

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Kofol, T., 2014. Modeliranje taljenja snežne odeje s programoma HEC-HMS in SRM. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Šraj, M., somentor Brilly, M.): 107 str.

Datum arhiviranja: 09-06-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Kofol, T., 2014. Modeliranje taljenja snežne odeje s programoma HEC-HMS in SRM. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Šraj, M., co-supervisor Brilly, M.): 108 pp.

Archiving Date: 09-06-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM VODARSTVO IN
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidatka:

TINA KOFOL

**MODELIRANJE TALJENJA SNEŽNE ODEJE S
PROGRAMOMA HEC-HMS IN SRM**

Diplomska naloga št.: 227/VKI

**SNOWMELT MODELING WITH HEC-HMS AND SRM
MODELS**

Graduation thesis No.: 227/VKI

Mentorica:

doc. dr. Mojca Šraj

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Dušan Žagar

Somentor:

prof. dr. Mitja Brilly

Član komisije:

izr. prof. dr. Jože Panjan

Ljubljana, 23. 05. 2014

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **Tina Kofol** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:
»**Modeliranje taljenja snežne odeje s programoma HEC-HMS in SRM**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, _____ 2014

(Podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 004:551.57:556.12(043.2)
Avtor: Tina Kofol
Mentor: Doc. dr. Mojca Šraj
Somentor: Prof. dr. Mitja Brilly
Naslov: Modeliranje taljenja snežne odeje s programoma HEC-HMS in SRM
Tip dokumenta: Diplomaska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema: 107 str., 26 pregl., 59 sl., 47 en.
Ključne besede: taljenje snežne odeje, metoda energijske bilance, metoda temperaturnega indeksa, porečje Sava-Kranjska Gora, HEC-HMS, SRM

Izvleček

Sneg je v hidrološkem krogu zelo pomemben dejavnik, saj se v njem zadržuje velik del vode. Hitro taljenje snežne odeje lahko povzroči poplave, pomanjkanje snega v nekaterih porečjih pa lahko vodi v poletne suše. V diplomski nalogi smo primerjali programa HEC-HMS (verzija 3.5) in SRM (verzija 1.12), s pomočjo katerih smo modelirali odtok zaradi taljenja snežne odeje s porečja Sava-Kranjska Gora. V prvem delu naloge je opisana energijska bilanca snežne odeje, fizikalni procesi, ki so vključeni v nalaganju, preobrazbi in taljenju snega ter osnovne enačbe, ki te procese opisujejo. Na nastanek snežnih padavin vplivajo razmere v oblakih, na porazdelitev in višino snežne odeje pa dejavniki kot so: veter, vegetacija, temperatura zraka, sončno sevanje, padavine in kondukcija toplote iz zemljišča. Pri računanju taljenja snega moramo biti pozorni tudi na gostoto, temperaturo in albedo snežne odeje. Za določitev količine staljene vode je ključno poznavanje snežnega vodnega ekvivalenta (SVE), ki nam poda količino vode, ki bi jo dobili, če bi se vzorec snega v celoti stalil. Za napovedovanje pretokov in računanje taljenja snega se uporabljata dva osnovna pristopa: podatkovno obsežnejša metoda energijske bilance in metoda temperaturnega indeksa, ki je preprostejša za uporabo, vendar manj natančna. Oba programa, HEC-HMS in SRM, delujeta na principu temperaturnega indeksa. V nadaljevanju so predstavljene naravno-geografske in hidrološke značilnosti prispevnega območja porečja Sava-Kranjska Gora in priprava potrebnih vhodnih podatkov za oba modela. Modela sta bila umerjena na osnovi izmerjenih padavinskih dogodkov in pretokov dveh mesecev. Sledijo rezultati umerjanja, analiza občutljivosti in primerjava rezultatov obeh modelov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 004:551.57:556.12(043.2)
Author: Tina Kofol
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Šraj, Ph.D.
Co-advisor: Prof. Mitja Brilly, Ph.D.
Title: Snowmelt modeling with HEC-HMS and SRM model
Document type: Graduation Thesis – University studies
Scope and tools: 107 p., 26 tab., 59 fig., 47 eq.
Keywords: snowmelt, energy budget method, temperature index method, Sava-Kranjska Gora river basin, HEC-HMS, SRM

Abstract

Snow is a very important factor in the hydrological cycle, since it retains a large part of water. Rapid snowmelt can cause flooding, while on the other hand, the lack of snow in some river basins can lead to summer draught. Therefore the comparison of two snowmelt models HEC-HMS (version 3.5) and SRM (version 1.12) for the Sava-Kranjska Gora basin has been made in this thesis. In the first part of the thesis we described energy budget of snow cover, physical processes involved in snow accumulation, metamorphosis and melt, and fundamental equations that describe these processes. The formation of snow is affected by the conditions in clouds; the distribution and amount of snow depends on factors such as wind, vegetation, air temperature, solar radiation, precipitation and heat conduction from the ground. Snowmelt, density, temperature and snow albedo have to be considered by computing. For the determination of the melted water knowledge of snow water equivalent (SWE) is required. SWE gives us the amount of water that would be obtained if the sample of snow is fully melted. Basic approaches for streamflow forecasting and computing snowmelt are: extensive data energy budget method and temperature index method which is simpler to use, but less accurate. Both models, HEC-HMS and SRM, calculate snowmelt with the temperature index approach. Further, the physical geographical and hydrological characteristics of the drainage basin of the Sava-Kranjska Gora and preparation of the necessary input data for both models are presented. The models were calibrated based on measured precipitation events and runoff of two months. The thesis also contains the results of the calibration, the sensitivity analysis and the comparison of models.

ZAHVALA

Nekatere stvari v življenju lahko naredimo sami, pri nekaterih potrebujemo pomoč. Zato se ob tej priložnosti za vse nasvete, vodenje in pomoč pri nastanku diplomske naloge iskreno zahvaljujem mentorici doc. dr. Mojci Šraj in somentorju prof. dr. Mitji Brilly.

Zahvaljujem se tudi mag. Andreju Vidmarju za izdelano karto DMV za območje porečja Sava-Kranjska Gora.

Zahvala gre tudi moji družini, ki mi je omogočila študij in mi vsa študijska leta stala ob strani ter verjela vame. Za spodbudne besede in razumevanje se zahvaljujem tudi svojemu fantu.

KAZALO VSEBINE

| | |
|--|------------------------------|
| 1 UVOD | Error! Bookmark not defined. |
| 1.1 Cilji diplomske naloge | 2 |
| 2 SNEŽINKA | 3 |
| 3 SNEG IN SNEŽNA ODEJA | 8 |
| 3.1 Nastanek snežnih padavin | 9 |
| 3.1.1 Dejavniki nastanka snežnih padavin | 10 |
| 3.2 Nastanek snežne odeje | 10 |
| 3.3 Dejavniki, ki vplivajo na višino in porazdelitev snežne odeje | 10 |
| 3.3.1 Veter | 10 |
| 3.3.2 Vegetacija | 11 |
| 3.3.3 Sončno sevanje | 13 |
| 3.3.4 Tekoče padavine in temperatura zraka | 13 |
| 3.3.5 Prevajanje toplote – kondukcija | 15 |
| 3.4 Merjenje snežne odeje | 15 |
| 4 FIZIKALNE LASTNOSTI SNEŽNE ODEJE | 17 |
| 4.1 Debelina in višina snežne odeje | 17 |
| 4.2 Gostota | 17 |
| 4.3 Snežni vodni ekvivalent | 19 |
| 4.4 Albedo | 20 |
| 4.5 Temperatura | 21 |
| 5 VODA V SNEŽNI ODEJI | 23 |
| 5.1 Prehajanje vode skozi snežno odejo | 23 |
| 5.2 Odtok vode pod snežno odejo | 24 |
| 5.3 Površinski odtok | 25 |
| 6 MODELIRANJE TALJENJA SNEŽNE ODEJE | 27 |
| 6.1 Energijska – toplotna bilanca v snežni odeji | 27 |
| 6.1.1 Izmenjava energije preko sevanja | 29 |

| | | |
|---------|---|----|
| 6.1.2 | Turbulentni prenos energije..... | 30 |
| 6.1.3 | Kondukcija toplote iz zemljine | 31 |
| 6.1.4 | Toplota, ki jo prinašajo padavine..... | 32 |
| 6.1.5 | Toplotne spremembe znotraj snežne odeje | 32 |
| 6.2 | Določanje sproščanja vode pri taljenju snega | 34 |
| 6.2.1 | Računanje s pomočjo energijske bilance | 35 |
| 6.2.1.1 | Posplošene enačbe v primeru dežja..... | 38 |
| 6.2.1.2 | Posplošene enačbe v primeru, ko ni dežja | 39 |
| 6.2.1.3 | Primeri izračuna taljenja snega za predpostavljene vremenske pogoje v obdobju z in brez padavin | 43 |
| 6.2.2 | Računanje s pomočjo temperaturnega indeksa | 45 |
| 6.2.3 | Primerjava osnovnih metod za računanje taljenja snežne odeje..... | 46 |
| 6.3 | Program HEC-HMS..... | 48 |
| 6.3.1 | Vhodni podatki za metodo temperaturnega indeksa..... | 48 |
| 6.4 | Program SRM..... | 53 |
| 6.4.1 | Struktura modela | 54 |
| 6.4.2 | Vhodni podatki za program SRM | 56 |
| 6.4.2.1 | Značilnosti porečja | 56 |
| 6.4.2.2 | Spremenljivke..... | 57 |
| 6.4.2.3 | Parametri | 60 |
| 6.4.3 | Ocena natančnosti modela..... | 66 |
| 7 | NARAVNO-GEOGRAFSKE ZNAČILNOSTI POREČJA SAVA-KRANJSKA GORA | 68 |
| 7.1 | Geografske značilnosti | 68 |
| 7.2 | Geološka zgradba in geomorfologija..... | 69 |
| 7.3 | Pedologija | 70 |
| 7.4 | Pokrovnost tal | 72 |
| 7.5 | Določitev odtočnega potenciala..... | 73 |
| 8 | HIDROLOŠKA SLIKA POREČJA..... | 76 |
| 8.1 | Podnebje in padavine..... | 76 |

| | |
|--|------------|
| 8.2 Hidrografija | 77 |
| 8.3 Hidrografske lastnosti porečja | 79 |
| 9 MODELIRANJE TALJENJA SNEŽNE ODEJE S PROGRAMOM HEC-HMS | 81 |
| 9.1 Padavine in pretoki..... | 81 |
| 9.2 Temperatura zraka in višina snežne odeje | 82 |
| 9.3 Padavinske izgube | 83 |
| 9.4 Transformacija padavin v odtok..... | 84 |
| 9.5 Umerjanje in verifikacija modela v obdobju brez snega..... | 85 |
| 9.5.1 Umerjanje modela za padavinsko situacijo od 6. 8. do 22. 9. 2008..... | 86 |
| 9.5.2 Verifikacija modela za padavinsko situacijo od 10. 8. do 24. 9. 2010 | 86 |
| 9.5.3. Verifikacija modela za padavinsko situacijo od 13. 9. do 11. 10. 2007 | 87 |
| 9.5.4 Verifikacija modela za padavinsko situacijo od 13. 8. do 8. 9. 2003 | 87 |
| 9.6 Umerjanje modela v obdobju taljenja snega | 88 |
| 9.7 Analiza rezultatov | 90 |
| 9.7.1 Analiza rezultatov za obdobje brez snega..... | 90 |
| 9.7.2 Analiza rezultatov za obdobje taljenja snežne odeje..... | 92 |
| 10 MODELIRANJE TALJENJA SNEŽNE ODEJE S PROGRAMOM SRM | 93 |
| 10. 1 Umerjanje in rezultati modela SRM | 93 |
| 10.2 Analiza rezultatov | 94 |
| 11 PRIMERJAVA PROGRAMOV HEC-HMS IN SRM | 96 |
| 12 ZAKLJUČKI | 99 |
| VIRI..... | 101 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|---|----|
| Preglednica 1: Odstotni delež možnosti nastanka snega pri različnih temperaturah (Šegula, 1986: str. 17). | 10 |
| Preglednica 2: Relativna akumulacija snega na različnih tipih pokrajine (UCAR, 2007). | 12 |
| Preglednica 3: Vsebnost tekoče vode v različnih vrstah snega (USACE, 2011). | 20 |
| Preglednica 4: Primerjava albeda različnih površin (Šegula, 1986: str. 28). | 20 |
| Preglednica 5: Relativna pomembnost energijskih (toplotnih) vložkov v snežni odeji (USDA, 2004). | 33 |
| Preglednica 6: Klasifikacija gozdnatosti (USACE, 1998). | 38 |
| Preglednica 7: Količina staljenega snega na podlagi določljivih meteoroloških spremenljivk (USACE, 1998). | 44 |
| Preglednica 8: Koeficient stopnje taljenja, glede na različne pogoje (USACE, 1998). | 45 |
| Preglednica 9: Koeficient stopnje taljenja na gozdnatih in odprtih površinah ob deževnem vremenu (Singh in Singh, 2001: str. 259). | 46 |
| Preglednica 10: Primerjava metode temperaturnega indeksa in metode energijske bilance (Glacier meteorology, 2010). | 47 |
| Preglednica 11: Vhodni parametri metode temperaturnega indeksa v meteorološkem modelu, ki so za vsa obravnavana podpovodja enaki. | 49 |
| Preglednica 12: Vhodni parametri metode temperaturnega indeksa v meteorološkem modelu, določeni za vsak višinski pas. | 52 |
| Preglednica 13: Čas zakasnitve, glede na velikost porečja. | 66 |
| Preglednica 14: Opis avtomorfnih tal (Sovre, 2009, str. 36). | 71 |
| Preglednica 15: Deleži posamezne pokrovnosti tal na porečju Sava-Kranjska Gora. | 73 |
| Preglednica 16: Hidravlična prevodnost tal (Sovre, 2009, str. 41). | 74 |
| Preglednica 17: Koeficienti <i>CN</i> za izbrane rabe tal (Brilly in Šraj, 2006, str. 109, 110 in 111). | 74 |
| Preglednica 18: Dnevne vrednosti padavin na meteorološki postaji Rateče-Planica za mesec marec 2009 (ARSO, 2014). | 81 |
| Preglednica 19: Dnevne vrednosti padavin na meteorološki postaji Rateče-Planica za mesec april 2009 (ARSO, 2014). | 82 |
| Preglednica 20: Dnevne vrednosti povprečnih temperatur in višin snežne odeje na meteorološki postaji Rateče-Planica za mesec marec 2009 (ARSO, 2014). | 82 |
| Preglednica 21: Dnevne vrednosti povprečnih temperatur in višin snežne odeje na meteorološki postaji Rateče-Planica za mesec april 2009 (ARSO, 2014). | 83 |
| Preglednica 22: Izbrani koeficienti <i>CN</i> za različne tipe pokrovnosti tal, ki se nahajajo na porečju Sava-Kranjska Gora ter odtočni potencial zemljine. | 83 |

| | |
|--|----|
| Preglednica 23: Vhodni podatki za izbrane višinske pasove v programu HEC-HMS. | 88 |
| Preglednica 24: RMSE za primer umerjanja in verifikacij modela s programom HEC-HMS.. | 91 |
| Preglednica 25: Vneseni vhodni parametri v modelu SRM..... | 93 |
| Preglednica 26: Primerjava programov HEC-HMS in SRM. | 96 |

