	0,20	0,20	0,20	-0,26	0,22	0,24	0,17	-0,07	-0,46	0,46
Q_M									1	**0,99**	**0,98**	-0,24	-0,46	-0,11	**0,99**	**1,00**	**0,98**	**0,97**	**0,98**	**0,97**	-0,24	**0,94**	**0,98**	**0,96**	-0,10	-0,06	0,63
Q_{Msr}										1	**0,96**	-0,31	-0,54	-0,17	**1,00**	**0,98**	**0,96**	**0,99**	**0,99**	**0,99**	-0,34	**0,96**	**0,99**	**0,96**	-0,11	-0,05	0,61
σ_M											1	-0,12	-0,44	-0,13	**0,98**	**0,98**	**0,98**	**0,95**	**0,95**	**0,95**	-0,19	**0,90**	**0,95**	**0,95**	-0,10	-0,06	0,59
c_{vM}												1	0,51	0,31	-0,27	-0,22	-0,17	-0,29	-0,30	-0,30	0,79	-0,27	-0,28	-0,21	0,11	0,37	-0,42
c_{sM}													1	0,62	-0,52	-0,48	-0,43	-0,57	-0,58	-0,58	0,78	-0,46	-0,51	-0,53	0,08	-0,06	-0,21
q_M														1	-0,13	-0,13	-0,13	-0,24	-0,23	-0,22	0,72	-0,13	-0,18	-0,21	0,14	0,24	-0,02
Q_{10}															1	**0,99**	**0,97**	**0,99**	**0,99**	**0,98**	-0,31	**0,95**	**0,98**	**0,97**	-0,11	-0,05	0,61
Q_{100}																1	**0,99**	**0,97**	**0,97**	**0,97**	-0,24	**0,92**	**0,97**	**0,97**	-0,11	-0,07	0,60
Q_{1000}																	1	**0,95**	**0,95**	**0,95**	-0,19	**0,88**	**0,94**	**0,95**	-0,10	-0,08	0,58
V_{10}																		1	**1,00**	**0,99**	-0,34	**0,96**	**0,99**	**0,97**	-0,14	-0,05	0,58
V_{100}																			1	**1,00**	-0,34	**0,95**	**0,99**	**0,97**	-0,14	-0,04	0,58
V_{1000}																				1	-0,34	**0,94**	**0,98**	**0,96**	-0,14	-0,04	0,58
Q_M/Q_M																					1	-0,28	-0,30	-0,30	0,15	0,28	-0,28
Q_m																						1	**0,98**	**0,92**	-0,18	-0,02	0,65
Q_{msr}																							1	**0,97**	-0,15	-0,06	0,62
σ_m																								1	-0,05	0,01	0,51
c_{vm}																									1	0,33	-0,41
c_{sm}																										1	-0,38
Q_m/Q_m																											1

Prilog 7 Koeficijenti korelacije nelinearne ovisnosti ($y = ax^b$)