KAZALO SLIK

| | |
|--|----|
| Slika 1: Wilson A. Bentley pri delu (The Snowflake Man, 2012) | 3 |
| Slika 2: Kompozit različnih slik snežink K. G. Libbrechta (Podgornik, 2010: str. 133)..... | 4 |
| Slika 3: Osnovne oblike snežnih kristalov in njihove oznake (Rakovec in Vrhovec, 2000: str. 184) | 5 |
| Slika 4: Nakayin fazni diagram snežink (Nakaya diagram, 2010) | 6 |
| Slika 5: Snežna odeja ob vodotoku (Wallpaper, 2013)..... | 8 |
| Slika 6: Vpliv gozda na veter in sneg (UCAR, 2011) | 11 |
| Slika 7: Primerjava kopičenja snega v gozdu in na jasi (UCAR, 2011) | 11 |
| Slika 8: Kopičenje snega na iglavcih in listavcih (UCAR, 2011)..... | 12 |
| Slika 9: Vpliv snežne odeje na segrevanje površja (Effect of solar radiation on snow cover, 2013) | 13 |
| Slika 10: Vpliv toplega dežja na snežno odejo (UCAR, 2007) | 14 |
| Slika 11: Vpliv hladnega dežja na snežno odejo (UCAR, 2007) | 15 |
| Slika 12: Višina in debelina snežne odeje (Šegula, 1986: str. 70) | 17 |
| Slika 13: Značilnosti kristalov novozapadlega in uležanega (napihanega) snega (UCAR, 2011) | 18 |
| Slika 14: Razlika med novozapadlim in uležanim (napihanim) snegom pod mikroskopom (UCAR, 2011) | 18 |
| Slika 15: Primer donosa vode iz dane količine snega (UCAR, 2011) | 19 |
| Slika 16: Albedo v različnih sezonah v odvisnosti od časa, ko so nastopile zadnje snežne padavine (UCAR, 2007)..... | 21 |
| Slika 17: Temperaturni profil snežne odeje (UCAR, 2011) | 22 |
| Slika 18: Prehajanje vode skozi snežno odejo (UCAR, 2007) | 23 |
| Slika 19: Pot pronicanja vode skozi snežno odejo (UCAR, 2007) | 24 |
| Slika 20: Debelitev plasti baznega odtoka (UCAR, 2007)..... | 25 |
| Slika 21: Površinski odtok (UCAR, 2010)..... | 25 |
| Slika 22: Shematični prikaz procesa taljenja snežne odeje (Price in sod.,1979, cit. po USACE, 1998) | 28 |
| Slika 23: Nomogram za oceno insolacije kot funkcija zemljepisne širine, datuma in trajanja sončnega obsevanje (USACE, 1998)..... | 41 |
| Slika 24: Krivulja srednjega prenosa za dnevno insolacijo, izražena glede na gostoto gozda (USACE, 1998)..... | 43 |
| Slika 25: Primerjava modela temperaturnega indeksa in modela energijske bilance (Glacier meteorology, 2010)..... | 47 |

| | |
|--|----|
| Slika 26: Vhodni parametri metode temperaturnega indeksa v meteorološkem modelu programa HEC-HMS | 49 |
| Slika 27: Vhodni parametri metode temperaturnega indeksa v meteorološkem modelu, ki jih določimo za vsako podpovodje | 51 |
| Slika 28: Vhodni parametri najnižjega višinskega pasu | 52 |
| Slika 29: Glavno okno modela SRM..... | 57 |
| Slika 30: Primer krivulj praznjenja snežne pokrovnosti povodja Felsberg za 5 višinskih con, narejenega na podlagi satelitskih posnetkov Landsata 5-MSS (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 28)..... | 59 |
| Slika 31: Okno modela SRM za vnos spremenljivk posamezne višinske cone | 59 |
| Slika 32: Povprečni koeficient odtoka za sneg alpskega povodja Dischma (43,3 km ² , 1668–3146 m.n.v.) in Durance (2170 km ² , 786–4105 m.n.v.) (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 31) | 60 |
| Slika 33: Povprečni koeficient odtoka za dež alpskega povodja Dischma (43,3 km ² , 1668–3146 m.n.v.) in Durance (2170 km ² , 786–4105 m.n.v.) (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 31) | 61 |
| Slika 34: Povprečna vrednost faktorja stopinja/dan v porečju Dischma (43,3 km ² , 1668–3146 m.n.v.), Durance (2170 km ² , 786–4105 m.n.v.) in Dinwoody (228 km ² , 1981–4202 m.n.v.) (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 32)..... | 62 |
| Slika 35: Grafični prikaz pretoka upadanja Q_n v primerjavi s Q_{n+1} za porečje Dischma v Švici (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 35)..... | 64 |
| Slika 36: Hidrografi taljenja snega, ki ponazarjajo pretvorbo vrednosti izračunanega odtoka za obdobje 24 ur v zapis dnevni obdobj (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 40)..... | 65 |
| Slika 37: Okno modela SRM za vnos parametrov posamezne višinske cone..... | 66 |
| Slika 38: Ortofoto posnetek in lokacija obravnavanega porečja (Atlas okolja, 2013) | 68 |
| Slika 39: Prikaz nadmorskih višin porečja Sava-Kranjska Gora (Vidmar, 2013) | 68 |
| Slika 40: Nadiža, prvi izvir reke Save (Občinski praznik Tamar, 2009)..... | 69 |
| Slika 41: Geološka karta porečja (Geopedija, 2013) | 70 |
| Slika 42: Pedološka karta porečja (Geopedija, 2013)..... | 71 |
| Slika 43: Pokrovnost tal porečja (Atlas okolja, 2013)..... | 73 |
| Slika 44: Meteorološka postaja Rateče (Pavšek, 2008)..... | 77 |
| Slika 45: Naravni rezervat Zelenci, stalni izvir reke Save (Wikipedija, 2013) | 78 |
| Slika 46: Hidrografija in prispevno območje porečja (Atlas okolja, 2013)..... | 78 |
| Slika 47: Lokacija merilnega mesta na reki Sava Dolinka (ARSO, 2012) | 79 |
| Slika 48: Vodomerne postaja Kranjska Gora, opremljena z vodomerno letvijo (ARSO, 2012) | 79 |

| | |
|---|----|
| Slika 49: Pregledna karta porečja (Atlas okolja, 2013) | 80 |
| Slika 50: Histogram dnevni vrednosti padavin na meteorološki postaji Rateče-Planica za mesec marec (ARSO, 2014) | 81 |
| Slika 51: Histogram dnevni vrednosti padavin na meteorološki postaji Rateče-Planica za mesec april (ARSO, 2014) | 82 |
| Slika 52: Histogram padavin in hidrogram odtoka za obdobje od 6. 8. do 22. 9. 2008..... | 86 |
| Slika 53: Histogram padavin in hidrogram odtoka za obdobje od 10. 8. do 24. 9. 2010..... | 86 |
| Slika 54: Histogram padavin in hidrogram odtoka in za obdobje od 13. 9. do 11. 10. 2007.. | 87 |
| Slika 55: Histogram padavin in hidrogram odtoka in za obdobje od 13. 8. do 8. 9. 2003..... | 87 |
| Slika 56: Višinski pasovi porečja Sava-Kranjska Gora (Vidmar, 2013) | 89 |
| Slika 57: Rezultat umerjenega hidrološkega modela s programom HEC-HMS za obdobje od 1. 3. do 30. 4 2009 | 90 |
| Slika 58: Rezultat umerjenega hidrološkega modela s programom SRM za obdobje od 1. 3. do 30. 4 2009..... | 94 |
| Slika 59: Statistični rezultat simulacije..... | 94 |

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Albedo – *sin.* odbojnost je razmerje med odbitim in vpadnim sevanjem, navadno izraženo v odstotkih (Mikoš in sod., 2002).

Bazni odtok – *sin.* sušni odtok je del pretoka vode, ki doteka v strugo v daljših obdobjih brez padavin ali brez taljenja snežne odeje, torej predvsem posledica izcejanja podzemnih voda ali tudi iztoka iz jezer ali taljenja ledenikov (Mikoš in sod., 2002).

Emisivnost – je merljiv podatek, ki nam pove, kako močno lahko določeno telo seva toplotno energijo (popolno črno telo ima emisivnost 1).

Evaporacija – *sin.* izhlapevanje je (1) izločanje vodne pare s proste gladine vode pri temperaturah pod vreliščem (2) izhlapevanje vode s površine golih tal (3) količina izhlapele vode (Mikoš in sod., 2002).

Hietograf – je diagram, ki kaže intenzivnost padavin v času (Mikoš in sod., 2002).

Hipsometrična črta – *sin.* hipsogeografska črta je krivulja, ki kaže, kolikšen delež območja porečja leži nad določeno nadmorsko višino (Mikoš in sod., 2002).

Indeksna metoda – je tehnika za izračun stopnje donosa, ki se nanaša na začetne in končne vrednosti.

Insolacija – *sin.* sončno obsevanje oziroma sončni obsev je količina direktnega sončnega obsevanja, ki pade na enoto vodoravne površine (Mikoš in sod., 2002).

Koalescenca – pomeni zlivanje kapljic.

Kondenzacija – *sin.* utekočinjenje je prehod iz plinastega v tekoče stanje (Mikoš in sod., 2002).

Konvekcija – je vertikalni prenos energije z mešanjem snovi.

Kondukcija – je prenos energije znotraj snovi, brez mešanja.

Krivulja praznjenja – *sin.* krivulja izčrpavanja je krivulja, ki kaže znižanje odtoka ali pretoka zaradi izčrpavanja oz. znižanje površine prekrite s snežno odejo zaradi taljenja (Mikoš in sod., 2002).

Latentna toplota – je energija, ki jo telo dobiva ali oddaja pri prehajanju iz enega agregatnega stanja v drugo, ne da bi se mu pri tem spremenila temperatura.

Snegomerna črta – je stalno označena črta na odprtem, vzdolž katere jemljemo vzorce snega ali merimo debelino snežne odeje na določenih razdaljah in ob predvidenem času (Mikoš in sod., 2002).

Snežni vodni ekvivalent – je višina sloja vode, ki bi ga dobili, če bi se snežna odeja stalila (Mikoš in sod., 2002).

Stopinja/dan – je v Celzijevih stopinjah izražena algebrska razlika med povprečno temperaturo dneva in referenčno temperaturo (navadno 0° C); mesečna, letna stopinja/dan je algebrska vsota stopinj/dni posameznih dni tega obdobja (Mikoš in sod., 2002).

Sublimacija – je neposreden prehod iz trdnega v plinasto stanje ali obratno (Mikoš in sod., 2002).

Temperatura rosišča – *sin.* rosišče je temperatura, do katere bi se moral ohladiti vlažen zrak pri konstantnem tlaku in konstantni vsebnosti vodne pare, da bi dosegel zasičenost (Mikoš in sod., 2002).

Temperaturni gradient – je znižanje temperature zraka v Celzijevih stopinjah za 100 m povečanja nadmorske višine (Mikoš in sod., 2002).

Transpiracija – *sin.* rastlinsko izhlapevanje je proces, pri katerem prehaja voda iz vegetacije v ozračje kot vodna para (Mikoš in sod., 2002).

Vpadni kot – je kot med vpadnim žarkom in vpadno pravokotnico.

Zaznavna toplota – je toplota, ki se porablja oziroma sprošča pri temperaturnih spremembah.

1 UVOD

Voda, ki v naravi neprestano kroži, je osnovni vir življenja organizmov. Ker je pitne vode zaradi onesnaženja in hitro rastoče populacije vse manj, je njeno racionalno in preiščeno izkoriščanje še kako pomembno. Velik del pitne vode, ki kroži v hidrološkem krogu, je shranjen tudi v obliki snežne odeje. Sneg ostane na terenu, dokler se ne stali ali sublimira. Spomladi je taljenje snega pomemben vir vodnih zalog na območjih zmernih zemljepisnih širin v gorskem svetu, še posebej tistih z dolgotrajnim suhim poletjem. V takih krajih je vodni ekvivalent velikega pomena za napovedovanje spomladanskega odtoka, vodnih zalog za mesta dolvodno in analize projektiranja poplav.

V nekaterih povodjih je velik del vodnih zalog posledica snega, ki se nabira v povodju in predstavlja naravni rezervoar za shranjevanje vode. Napovedi vodnih zalog so zelo pomembne za kmete in ustanove povezane z nadzorom proizvodnje električne energije, oskrbe z vodo in poplavami. Zanesljive napovedi sezonskega odtoka zaradi taljenja snega so običajno možne po več letih opazovanj. Te napovedi temeljijo na korelacijah med izmerjenim snežnim vodnim ekvivalentom in pretoki, merjenimi na vodomernih postajah (WMO, 1994).

V diplomski nalogi je uvodoma opisan nastanek snežne odeje in s tem v povezavi dejavniki, ki vplivajo na višino in porazdelitev snežne odeje. V nadaljevanju je razložen nastanek snežink in njihova klasifikacija ter fizikalne lastnosti snežne odeje. Snežni vodni ekvivalent nam poda količino vode, ki bi jo dobili, če bi se vzorec snega v celoti stalil in je najpomembnejši podatek o tem, kako bo taljenje snežne odeje vplivalo na površinski odtok. Za razumevanje procesov, ki potekajo v snežni odeji je potrebno poznati energijsko – toplotno bilanco snežne odeje, ki opisuje zalogo razpoložljive energije za taljenje snežne odeje. Sledi opis in primerjava dveh osnovnih pristopov, ki se uporabljata za modeliranje taljenja snega. Najbolj razširjena je metoda, pri kateri merimo ali ocenimo vsako spremenljivko v enačbi energijske bilance, s pomočjo katere lahko izračunamo višino snežnega vodnega ekvivalenta. Druga možnost, s pomočjo temperaturnega indeksa, se opira zgolj na temperaturo zraka in je zaradi tega za uporabo bolj preprosta. V sklopu teh dveh metod so razložene tudi posplošene enačbe, ki se uporabljajo za izračun taljenja snežne odeje.

1.1 Cilji diplomske naloge

Namen naloge je primerjava in ovrednotenje rezultatov dveh računalniških hidroloških modelov, ki opisujeta količinski odnos med padavinami in odtokom ter omogočata oceno padavinskega odtoka s povodij in napovedovanje morebitnih poplav. Oba modela, HEC-HMS 3.5 (angl. *Hydrologic Modeling System*) in WinSRM 1.12 (angl. *Snowmelt Runoff Model*), računata taljenje snežne odeje na principu temperaturnega indeksa. Za potrebe izračunov je potrebno določiti naravno-geografske, fizikalne, hidrološke in meteorološke lastnosti obravnavanega porečja Sava-Kranjska Gora, ki so ključnega pomena pri izbiri in določevanju natančnih vhodnih podatkov modelov. Na podlagi razpoložljivih hidroloških podatkov bomo v nalogi primerjali posamezne vhodne parametre obeh modelov in razložili, kako vplivajo na končne rezultate.

2 SNEŽINKA

Čarobnosti snežnih kristalov je v preteklosti posvetilo veliko pozornosti kar nekaj znanih fizikov. Podgornik (2010) je zapisal, da je leta 1591 Thomas Harriot, angleški matematik, prvi opazil, čeprav ne tudi objavil, da imajo snežinke šest števno simetrijo (menda so to Kitajci vedeli že 2000 let prej). Z njim si je leta 1606 začel dopisovati Johannes Kepler, ki je leta 1611 objavil kratek spis O šesterokotni snežinki, ki je morda celo prvo znanstveno delo povezano s snežnimi kristali. Spisek imen, ki so jih pritegnili snežni kristali, se nato nadaljuje z imenoma Rene Descartes (okoli leta 1635) in Robert Hook. Slednji je leta 1665 napisal knjigo Mikrografija (angl. *Micrographia*), ki vsebuje množico opisov in slik snežnih kristalov, ki prvič v zgodovini nazorno prikazujejo mikroskopsko strukturo snežink. Najbolj poznane fotografije snežnih kristalov je posnel Wilson A. Bentley (1865–1931), kmet iz Vermonta, ZDA (slika 1). Že kot najstnik je Bentley med prvimi uporabil nov izum – fotografijo s preprostim mikroskopom ter ovekovečil snežne kristale na fotografijah. Od 5000 snežnih kristalov kolikor jih je posnel, je s pomočjo W. J. Humphreysa okoli 2500 teh slik leta 1931 objavil v knjigi Snežni kristali (angl. *Snow Crystals*), ki se tiska še danes.























Slika 1: Wilson A. Bentley pri delu (The Snowflake Man, 2012)

Najlepše primere fotografij snežink po Bentleyu predstavlja delo fizika Kennetha G. Libbrechta. Leta 2006 je izumil posebno tehniko, s katero je lahko fotografiral snežinke pri kontroliranih zunanjih pogojih. Ena izmed fotografij (slika 2) prikazuje različne oblike snežink, ki nastanejo pri različnih zunanjih pogojih: temperaturi, vlažnosti, hitrosti padanja skozi atmosfero itd. Očitno so le nekatere oblike šesterokotne in na sliki so zelo lepo razvidne snežinke paličaste oblike in tiste z dvanajst števno simetrijo (Podgornik, 2010).



Slika 2: Kompozit različnih slik snežink K. G. Libbrechta (Podgornik, 2010: str. 133)

Ob teh različnih oblikah se postavlja vprašanje, kako bi lahko snežinke razvrstili po podobnosti njihovih oblik in seveda pri tem upali, da so različne oblike povezane z različnimi parametri ozračja pri njihovem nastajanju. Japonski glaciolog Ukichiro Nakaya je predlagal prvi sistem klasifikacije snežink, ki obravnava 41 različnih morfoloških tipov snežink. Leta 1951 je Mednarodna komisija za sneg in led predlagala precej preprost sistem klasifikacije snežink, ki je v rabi še danes. V tem sistemu (slika 3) imamo sedem glavnih oblik snežnih kristalov: ploščice, zvezdice, stebričke, iglice, prostorske dendrite, zaobljene stebričke in neurejene oblike. K tem so dodane še tri zvrsti zamrznjenih padavin: babje pšeno (sodra), zmrznjen dež in toča. Mednarodni sistem klasifikacije sta leta 1966 dopolnila ameriška meteorologa C. Magono in C. W. Lee in sloni na 80 različnih morfoloških tipih snežink (Podgornik, 2010).

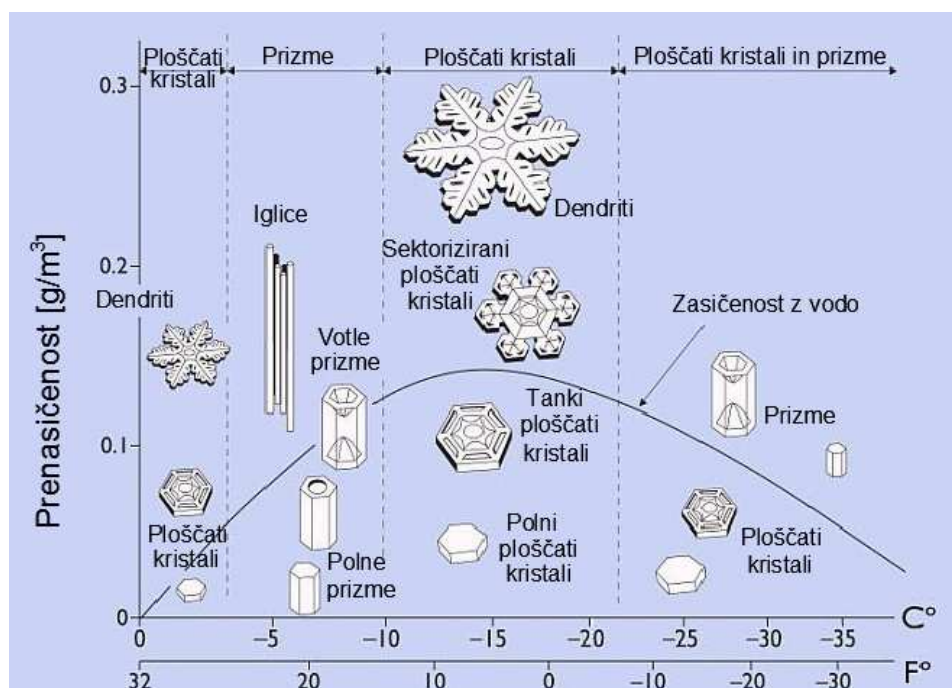
| | | |
|------------------------|---|--|
| Ploščica |  |  |
| Zvezdica |  |  |
| Stebriček |  |  |
| Igla |  |  |
| Prostorski kristal |  |  |
| Stebriček s ploščicama |  |  |
| Npravilni kristal |  |  |
| Babje pšeno |  |  |
| Zmrznjen dež |  |  |
| Toča |  |  |

Slika 3: Osnovne oblike snežnih kristalov in njihove oznake (Rakovec in Vrhovec, 2000: str. 184)

Snežinke nastajajo v oblakih s kondenzacijo vodne pare v ledene kristalčke pri temperaturah močno pod ničlo. Snežinka svojo rast začne s tem, da se na nukleacijskem jedru (npr. prašni delci) izločijo prve molekule vode v nastajajočem kristalu ledu. Ta doraste do pravilne šesterokotne prizme velike nekaj mikrometrov (Podgornik, 2010).

Oblike snežink so zelo raznovrstne – pravzaprav ne obstaja niti ena snežinka, ki bi bila popolnoma enaka drugi! Do te neverjetne raznolikosti pride zato, ker posamezne ploskve prizme rastejo različno. Rast ploskev je odvisna od načina, na katerega se molekule vodne pare vgrajujejo v razvijajoči se kristal ledu. Ta nato raste naprej v skladu s tem, kakšni sta temperatura in vlažnost (prenasičenost) zraka v njegovi neposredni okolici. Nižja kot je temperatura in višja kot je vlažnost (zasičenost), bolj kompleksna je struktura snežinke. Nastajajoča snežinka se spreminja, ko le to veter odnaša po oblaku. Če na primer snežinko odnese v zračni žep z nekaj nižjo temperaturo, lahko na koncu dendritov zrastejo majhne ploščice, če pa zaide v območje večje nasičenosti, lahko nastanejo novi dendritasti izrastki. Pomembno pri tem je, da je snežni kristal sorazmerno majhen, tako da so atmosferske razmere na vseh šestih straneh skoraj povsem enake, zato tudi vse stranice rastejo enako. Zaradi tega se ohrani začetna šesterokotna simetrija z molekularnega nivoja (Podgornik, 2010).

Kenneth G. Libbrecht je leta 2003 predlagal fazni diagram snežink, ki ga je leta 2005 na podlagi opazovanja nastajanja različnih snežnih kristalov pri različnih in točno določenih pogojih, ki jih je sam določeval v laboratoriju, izpopolnil Nakaya (slika 4). Diagram prikazuje, kako so različne oblike snežink odvisne od zunanjih pogojev, pri katerih nastajajo. Podaja morfologijo snežinke, torej njeno tipično obliko, kot funkcijo temperature v atmosferi in njene nasičenosti z vlago. Vodoravna os predstavlja temperaturo v oblaku, kjer se tvorijo snežinke, navpična pa podaja prenasičenost zraka z vlago (gramov vodne pare na kubični meter zraka). Tako v okolici ledišča prevladujejo tanke ploščice različnih oblik. Pri temperaturah med -3 °C in -10 °C imamo stebri časte snežinke, nato med -10 °C in -22 °C zopet ve čje ploščice in pri še nižjih temperaturah dobimo mešanico ploščic in stebričkov (Podgornik, 2010). Pri temperaturi zraka, ki je višja od -10 °C , se ti kristali navadno spajajo v obliki kosmov. Torej čim nižja je temperatura, tem manjše so snežinke.



Slika 4: Nakayin fazni diagram snežink (Nakaya diagram, 2010)

Krivulja zasičenosti z vodo predstavlja točke, kjer je atmosfera nasičena z vodno paro glede na tekočo vodo. Nad to krivuljo je zrak prenasičen glede na tekočo vodo (in v vsakem primeru, glede na led). Pod krivuljo je zrak nenasičen glede na tekočo vodo, vendar še vedno prenasičen glede na led, ker je pritisk vodne pare še vedno višji od ravnovesnega pritiska vodne pare ledu (Podgornik, 2010).

Pri nizki prenasičenosti se lahko izoblikujejo majhni, trdni, ploščati kristali pri vseh temperaturah. Polne prizme se izoblikujejo blizu -7 °C . Kristalne oblike ostanejo dokaj

preproste dokler prenasičenost ne sega nad krivuljo zasičenosti z vodo. Nad krivuljo nastanejo ledene iglice in vse vrste zapletenih razvejanih kristalov. Največji razvejani kristali (dendriti) nastanejo pri visoki prenasičenosti in temperaturah blizu $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Schlatter, 2010).

Zakaj se oblike snežnih kristalov s temperaturo toliko spreminjajo, še vedno ostaja znanstvena uganka, ki ni popolnoma razvozlana. Rast je odvisna od točno določenega vključevanja molekul vodne pare v vse večje ledene kristale. Ta proces rasti je zapleten in za enkrat slabo razumljiv ter še vedno predmet znanstvenih raziskav (Libbrecht, 1999).

3 SNEG IN SNEŽNA ODEJA

Sneg so padajoči ali že odloženi delci ledu iz ozračja, ki nastanejo pretežno z neposrednim prehodom vodne pare v trdno snov. Pri nas je izraz sneg dokaj širok pojem; pomeni nam lahko kristale ledu v prvinski obliki, že predelana snežna zrna ali pa tudi snežno odejo kot tako (Šegula, 1986). Sneg je padavina v trdni obliki.

Snežna odeja (slika 5) in njeno taljenje, ki se prostorsko in časovno zelo spreminjata, predstavljata v visokogorju v pomladanskih mesecih pomemben del vodnega kroga in imata velik vpliv na napajanje vodonosnikov ter na površinski odtok.



Slika 5: Snežna odeja ob vodotoku (Wallpaper, 2013)

Zakaj je sneg bel?

Snežinke niso bele – so prozorne kot steklo ali voda. Če bi posamezno snežinko pogledali pod mikroskopom, bi videli, da je prosojna kot led. Zupan (2001) je razložil, da je sneg videti bel zaradi tega, ker odbije vso svetlobo, ki dospe do njega. Ker je sončna svetloba bela – vsebuje vse dele vidnega spektra – je zato tudi sneg bel. Kompleksna struktura snežnih kristalov namreč pomeni, da je v snegu vse polno drobnih površin, ki so različno orientirane, tako da lahko snežna odeja učinkovito odbija svetlobo v vseh smereh. V večjih globinah ima sneg nekoliko modrikasto barvo. Do tega pride, ker sneg nekoliko bolj absorbira rdeč spekter sončne svetlobe kot modri. V globlje dele snega tako prodre več modre svetlobe.