	Srednji godišnji protoci								Maksimalni godišnji protoci												Minimalni godišnji protoci					
	A	P	P_e	Q	σ	c_v	c_s	c	Q_M	Q_{Msr}	σ_M	c_{vM}	c_{sM}	q_M	Q_{10}	Q_{100}	Q_{1000}	V_{10}	V_{100}	V_{1000}	Q_M/Q_{Msr}	Q_m	Q_{msr}	σ_m	c_{vm}	c_{sm}	Q_m/Q_{msr}
A	1	-0,73	-0,37	**0,96**	**0,98**	-0,01		0,06	**0,90**	**0,93**	**0,88**	-0,16		-0,49	**0,93**	**0,91**	**0,88**	**0,96**	**0,96**	**0,95**	-0,34	**0,86**	**0,93**	**0,90**	-0,16		0,47
P		1	**0,79**	-0,57	-0,65	-0,39		0,13	-0,43	-0,48	-0,44	0,11		0,81	-0,47	-0,44	-0,42	-0,56	-0,55	-0,54	0,35	-0,40	-0,49	-0,47	0,14		-0,13
P_e			1	-0,10	-0,22	-0,59		0,71	-0,13	-0,13	-0,23	-0,32		0,58	-0,16	-0,16	-0,16	-0,18	-0,17	-0,17	0,02	-0,03	-0,11	-0,16	0,00		0,12
Q				1	**0,98**	-0,18		0,31	**0,93**	**0,96**	**0,87**	-0,26		-0,36	**0,95**	**0,93**	**0,90**	**0,98**	**0,97**	**0,96**	-0,36	**0,91**	**0,96**	**0,92**	-0,17		0,54
σ					1	0,02		0,21	**0,90**	**0,93**	**0,88**	-0,17		-0,44	**0,93**	**0,91**	**0,88**	**0,97**	**0,96**	**0,95**	-0,35	**0,86**	**0,94**	**0,93**	-0,12		0,47
c_v						1		-0,53	-0,20	-0,21	-0,06	0,48		-0,39	-0,18	-0,16	-0,15	-0,12	-0,14	-0,16	0,08	-0,29	-0,19	-0,02	0,27		-0,38
c_s							1																				
c								1	0,16	0,20	0,03	-0,53		0,18	0,16	0,13	0,11	0,20	0,19	0,19	-0,25	0,28	0,23	0,15	-0,11		0,28
Q_M									1	**0,99**	**0,98**	0,00		-0,06	**0,99**	**1,00**	**0,99**	**0,95**	**0,95**	**0,94**	-0,08	**0,89**	**0,97**	**0,94**	-0,10		0,49
Q_{Msr}										1	**0,95**	-0,14		-0,17	**1,00**	**0,98**	**0,96**	**0,98**	**0,97**	**0,97**	-0,25	**0,91**	**0,97**	**0,94**	-0,12		0,52
σ_M											1	0,18		-0,05	**0,97**	**0,98**	**0,99**	**0,92**	**0,91**	**0,90**	0,01	**0,85**	**0,94**	**0,94**	-0,06		0,44
c_{vM}												1		0,35	-0,07	0,02	0,09	-0,16	-0,17	-0,18	**0,82**	-0,16	-0,09	0,00	0,19		-0,22
c_{sM}													1														
q_M														1	-0,14	-0,09	-0,04	-0,30	-0,29	-0,29	0,62	-0,17	-0,19	-0,18	0,16		-0,09
Q_{10}															1	**0,99**	**0,98**	**0,97**	**0,97**	**0,96**	-0,19	**0,90**	**0,98**	**0,95**	-0,11		0,51
Q_{100}																1	**1,00**	**0,96**	**0,95**	**0,94**	-0,09	**0,89**	**0,97**	**0,95**	-0,10		0,48
Q_{1000}																	1	**0,93**	**0,95**	**0,92**	-0,02	**0,89**	**0,97**	**0,95**	-0,10		0,48
V_{10}																		1	**1,00**	**0,99**	-0,30	**0,89**	**0,97**	**0,96**	-0,12		0,49
V_{100}																			1	**1,00**	-0,30	**0,89**	**0,97**	**0,96**	-0,12		0,49
V_{1000}																				1	-0,30	**0,89**	**0,96**	**0,95**	-0,12		0,49
Q_M/Q_{Msr}																					1	-0,24	-0,19	-0,18	0,14		-0,25
Q_m																						1	**0,94**	**0,83**	-0,39		**0,80**
Q_{msr}																							1	**0,96**	-0,20		0,54
σ_m																								1	0,03		0,37
c_{vm}																									1		-0,60
c_{sm}																										1	
Q_m/Q_{msr}																											1

Životopis

Krešimir Pavlić rođen je 2. prosinca 1984. godine u Travniku u Bosni i Hercegovini. Od 1993. godine živi u Zagrebu gdje 2004. godine završava X Gimnaziju i iste godine upisuje studij fizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je 2010. godine Fiziku - Geofiziku – seizmologiju i fiziku čvrste zemlje. Od 2011. godine zaposlen je kao znanstveni novak/asistent na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu gdje upisuje doktorski studij Geološkog inženjerstva. Pod mentorstvom prof. dr. sc. Ranka Žugaja i komentorstvom doc. dr. sc. Jelene Parlov izrađuje doktorsku disertaciju pod naslovom „Regionalna hidrološka analiza krškog porječja Kupe“. Na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu drži vježbe iz Fizike na preddiplomskom studiju. Sudjelovao je na dvije međunarodne konferencije, objavio je dva znanstvena i jedan stručni rad, sedam stručnih elaborata te je urednik zbornika radova.

Popis objavljenih radova

1. Žugaj, R., Andreić, Ž., Pavlić, K., Fuštar, L. (2011): Krivulje trajanja protoka; Građevinar 63, 1061-1068.
2. Andreić, Ž., Andreić, D. and Pavlić, K. (2012): Near infrared light pollution measurements in Croatian sites. Geofizika, 29, 143-156.
3. Žugaj, R., Pavlić, K (2015): Karakteristični primjeri izračuna velikih voda vezano na zaštitu ugroženih područja. Vodnogospodarski projekti i EU fondovi, (Karleuša, B., Pavlić, K. (ur.)), Hrvatsko hidrološko društvo, 5-30