3.1 Nastanek snežnih padavin

V zmernih geografskih širinah je najpomembnejši proces v oblakih rast ledenih kristalov na račun vodnih kapljic. Sneg nastane v oblakih pri pogojih, ko je zrak zasičen z vodno paro in je njegova temperatura pod 0 °C. Takrat vodna para podhlajenih oblačnih kapljic sublimira na ledene kristale, ki se tvorijo okoli jedra (prašnega delca). Navpično razsežni padavinski oblak vsebuje mešanico vodnih kapljic in ledenih kristalov. Ti oblačni delci nastajajo na nečistočah oziroma aerosolu v zraku (delci prahu, soli itd.). Za nastanek snežnih padavin mora ledeni kristal zrasti do te mere, da postane njegova hitrost padanja večja od hitrosti padanja kapljic. Rasti pa začne, ko se pojavi v področju oblaka s podhlajenimi oblačnimi kapljicami. Tam je okoliški zrak za ledeni kristal prenasičen. S kristala se začne izločati vodna para, sam kristal pa se nekoliko ogreje zaradi sproščanja latentne toplote. Ta toplota odteka v okolico, iz okolice pa na kristal priteka vodna para. Zaradi odlaganja vodne pare na ledeni kristal v okolici parni tlak pade in za kapljice je novi parni tlak nenasičen. Podhlajene kapljice zato izhlapevajo, para pa se na kristalu nalaga v led. Ledeni kristal torej raste na račun izhlapevanja podhlajenih kapljic. Stalno dviganje zračne mase in nastajanje novih oblačnih delcev omogoča nemoteno rast ledenih kristalčkov. Ko ledeni kristali dosežejo zadostno velikost, začno padati proti tlem kot snežinke. Na poti navzdol pobirajo počasnejše oblačne delce in se tako še povečujejo. Če temperatura zraka ne tej poti naraste nad ničlo, se snežinke talijo in sčasoma preobrazijo v dežne kaplje (Rakovec in Vrhovec, 2000).

Drugi način nastajanja padavin, ki sta ga opisala Rakovec in Vrhovec (2000) je koalescenca oziroma zlivanje kapljic. Veliki ledeni kristali padajo hitreje od majhnih, jih dohitevajo in se vanje zaletavajo. Manjši razvejani snežni kristali se zatikajo v izrastke velikih in pri tem nastanejo sneženi kosmi. Ko ledeni kristal pada skozi zrak, napolnjen s podhlajenimi kapljicami, le-te primrzujejo na kristal. Na kristalu se nabira ivje, temperatura kristala pa zaradi zmrzovanja narašča proti ledišču.

Toča in sodra nastaneta na podoben način. Snežinka, ki sestavlja jedro toče ali sodre, na svoji poti po nevihtnem oblaku pobira podhlajene vodne kapljice. Te primrzujejo in tako debelijo zrno sodre ali toče. Če zrno toče po padanju znotraj oblaka znova zaide v vzgornik (navzgor usmerjen tok zraka), se lahko spet dvigne in odebeli na račun podhlajenih kapljic. Zaradi menjajočega se taljenja in zmrzovanja imajo zrna toče čebulno strukturo – število slojev nam pove število ciklov (potovanj navzgor in navzdol) znotraj oblaka. Zrno toče prej ali slej doseže kritično velikost in pade iz oblaka. Odvisno od vremenskih razmer pod oblakom in velikosti zrna se to lahko bolj ali manj stali, preden doseže tla. Kadar so ledena zrna na tleh večja od pol centimetra, govorimo o toči, sicer o sodri (Vertačnik in sod., 2010).

3.1.1 Dejavniki nastanka snežnih padavin

Sneženje nastane pod vplivom:

- meteoroloških pogojev (temperatura, veter, padavinske vode, vrste cirkulacije v atmosferi, frontalnih sprememb in stabilnosti zračnih mas) in
- topografskih lastnosti površine (nadmorska višina, nagib tal, usmerjenost in biosfera) (Brilly in Šraj, 2005).

Vpliv temperature je razviden iz preglednice 1, ki predstavlja odstotni delež možnosti nastanka snega, glede na različne temperature pri tleh.

Preglednica 1: Odstotni delež možnosti nastanka snega pri različnih temperaturah (Šegula, 1986: str. 17).

| Temperatura pri tleh (°C) | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 | +4 |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|
| Sneg (%) | 98 | 93 | 50 | 30 | 8 | 1 |
| Sneg z dežjem (%) | 1 | 4 | 23 | 15 | 7 | 0 |
| Dež (%) | 1 | 3 | 27 | 55 | 85 | 99 |

3.2 Nastanek snežne odeje

Snežna odeja je na tleh odložen in nakopičen sneg, ki je padel kot snežne padavine oziroma ga je nanesele veter, ali pa so ga odložili snežni plazovi (Snežni plazovi, 2012). Snežna odeja se nalaga v plasteh in je lahko sestavljena iz plasti snega, sodre, babjega pšena ali zmrznjenega dežja.

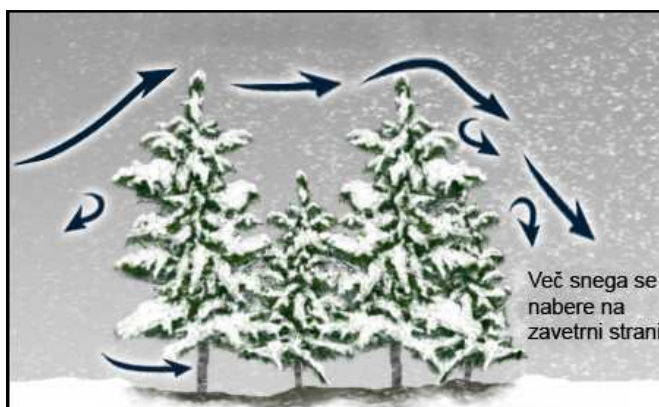
3.3 Dejavniki, ki vplivajo na višino in porazdelitev snežne odeje

Porazdelitev snežnih padavin se na kratkih razdaljah lahko bistveno razlikuje, zlasti v prisotnosti nenadnih sprememb terena ali vegetacije. Razumevanje prostorskih in časovnih razlik v akumulaciji snega je pomembno pri izdelavi hidroloških napovedi taljenja snega, zlasti v regijah, kjer so snežne meritve redke (UCAR, 2011).

3.3.1 Veter

Ob trku s tlemi se krhki izrastki snežnih kristalov odlomijo in zataknejo ob izrastke drugih kristalov. Temu procesu pravimo sprijemanje snega, ki je še posebej izrazito pri močnem

vetru, saj se odlomljeni kristali zlepljajo hitreje (Rakovec in Vrhovec, 2000). Na izpostavljenih legah, kjer so pogosti močni vetrovi (v gorah), se snežne razmere že na zelo majhnih razdaljah močno spremenijo. Nekje je sneg odpihan, drugje nastanejo snežni zameti, kjer se sneg lahko obdrži zelo dolgo. Turbulentni pretok zraka lahko privede do sprememb v nalaganju snega na površini, z razmeroma večjim kopičenjem snega na zavetrnih gozdnih območjih (UCAR, 2011) (slika 6).



Slika 6: Vpliv gozda na veter in sneg (UCAR, 2011)

3.3.2 Vegetacija

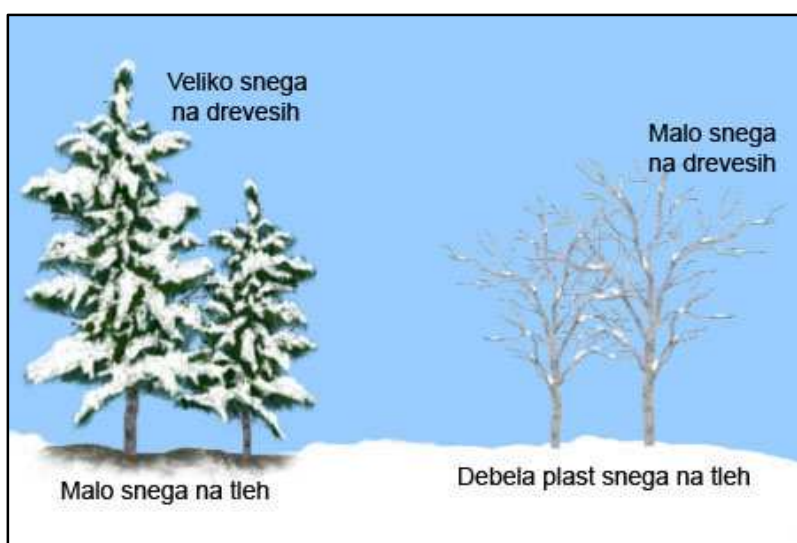
Na drevesih in ostalih rastlinah se lahko nabere veliko prestreženih snežnih padavin, ki se bodisi stalijo in ne dosežejo tal kot sneg, temveč kot voda, bodisi izhlapijo ali sublimirajo s površine rastlin. Prestrežene snežne padavine lahko prenaša tudi veter, ki jih prerazporedi po pokrajini (DeWalle in Rango, 2008). Torej več kot je prestreženih snežnih padavin, manjša bo debeline snežne odeje.

Prestrežanje snega zaradi dreves in posledična sublimacija sta glavna dejavnika, ki prispevata k razliki v akumulaciji med čistimi in gosto poraščenimi območji, nista pa edina. Jase v gozdu imajo lahko 20–45 % več nakopičenega snega, kot pa površine prekrte z gozdom (UCAR, 2011) (slika 7).



Slika 7: Primerjava kopičenja snega v gozdu in na jasi (UCAR, 2011)

Količina nakopičenega snega v krošnjah, je neposredno povezana z vrstami dreves. Iglavci so relativno učinkoviti prestrezniki snega. Listavci, ki so večino zasnežene sezone brez listov, pa ne (slika 8). Snežne izgube zaradi sublimacije v iglastih drevesnih krošnjah so v nekaterih regijah zelo velike – do približno 40 % celotne količine zapadlega snega (UCAR, 2011). Vendar pa se lahko povečana sublimacija iz snega v krošnjah iglavcev nadomestiti s senčenjem, ki ga ustvarjajo drevesa. Študija na Aljaski je pokazala, da vegetacija na terenu zmanjšuje sublimacijo za približno 60 % (UCAR, 2011). Taljenje in izhlapevanje snega v krošnjah je večje kot pri tleh, saj je sneg v krošnjah bolj izpostavljen vetru in sončni toploti, kot sneg, ki leži na tleh.



Slika 8: Količina nakopičenega snega na iglavcih in listavcih (UCAR, 2011)

Višina snega v odprtem okolju se spreminja tudi glede na podlago na kateri se sneg nabira. V preglednici 2 so podane primerjalne vrednosti akumulacije snega za različne tipe pokrajine glede na neobdelano, ravno pokrajino. Na primer na območju, ki ga prekriva gozd in se veter umiri imamo počasnejše kopičenje snega in bi se lahko nabralo do 2,4 krat več snega, kot na neobdelani, ravni pokrajini.

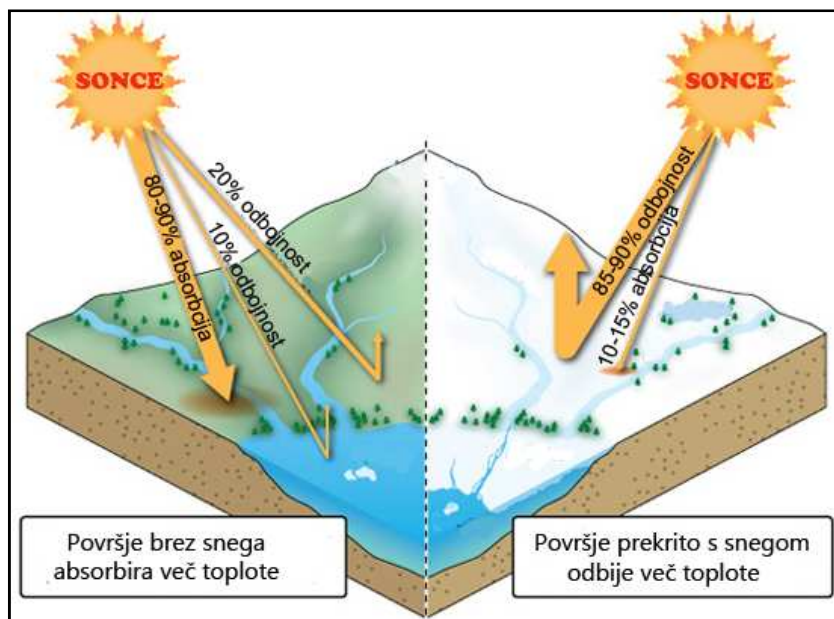
Preglednica 2: Relativna akumulacija snega na različnih tipih pokrajine (UCAR, 2007).

| Tip pokrajine | Relativna akumulacija snega |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Neobdelana, ravna pokrajina | 1,0 |
| Gozd | 2,4 |
| Pašnik | 0,6 |
| Jarek | 2,0–2,15 |
| Greben, vrh hriba | 0,4–0,75 |
| Strmo pobočje | 2,85–4,2 |

3.3.3 Sončno sevanje

Zaradi sončnega sevanja se površina snežne odeje čez dan nekoliko stali, posledično na njej nastane kašasta mešanica ledenih zrn in vode. Zjutraj je sneg trd in poledenel, čez dan pa se ob ponovnem sončnem vremenu površina ponovno stali. Torej več kot je sončnih dni, hitreje se tali snežna odeja.

Kot je prikazano na sliki 9, ima sonce na površju Zemlje ob prisotnosti snežne odeje drugačen vpliv na segrevanje površja, kot pa na površju brez snežne odeje. Prikazan je učinek snežne odeje na izrazito povečanje odbitega sončnega sevanja pri prisotnosti novozapadle snežne odeje, ki nas pripelje do ohlajanja ozračja in dviga zračnega pritiska na območjih, ki so pokrita s snegom. Kjer ni snega, sončno sevanje lažje prodre v površino in v zemljo se absorbira bistveno večja količina toplote. To omogoča dvig temperatur in nižji zračni tlak, kot bi bil v prisotnosti snežne odeje.



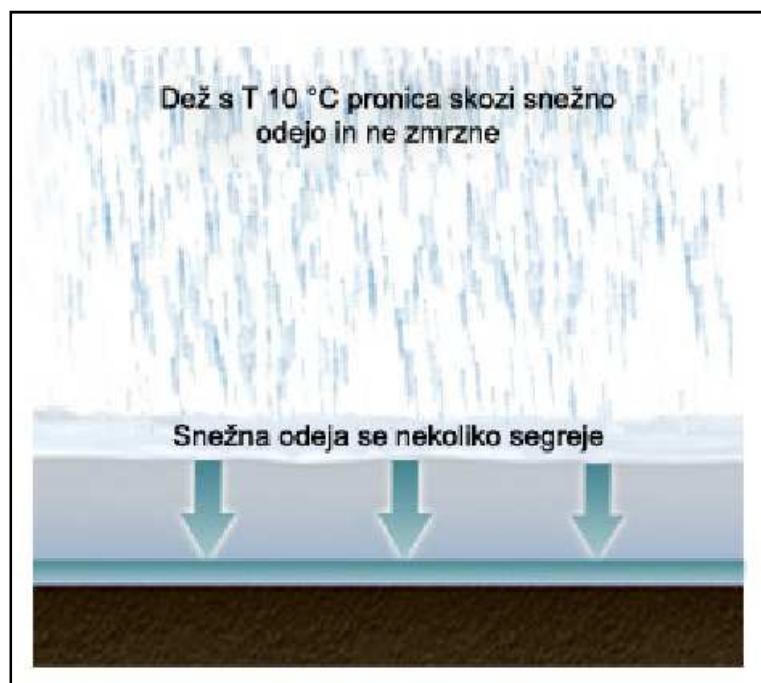
Slika 9: Vpliv snežne odeje na segrevanje površja (Effect of solar radiation on snow cover, 2013)

3.3.4 Tekoče padavine in temperatura zraka

V višjih legah je zaradi nižjih temperatur sneženje pogostejše kot v nižjih legah. Zaradi istega vzroka se v višjih legah sneg počasneje tali. Na temperaturo zraka vpliva tudi oblika reliefa – v slabo prevetrenih senčnih kotlinah in dolinah, kamor se steka hladen zrak, se sneg lahko obdrži veliko dlje kot na prisojnih pobočjih in grebenih (ARSO, 2012). Dež s temperaturo nad lediščem tali ledena zrna, pri tem pa se tekoča voda hitro ohladi na temperaturo ledišča. V kombinaciji toplega dežja in visokih temperatur zraka, se začnejo taliti tudi debelejšje plasti

snežne odeje. Če po deževni odjugi nastopi ohladitev, potem snežna odeja od zgoraj navzdol zamrzne, zamrzne pa tudi voda, ki je pronicala skozi sneg in taljenje se za določen čas prekine.

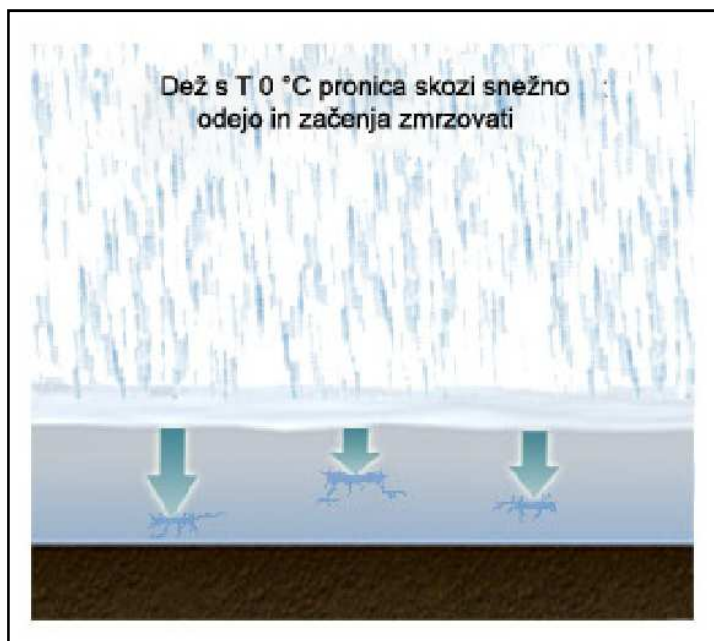
Dež, ki pada na snežno odejo, naj bi bil glavni krivec za hitro taljenje in segrevanje snega, vendar ni vedno tako. Vzemimo situacijo (slika 10), ko pade 10 mm dežja na dan s temperaturo 10 °C. Ta dež je dovolj topel, da ne zamrzne in pronica navzdol skozi snežno odejo. Pri tem bo dež snegu dal majhne količine toplotne energije (UCAR, 2007).



Slika 10: Vpliv toplega dežja na snežno odejo (UCAR, 2007)

Toplotni vložek ob dežju s temperaturo 10 °C bi bil približno 420 kJ/m² na dan. To znaša približno 5 W/m², kar je malenkost manj od absorbirane sončne energije na sončen zimski dan z majhnim vpadnim kotom na površino sveže zapadlega snega.

Zdaj pa vzemimo situacijo (slika 11), ko pade 10 mm dežja na dan s temperaturo med 0 in 1 °C. Ko ta mrzel dež pronica navzdol skozi snežno odejo, snegu oddaja toploto in začne zamrzovati ter oblikovati majhna ledena območja.



Slika 11: Vpliv hladnega dežja na snežno odejo (UCAR, 2007)

V tem primeru 10 mm dežja pri 0 °C zamrzne in nato pri taljenju v snežno odejo sprosti svojo latentno toploto. Predpostavimo, da je dež enakomerno porazdeljen v snegu globine 1 metra, ki ima gostoto 340 kg/m³ in začetno temperaturo –5 °C. Po zamrznitvi, bi bilo v odejo sproščenih 3350 kJ toplote, ki bi dvignila povprečno temperaturo snega iz –5 °C na 0 °C (UCAR, 2007).

Ključna ugotovitev iz zgornjih primerov je, da padavine niso zmeraj glavni dejavnik taljenja snega. Dež, ki zmrzuje v snegu pa je zelo pomemben za zorenje snega in povečuje njegovo dovzetnost za taljenje.

3.3.5 Prevajanje toplote – kondukcija

Vpliv toplote zemljine pod snežno odejo je pomemben le jeseni, saj je takrat zemljina toplejša od snega in posledično preprečuje oziroma upočasnjuje nastanek snežne odeje. Kasneje, ko se zemljina ohladi, le-ta nima več vpliva na taljenje (Brilly in Šraj, 2005).

3.4 Merjenje snežne odeje

Snežna odeja na tleh se nabere postopoma čez zimo. Meteorološka služba meri višino novozapadlega snega v zadnjih treh, šestih ali dvanajstih urah, vsak dan pa tudi skupno višino snežne odeje. Višino novega snega in debelino snežne odeje običajno merimo s

snegomeri. To so stalno nameščene ali premične palice z označenim merilom (Rakovec in Vrhovec, 2000).

Instrumenti za merjenje snežne odeje:

- snegomer,
- snežna deska,
- ultrazvočni merilec.

Instrumenti za merjenje količine snega:

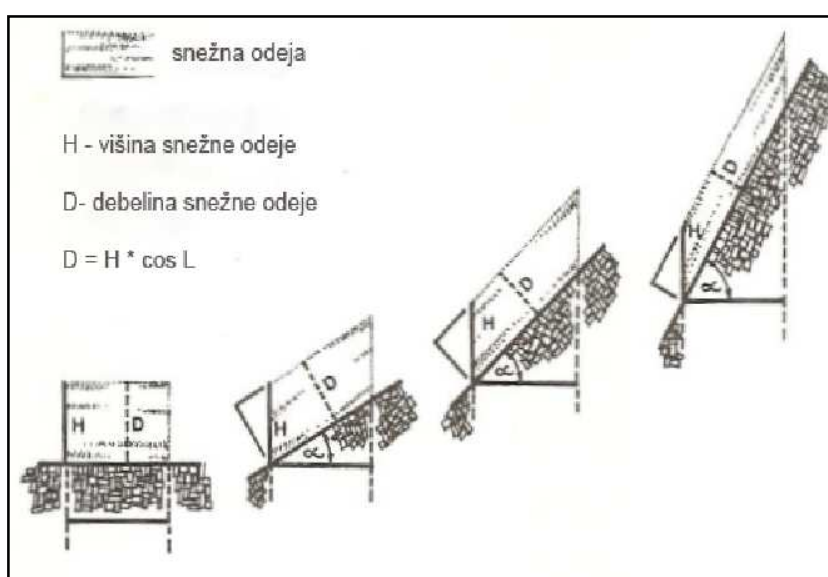
- ombrometer,
- ombrograf,
- totalizator,
- snežna blazina,
- snežna cev,
- aktivni radio-izotopni merilec,
- merilec gama sevanja,
- senzorji kozmičnega sevanja.

Vedno več pa se uporablja daljinsko zaznavanje snežne odeje.

4 FIZIKALNE LASTNOSTI SNEŽNE ODEJE

4.1 Debelina in višina snežne odeje

Ločimo debelino in višino snežne odeje. Debelina predstavlja sloj snežne odeje, ki se meri v smeri pravokotno na podlago, višina pa se vedno meri navpično, ne glede na lego podlage. Na ravni podlagi med tema pojmomoma ni razlike, na poševni podlagi – na pobočju pa prihaja do razlike, in sicer je višina vedno večja kot debelina (slika 12), razlika pa raste z naklonom podlage (Ogrin in Ortar, 2007).

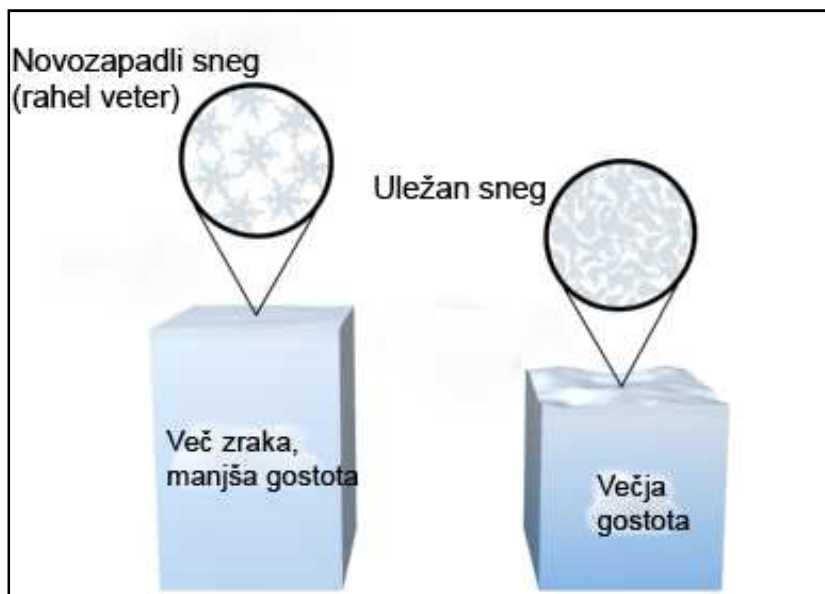


Slika 12: Višina in debelina snežne odeje (Šegula, 1986: str. 70)

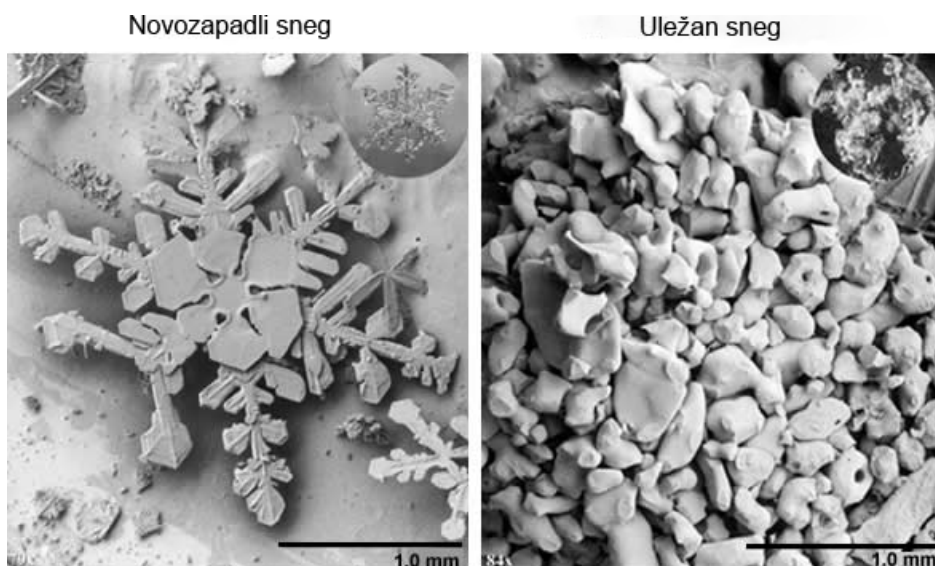
4.2 Gostota

Gostota snega, kot ena glavnih lastnosti snežne odeje, je odvisna od vrste snega oziroma od količine zraka v snežni odeji. Ta pa je pogojen s temperaturo zraka med sneženjem, vlažnostjo in starostjo snežne odeje (Singh in Singh, 2001). Gostota je definirana kot masa na enoto volumna izražena v kg/m^3 . Gostota novozapadlega snega je med 50 kg/m^3 (suh hladen pršič) in 300 kg/m^3 (južen sneg, ki je padal z dežjem) (Rakovec in Vrhovec, 2000).

Ob prisotnosti rahlega vetra je novozapadli sneg običajno sestavljen iz neokrnjenih kristalov, med katerimi je veliko zračnega prostora. Ko se sneg s pomočjo vetra premika, se ledeni kristalčki zlomijo in snežinke postanejo bolj zaobljene. Snežinke so posledično bolj skupaj in tako nastane gostejša snežna odeja (sliki 13 in 14).



Slika 13: Značilnosti kristalov novozapadlega in uležanega (napihanega) snega (UCAR, 2011)



Slika 14: Razlika med novozapadlim in uležanim (napihanim) snegom pod mikroskopom (UCAR, 2011)

Drugi glavni dejavnik, ki določa gostoto snega, je količina prisotne vode v snežni odeji. Sončno sevanje, toplota in dež povzročajo oblivanje snežnih zrn z vodo, ki ob ohladitvi zmrzne in spoji več zrn skupaj. S tem se gostota snežne odeje hitro in občutno večja. Gostota je odvisna tudi od višine snežne odeje, saj višje ležeči sneg pritiska na nižje ležečega, ga s tem stiska in mu povečuje gostoto. Novozapadli sneg je rahel, s staranjem pa se stiska in posledično pridobiva večjo gostoto. Torej, več časa kot je snežna odeja na tleh, večjo gostoto ima.

4.3 Snežni vodni ekvivalent

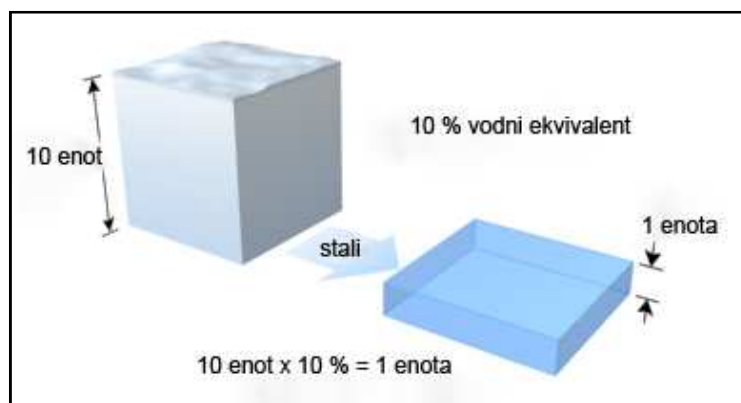
Vodni ekvivalent snežne odeje (SVE), ki je zapisan v enačbi (1) je definiran kot višina vodne plasti, ki bi jo dobili, če bi se snežna odeja v celoti stalila in ne bi nič vode odteklo ali izhlapelo.

To je podatek o vsebnosti vode v snežni odeji, ki je zelo pomemben za napovedovanje pomladanskih vodostajev. Ekvivalent vključuje vso tekočo vodo, ki se v času merjenja lahko shrani v snežni odeji skupaj z ledenimi kristali.

Izračunamo ga lahko, če poznamo debelino snežne odeje d in njeno gostoto ρ_s , upoštevamo pa še gostoto tekoče vode ρ_w , ki znaša 1000 kg/m^3 (DeWalle in Rango, 2008). Običajno ga merimo v mm.

$$SVE = d \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (1)$$

Približna, hitra ocena količine vode v sveži snežni odeji je 1 cm vode v 10 cm svežega snega (Brilly in Šraj, 2005). To pomeni, da nam 10 enot globine snega da 1 enoto vode (slika 15).



Slika 15: Primer donosa vode iz dane količine snega (UCAR, 2011)

Razumevanje vodnega ekvivalenta snega je zelo pomembno za hidrološke napovedovalce. Suh sneg vsebuje 0 % tekoče vode in se ne drži skupaj. Voda predstavlja le nekaj odstotkov volumna vlažnega snega. Preglednica 3 prikazuje vsebnost tekoče vode v različnih vrstah snega.

Preglednica 3: Vsebnost tekoče vode v različnih vrstah snega (USACE, 2011).

| VSEBNOST TEKOČE VODE | | |
|----------------------|--|-------------------------|
| Vrsta snega | Definicija | Vsebnost vode (volumen) |
| Suh | Temperatura snega je malo pod 0 °C. Sestavljen je iz ločenih zrn, ki se ob pritisku rahlo držijo drug z drugim. Namig: snežno kepo je težko narediti. | 0 % |
| Vlažen | Temperatura snega je 0 °C. Voda ni vidna tudi pri 10-kratni povečavi. Ko sneg rahlo stisnemo, se izrazito drži skupaj. Namig: snežno kepo je enostavno narediti. | < 3 % |
| Moker | Temperatura snega je 0 °C. Pri 10-kratni povečavi je voda po spojih med sosednjimi zrnji snega. Namig: pri stisku snežne kepe ne moremo iztisniti vode. | 3–8 % |
| Zelo moker | Temperatura snega je 0 °C. S stiskanjem snega dobimo nekaj vode, vendar je v porah še vedno nekaj zraka. | 8–15 % |
| Brozga | Temperatura snega je 0 °C. Sneg ima veliko vsebnost vode in razmeroma majhen del zraka. | > 15 % |

4.4 Albedo

Razmerje med odbitim in vpadlim valovanjem, izraženo v odstotkih, imenujemo albedo oziroma odbojnost svetlobe. Albedo 0 pomeni, da telo ne odbija svetlobe (črno telo), albedo 1 pa pomeni popolno odbojnost svetlobe (belo telo).

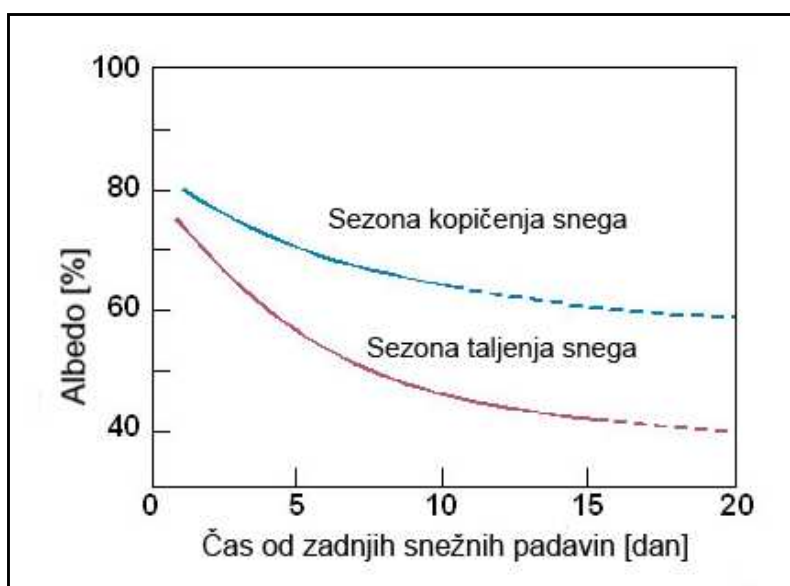
Snežna odeja vsebuje od 50 do 95 % zraka (ARSO, 2010). Ta med ledenimi kristali miruje in onemogoči transport toplote ter na ta način prepreči prenos toplote iz tal preko snežne odeje. Snežna odeja tako deluje kot toplotni izolator. Velika površinska odbojnost snega, albedo 80–90 %, pripomore k drastični spremembi prenosa energije med površino in atmosfero. Posledično je temperatura zraka ob prisotnosti snežne odeje nižja tudi za 5–10 °C (Singh in Singh, 2001). S staranjem snega se albedo zmanjšuje (preglednica 4), povečuje pa se taljenje snega.

Preglednica 4: Primerjava albeda različnih površin (Šegula, 1986: str. 28).

| Vrsta snega oziroma površina | Albedo (%) |
|------------------------------|------------|
| Nov sneg, suh | 90–95 |
| Star sneg, čist | 70–90 |
| Umazan sneg | < 50 |
| Ledeniški led | 30–40 |
| Prst | 18–31 |
| Oceani | 7–20 |

Vrednost albeda snega se lahko zelo spremeni in je odvisna od številnih pogojev. Ko je sneg svež in so kristali čisti, lahko albedo doseže vrednost 90 %. Na splošno velja, da je odbojnost novozapadlega snega najmanj 80 %. S staranjem snega postane njegova kristalna struktura bolj zaobljena zaradi mokrega ali suhega spreminjanja ali zaradi prenašanja snežink z vetrom. Ti dejavniki učinkovito zmanjšujejo odbojno sposobnost snega prihajajočega sončnega sevanja. Snežna odeja lahko postane manj odbojna tudi zaradi kopičenja raznih delcev na svoji površini. Pomemben je tudi kot sončnega obsevanja, ki je v dobi nastajanja snežne odeje relativno nizek. Zato so temperature nižje in albedo snega se spreminja počasneje, kot v dobi taljenja. Takrat je sončno sevanje bolj intenzivno in temperature preko dneva nihajo z večjim razponom (UCAR, 2007).

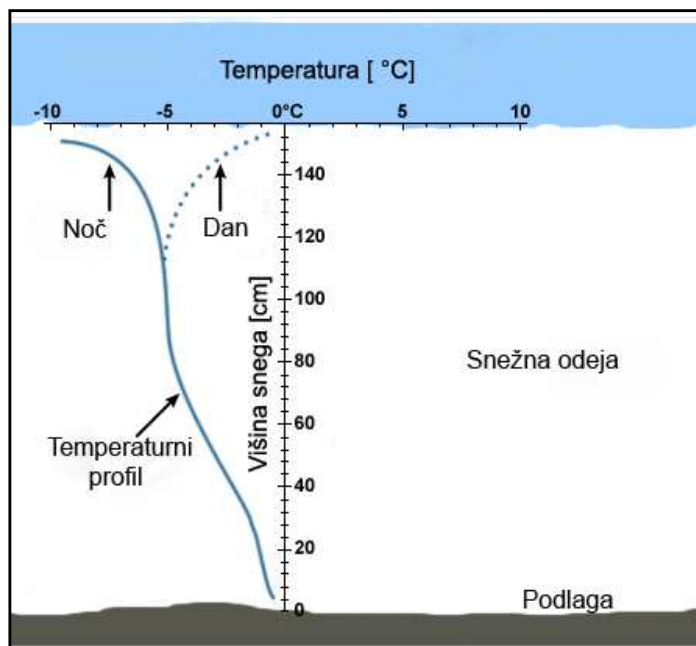
Zaradi vseh teh dejavnikov, se albedo snega običajno bliskovito zmanjša v nekaj dneh po sneženju. Po tem se albedo skuša izravnati na približno 60 % v sezoni akumulacije in na 40 % v času taljenja. Slika 16 prikazuje, kako se albedo spreminja v dveh različnih sezonah v odvisnosti od časa, ki je minil od prejšnjih snežnih padavin.



Slika 16: Albedo v različnih sezonah v odvisnosti od časa, ko so nastopile zadnje snežne padavine (UCAR, 2007)

4.5 Temperatura

Med taljenjem snega je zelo pomembno upoštevati temperaturni profil snežne odeje (slika 17). Fizikalni procesi, ki se odvijajo v snegu, so odvisni od tega, ali med vrhom in dnom snežne odeje obstaja temperaturni gradient, ali ne.



Slika 17: Temperaturni profil snežne odeje (UCAR, 2011)

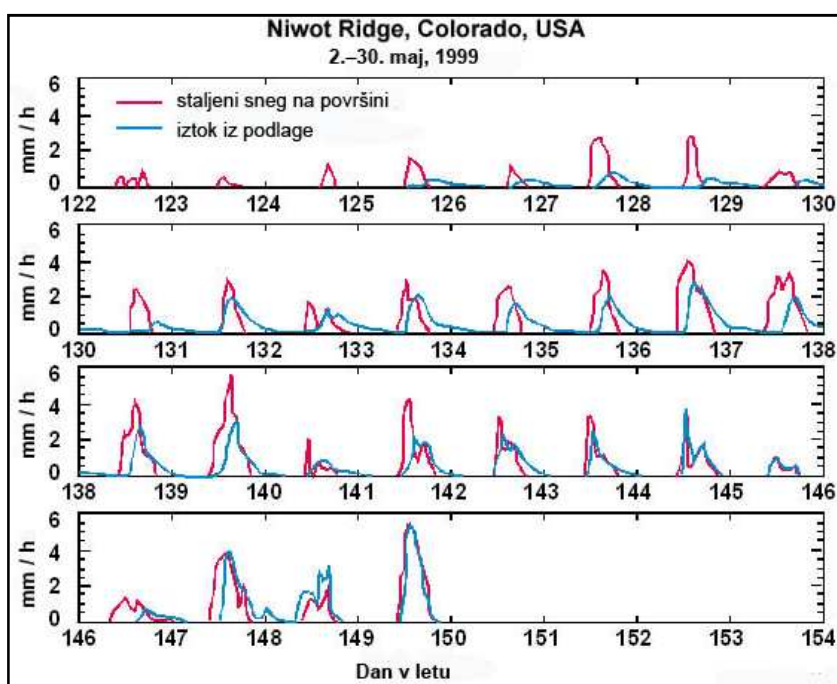
Običajno je temperaturni gradient v snegu prisoten zaradi relativne geotermalne toplote, ki nastane ob stiku snega s tlemi, v primerjavi z relativno mrzlimi temperaturami zraka na vrhu. Temperatura na vrhu snežne odeje pogosto dnevno niha zaradi spreminjanja sončne energije. Medtem ko staljena voda ali deževnica na vrhu zmrzujeta, sproščata latentno toploto, ta toploto pa lahko ogreje srednji del snežne odeje.

Če v snežni odeji temperaturni gradient ne obstaja, dobimo izotermno situacijo. Če je snežna odeja izotermna in ima temperaturo blizu 0 °C, dobimo idealne pogoje za hitro taljenje (UCAR, 2011).

5 VODA V SNEŽNI ODEJI

5.1 Prehajanje vode skozi snežno odejo

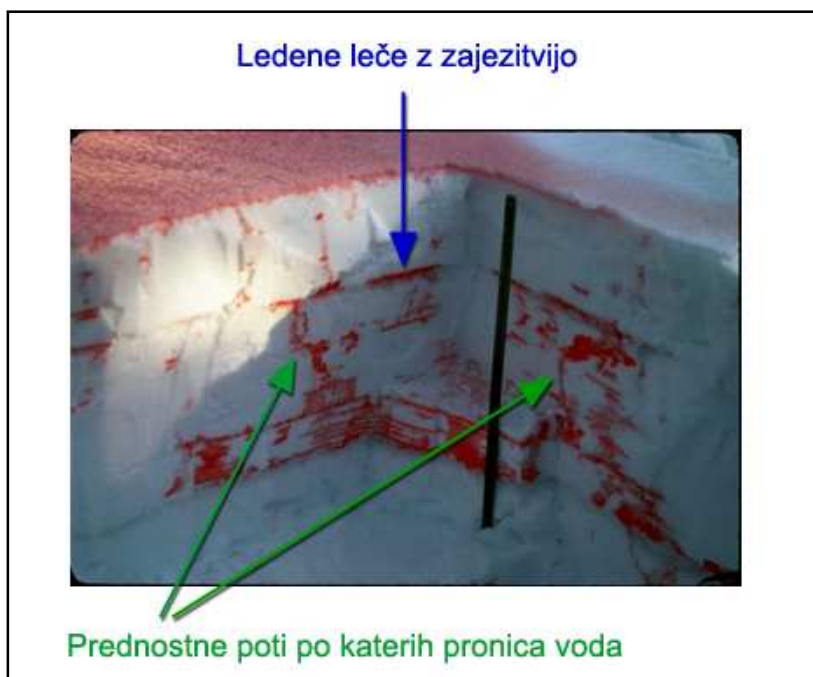
Staljena voda se v snegu pretaka z različno hitrostjo: od 2 cm na minuto do 60 cm na minuto. Hitrost je odvisna od več dejavnikov in sicer od: notranje strukture snežne odeje, stanja snežne odeje pred vnosom vode in količine razpoložljive vode na površini snežne odeje. Pri temperaturi tališča voda obda vsako zrno snega. Ta ovoj zagotavlja pot za dodatno staljeno vodo, ki pride kasneje. Ko so pore med zrnji snega napolnjene z vodo, lahko pride do laminarnega toka, ta pojav pa je zelo učinkovita metoda za odvajanje vode iz snežne odeje. Meritve, opravljene v maju leta 1995 na Niwot Ridge (Colorado, ZDA), kvantitativno kažejo, kako lahko tekoča voda prehaja skozi snežno odejo (slika 18).



Slika 18: Prehajanje vode skozi snežno odejo (UCAR, 2007)

V začetku maja se je taljenje pojavljalo na površini snega (rdeče), iz dna odeje pa ni bilo odvajanja vode (modro). To pa zato, ker je voda še vedno ostajala znotraj snega, kjer je včasih tudi ponovno zamrznila. V naslednjih dneh je voda počasi začela prihajati do površja zemlje na dnu snežne odeje. Proti koncu meseca je prišlo do večjega taljenja snega in skoraj ves staljeni sneg z vrha je lahko pronical navzdol skozi snežno odejo do površine zemlje. Vidimo lahko, da je imela na 149. dan voda na površini odeje in izmerjena voda, ki je prihajala iz dna skoraj enake magnitude in časovni okvir (UCAR, 2011).

Študije pri katerih so uporabili barvilo (slika 19) kažejo, da se voda v snegu premika skozi makro-pore, ki so lahko prisotne vodoravno in navpično. Horizontalne poti običajno nastanejo, ko neprepustne leče ledu silijo vodo k zaježitvi ali k bočnemu pretoku, dokler voda ne najde druge vertikalne poti, ki vodi do dna snežne odeje.

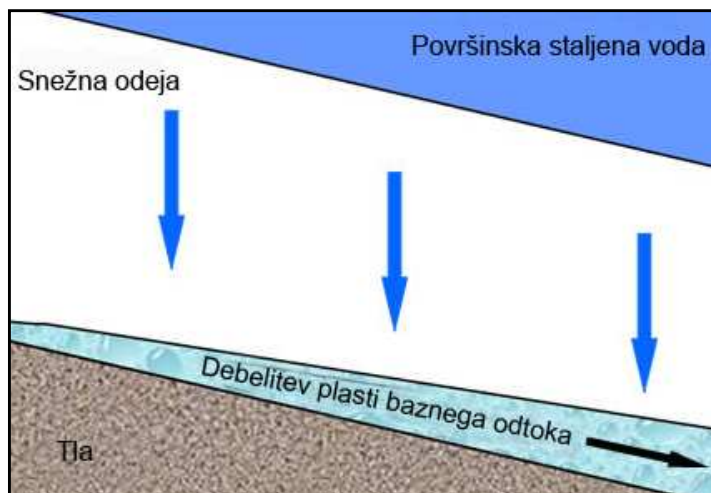


Slika 19: Pot pronicanja vode skozi snežno odejo (UCAR, 2007)

5.2 Odtok vode pod snežno odejo

Ko voda kaplja skozi sneg in doseže tla, je njena usoda odvisna od pogojev v tleh in na površini tal. Količina vode, ki odteče oziroma pronica skozi tla, pa je pomemben podatek za napovedovanje odtoka in morebitnih poplav. Če so tla odmrznjena in nenasočena, morajo biti sposobna absorbirati vodo, dokler je stopnja taljenja snega nižja od stopnje infiltracije tal. V tem primeru bi se staljeni sneg obnašal podobno kot pri padavinah. Če pa voda, ki pronica navzdol skozi sneg naleti na zamrznjena tla, obstaja možnost, da se bo voda na površini tal zaježila in ponovno zamrznila. To pa bi dodatno oviralo kakršno koli pronicanje vode v tla na tem območju. V takšnih situacijah, ko se sneg zelo hitro tali, lahko ta pojav povzroči obsežne poplave (UCAR, 2007).

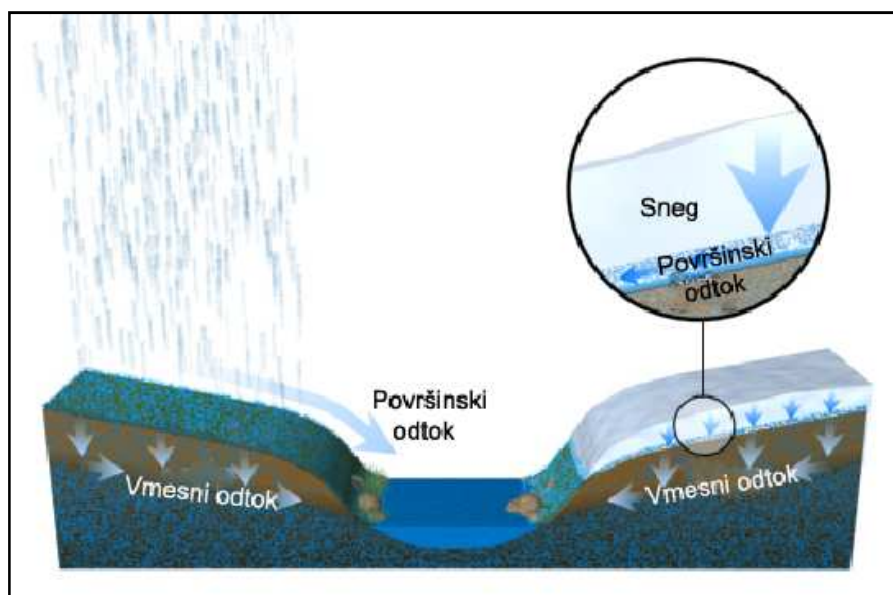
Nagnjena površina lahko povzroči dodatne težave. Po pobočju navzdol pore nenehno spodkopava ne le staljena voda od zgoraj, temveč tudi staljena voda, ki prihaja bočno od strani. To ustvarja večje količine toka vode pod snežno odejo in sčasoma lahko bazni odtok spodkoplje sneg od spodaj, kot je razvidno iz slike 20.



Slika 20: Debelitev plasti baznega odtoka (UCAR, 2007)

Med začetkom taljenja snega in izhodom staljene vode na dnu snežne odeje je pogosta zamuda, ki lahko traja nekaj dni ali več, odvisno od sezone.

5.3 Površinski odtok



Slika 21: Površinski odtok (UCAR, 2010)

Površinski odtok je del padavin, ki teče po zemeljski površini proti vodotoku in se ne infiltrira v tla (slika 21). Sestavljajo ga dežne padavine in staljeni sneg. K odtoku štejemo tudi medtok, ki se v zemljo infiltrira med nevihto in predstavlja del padavin, ki ne ponikne do podtalnice, temveč kot podpovršinski tok izteka v strugo vodotoka v obliki izvira in s tem postane del površinskega odtoka.

Glavni razlog za proučevanje procesa odtoka je dobiti oceno količine vode, ki naredi hitro pot do struge. Natančna ocena odtoka, ki sestoji iz deževnice in vode iz talečega se ledu in snega, je eden od najpomembnejših elementov v procesu napovedovanja poplav. Razmere v povodju vplivajo na delež dežja oziroma snega, ki prispevata k odtoku. Ko enkrat poznamo količino vode, ki naj bi postala odtok, s pomočjo orodij, kot je hidrogram enote, lahko ocenimo prihajajoči pretok v vodotoku (UCAR, 2010). S tem podatkom pa lahko napovemo poplave oziroma sušne pretoke.

6 MODELIRANJE TALJENJA SNEŽNE ODEJE

V mnogih državah sveta snežne padavine in sezonska snežna odeja predstavljata pomemben vir vode. Ko se sneg tali, voda napolni podtalnico, hkrati pa vzdržuje površinske vodne zaloge. Prekomeren odtok zaradi taljenja snega lahko povzroči poplave, medtem ko je neprimerno taljenje snega lahko uvod v kasnejšo sušo.

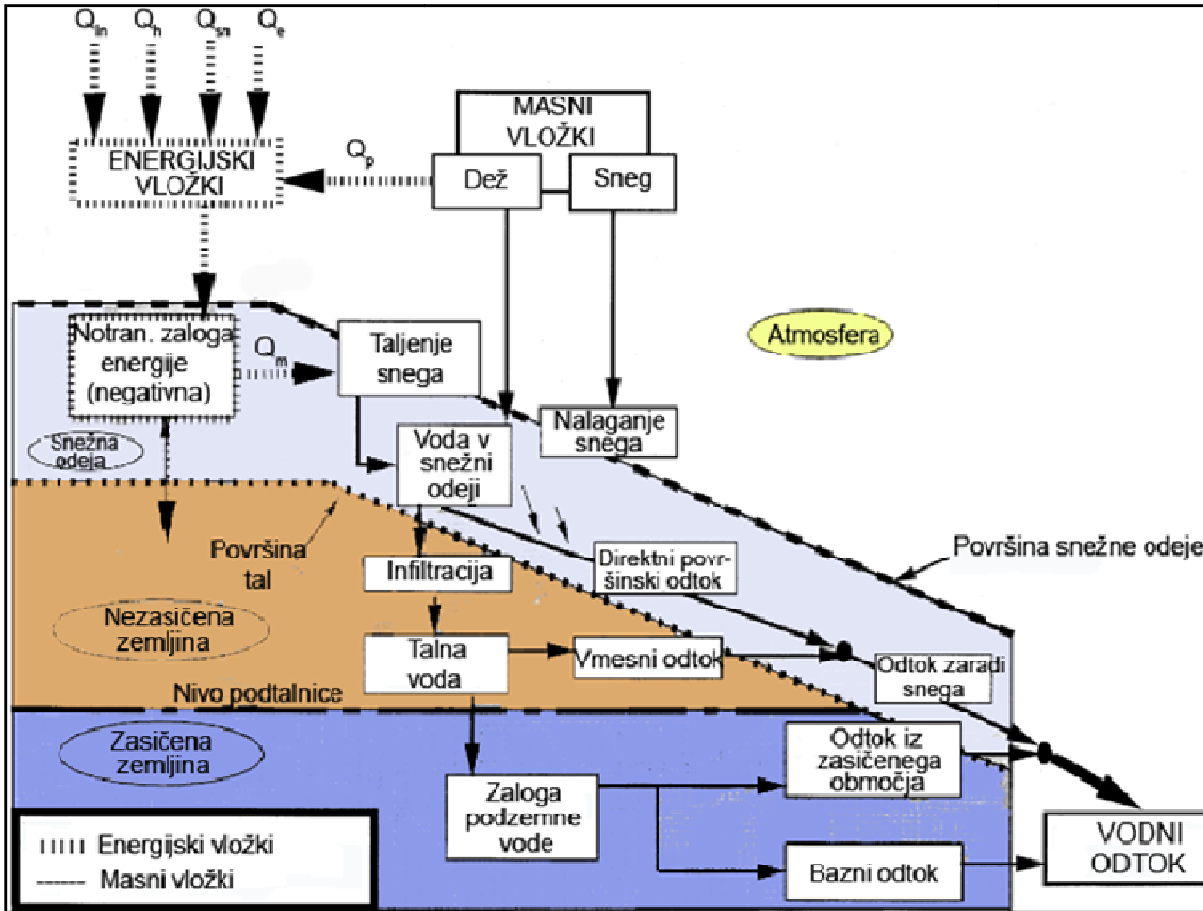
Ko se sneg tali, se led, ki sestavlja sneg pretvori v vodo. Ker pretvorba iz ledu v vodo zahteva vnos energije (toplote), je postopek taljenja snega neločljivo vezan na pretok in shranjevanje energije v snežni odeji. Te povezave med tokom in shranjevanjem vode (sneg in tekoča voda) ter energije (toplota) so prikazane na shematičnem prikazu (slika 22).

6.1 Energijska – toplotna bilanca v snežni odeji

Stušek (2007) je taljenje opisal kot celovit proces, v katerega je vključenih veliko dejavnikov, ki se skupaj povezujejo v energijsko bilanco oziroma razliko med vstopno in izstopno energijo. Sneg se začne taliti predvsem zaradi kratkovalovne sončne radiacije. V naravi je to dobro opazno v različni hitrosti taljenja snega na severnih ali južnih straneh pobočij. Severna pobočja so manj obsevana kot južna, razlikuje pa se tudi vpadni kot sončne obsevanosti in s tem njegova jakost, ki se z večanjem vpadnega kota zmanjšuje. Krajši dnevi pozimi in velik vpadni kot sončnega obsevanja zelo upočasnjujeta taljenje snega.

K taljenju veliko pripomore tudi latentna toplota, ki se sprošča ob kondenzaciji zračne vlage na površini snežne odeje. Samo taljenje snežne odeje še ne pomeni takojšnjega odtoka oziroma infiltracije staljene vode v podlago. Ob otoplitvi in pričetku taljenja se talijo le vrhnje plasti, katerih staljena voda pronica v globlje plasti snežne odeje in tam postopno zmrzuje ter zvišuje temperaturo snežne odeje do 0 °C. Do površinskega odtoka proste vode pride takrat, ko se temperatura celotne snežne odeje dvigne na 0 °C in je snežna odeja nasičena s staljeno vodo.

Proces taljenja pospešita še dež in zmanjšan albedo starega snega, ki pripomore k večji absorpciji sončnega sevanja. Ko dežne kaplje padejo na sneg, se ohladijo na 0 °C in pri tem oddajajo toploto, ki dodatno pospeši taljenje. Padavinska in staljena voda tako hitreje nasičita snežno odejo in s tem omogočita površinski odtok. Proces taljenja pospeši še prevajanje toplote iz tal pod snežno odejo.



Slika 22: Shematični prikaz procesa taljenja snežne odeje
(Price in sod., 1979, cit. po USACE, 1998)

Zalogo energije v snežni odeji, ki je na razpolago za taljenje, lahko zapišemo kot vsoto energijskih vnosov in energijskih izgub po enačbi (2) (USACE, 1998):

$$Q_m = Q_{sn} + Q_{ln} + Q_h + Q_e + Q_g + Q_p - \Delta Q_i \quad (2)$$

- Q_m vsota toplotnih (energijskih) komponent,
- Q_{sn} kratkovalovna radiacija med okolico in snežno odejo (absorbirana),
- Q_{ln} dolgovalovna radiacija med okolico in snežno odejo (običajno negativna),
- Q_h zaznavna toplota, prenesena iz zraka (konvekcija),
- Q_e latentna toplota izhlapevanja, pridobljena s kondenzacijo,
- Q_g kondukcija toplote iz zemljišča,
- Q_p toplota, ki jo prinašajo padavine,
- ΔQ_i stopnja spremembe notranje energije znotraj snežne odeje.

6.1.1 Izmenjava energije preko sevanja

Sevanje je glavni vir energije na zemeljskem površju. Nekaj te energije predstavlja sončno ali kratkovalovno sevanje, drugi del energije, ki izvira iz atmosfere, oblakov in tal imenujemo dolgovalovno ali terestrično sevanje. Prva dva člena iz enačbe (2) se včasih označuje kot neto sevanje Q_n , ki predstavlja neto vsoto kratkovalovnega Q_{sn} in dolgovalovnega sevanja Q_{ln} . Ker dolgovalovna radiacija med okolico in snežno odejo največkrat predstavlja izgube v snežni odeji, Q_n izrazimo kot (3):

$$Q_n = Q_{sn} - Q_{ln}. \quad (3)$$

Količina toplote, ki je prenesena v snežno odejo s sončnim sevanjem, je odvisna od letnega časa, nadmorske višine, razmer v ozračju, ure v dnevu, gozdne pokrovnosti, in odbojnosti snega (albedo). Jakost vpadnega sončnega sevanja tik nad zemeljsko atmosfero je skoraj nespremenjena pri $1,35 \text{ kJ/m}^2$ na sekundo (solarna konstanta), vendar Zemljino površino doseže manj kot 50 odstotkov tega sevanja. Ko sončno sevanje pride skozi Zemljino atmosfero, je oslabiljeno zaradi refleksije od oblakov, raztreseno zaradi zračnih molekul in trdnih delcev v ozračju in absorbirano od molekularnih struktur, vsebovanih v ozračju. Največje razlike v količini sončnega sevanja, ki pride do površine Zemlje povzročajo spreminjajoča oblačnost.

Količino energije, ki je na voljo za taljenje snega iz absorpcije kratkovalovnega sevanja izračunamo (4):

$$Q_s = (1 - A)I_i \quad (4)$$

A albedo (izražen v decimalni vrednosti),

I_i dnevni vnos sončevega sevanja [kJ/m^2 na dan].

V srednjih geografskih širinah, na vodoravni površini je pozno pomladi največja moč sončnega sevanja za jasen dan približno 52 MJ/m^2 . Pri minimalnem albedu (40 %) se zaradi kratkovalovnega sevanja na negozdni površini sneg stali za okoli 6,4 cm na dan.

Del energije, ki jo sneg absorbira zaradi sončnega sevanja, se odbije nazaj v atmosfero kot dolgovalovno (zemeljsko) sevanje. Sneg je glede na dolgovalovno sevanje, ki pride na površje Zemlje iz atmosfere (oblakov), skoraj popolno črno telo, ki absorbira vpadlo sevanje in oddaja maksimalno možno sevanje v skladu z Stefan-Boltzmanovim zakonom (5):

$$Q_t = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (5)$$

| | |
|------------|---|
| Q_t | skupna energija sončnega sevanja, ki jo oddaja sneg [kJ/m ² na sekundo], |
| ϵ | emisivnost čistega snega (0,99), |
| σ | Stefan-Boltzmannova konstanta (5,735 *10 ⁻¹¹ kJ/m ² s K ⁴), |
| T_s^4 | temperatura črnega telesa v Kelvinih [K] (temperatura na površju snega). |

Vzemimo talečo se snežno odejo, ki ima površinsko temperaturo 0 °C. V skladu z Stefan-Boltzmannovim zakonom bo sneg izgubljal energijo v višini 0,315 kJ/m² na sekundo. V nasprotju imamo povratno ali dolgovalovno sevanje, ki se odbije nazaj iz ozračja ali gozdnih površin. Ob jasnem vremenu je pridobljena toplota iz povratnega sevanja na splošno manjša kot toplotne izgube in v tem primeru dolgovalovno sevanje povzroča v snežni odeji toplotne izgube. Ob oblačnem vremenu ali pod drevesnimi krošnjami je povratno sevanje lahko večje ali manjše od izgub snežne odeje, odvisno predvsem od temperature okolja (USACE, 1998).

6.1.2 Turbulentni prenos energije

Energija se izmenjuje med snežno odejo in ozračjem tudi s pomočjo konvekcije in kondenzacije. Glede na klimatske in lokalne vremenske razmere se relativni pomen teh procesov močno razlikuje. Na primer, v jasnem vremenu spomladi je turbulentna izmenjava energije z ozračjem drugotnega pomena za taljenje snega v primerjavi s sevanjem. Vendar pa je pozimi, v primeru padanja dežja na snežno odejo, turbulentna izmenjava prevladujoč proces prenosa toplote. Turbulentna izmenjava vključuje prenos zaznavne toplote iz toplega zraka v snežno odejo s pomočjo konvekcije (Q_h) in latentno toploto izhlapevanja (Q_e), pridobljeno s kondenzacijo vodne pare iz ozračja na površini snežne odeje (USACE, 1998).

Zaznavni prenos toplote se pojavi, ko se temperatura zraka razlikuje od temperature snega. Če je zrak hladnejši, je Q_h negativen (toplota zapusti sneg), če pa je zrak toplejši, je Q_h pozitiven (toplota vstopa v sneg). Latentna toplota je energija, ki se sprošča med fazno spremembo vode iz vodne pare v kapljevino do trdne snovi, ko pride do kondenzacije zračne vlage na površini snežne odeje. Ali obratno, da je energija pridobljena iz snežne odeje, ko se pojavi izhlapevanje ali sublimacija iz snežne odeje. Kondenzacija oziroma izhlapevanje ali sublimacija so odvisni od vlažnosti zraka in gradienta parnega tlaka med zrakom in površino snežne odeje. Če je vlažnost visoka, tako da je parni tlak zraka večji od tistega, ki je na površini odeje, je gradient parnega tlaka obrnjen proti snegu in prišlo bo do kondenzacije, in v tem primeru je vpliv latentne toplote pozitivnega predznaka. Če je zrak suh, se pojavi

izhlapevanje in/ali sublimacija in vpliv latentne toplote na taljenje ima negativen predznak. Zaznavni in latentni prenos toplote se v vetrovnih razmerah poveča (USDA, 2004).

Glavni spremenljivki, ki vplivata na konvektivno (zaznavno) izmenjavo toplote, sta temperaturni gradient v ozračju, merjen nad snežno površino, in ustrezna hitrost vetra. Primarni spremenljivki, ki vplivata na kondenzacijsko (latentno) izmenjavo toplote, sta parni tlak v atmosferi in na površini odeje ter ustrezna hitrost vetra. Spodnji enačbi opisujeta zaznavno (6) in latentno (7) izmenjavo toplote (USACE, 1998):

$$Q_h = D_h u_z (T_a - T_s) \quad (6)$$

$$Q_e = D_e u_z (e_a - e_s) \quad (7)$$

| | |
|-------|--|
| D_h | koeficient zaznavnega prenosa energije [$\text{kJ/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$], |
| u_z | hitrost vetra pri izbrani višini nad snežno odejo [m/s], |
| T_a | temperatura ozračja [$^\circ\text{C}$], |
| T_s | temperatura na površini snežne odeje [$^\circ\text{C}$], |
| D_e | koeficient latentnega prenosa energije [$\text{kJ/m}^3 \text{ Pa}$], |
| e_a | parni tlak ozračja [Pa], |
| e_s | parni tlak snežne površine [Pa]. |

6.1.3 Kondukcija toplote iz zemljine

Vpliv toplote zemljine pod snežno odejo na taljenje snega (Q_g) ima v energijski bilanci zelo majhen pomen. To toplotno talno komponento lahko zanemarimo v krajših časovnih obdobjih (manj kot 1 teden). Čeprav je dnevni vpliv na taljenje snega zaradi talne toplote zelo majhen, lahko v celotni sezoni znatno pripomore k večjim količinam staljene vode. Večina točkovno zastavljenih modelov uporablja konstantne dnevne vrednosti v območju 0–5 J/m na sekundo. Vpliv toplote zemljine se lahko oceni tudi z uporabo temperaturnega gradienta v tleh, izmerjenega blizu površine tal z enačbo (8) (USACE, 1998):

$$Q_g = k \frac{dT_s}{dz} \quad (8)$$

| | |
|-------------------|--------------------------|
| k | toplotna prevodnost tal, |
| $\frac{dT_s}{dz}$ | temperaturni gradient. |

Prevodnost toplote med snegom in tlemi pod njim se zgodi, če med njima obstaja temperaturna razlika. Q_g je pozitiven, če je sneg hladnejši od tal in negativen, če sneg je toplejši od tal (USDA, 2004).

6.1.4 Toplota, ki jo prinašajo padavine

Toplota, ki jo prinašajo padavine (Q_p) je pozitivna, če je temperatura padavin višja od temperature snega in negativna, če je temperatura nižja. Izračunamo jo po spodnji enačbi (9):

$$Q_p = C_p \rho_w P_r (T_r - T_s) / 1000 \quad (9)$$

| | |
|----------|--------------------------------------|
| C_p | specifična toplota dežja [kJ/kg °C], |
| ρ_w | gostota vode [kg/m ³], |
| P_r | količina dežja [mm/časovno enoto], |
| T_r | temperatura dežja [°C], |
| T_s | temperatura snega [°C]. |

Za temperaturo dežja se domneva, da je enaka temperaturi zraka. Specifična toplota dežja C_p je enaka 4,20 kJ/kg °C, snega pa 2,09 kJ/kg °C (U SACE, 1998).

6.1.5 Toplotne spremembe znotraj snežne odeje

Če je količina energije, ki je potrebna za dvig povprečne temperature snega do tališča (angl. *cold content*) ali toplotni primanjkljaj snežne odeje pozitiven, je temperatura snežne odeje pod lediščem. Notranjo energijo Q_i je mogoče spremeniti in zmanjšati toplotni primanjkljaj s toploto, ki se sprosti, ko staljena voda ali deževnica zamrzne v snežni odeji. Ta pojav je izrazit med dnevnim temperaturnim ciklom s ponovnim zamrzovanjem zaradi ohlajanja ozračja ponoči. Staljena voda in deževnica bosta še naprej zamrzovali v snežni odeji, dokler skupni toplotni primanjkljaj ne doseže 0 °C. Ko skupni toplotni primanjkljaj doseže nullo, bo snežna odeja postala izotermna pri 0 °C. To notranjo energijo se izračuna po enačbi (10):

$$Q_i = d_s (\rho_i C_{pi} + \rho_l C_{pl} + \rho_v C_{pv}) T_m \quad (10)$$

| | |
|--------|---|
| d_s | višina snežne odeje, |
| ρ | gostota ($\rho_i = 922 \text{ kg/m}^3$, $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$), |
| C_p | specifična toplota ($C_{pi} \approx 2,1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$, $C_{pl} \approx 4,2 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$), |
| T_m | srednja temperatura snega [$^\circ\text{C}$]. |

Indeksi i , l in v se nanašajo na led, kapljevino in paro. Prispevek vode v obliki pare je predvidoma zanemarljiv (USACE, 1998).

ΔQ_i je stopnja spremembe v notranji energiji, ki je shranjena v snežni odeji na enoto površine snežne odeje. Ta člen energijske bilance je sestavljen iz energije, ki je potrebna za: taljenje ledu v snežni odeji, zamrznitve tekoče vode in spreminjanja temperature snega. Tako je v času segrevanja ozračja neto vložek toplote ΔQ_i pozitiven, medtem ko je v času ohlajanja ΔQ_i negativen. Količina energije, ki je na voljo za taljenja snega se spreminja in je odvisna od obsega različnih energijskih vložkov v snežno odejo. Taljenje snega ni enotno po celotni globini snežne odeje in večina taljenje se pojavlja v zgornjem in spodnjem delu snežne odeje (ob stikih z atmosfero in tlemi) (USACE, 1998).

Energijski vložki imajo v procesu taljenja snežne odeje različne vloge. Njihov predznak se v nekaterih primerih spreminja glede na letni čas, čas v dnevju in stanje vremena. V preglednici 5 so podane relativne odstotne vrednosti posameznega energijskega vložka v snežni odeji.

Preglednica 5: Relativna pomembnost energijskih (toplotnih) vložkov v snežni odeji (USDA, 2004).

| Energijski vložek | Q_m [%] | Komentarji |
|---------------------|-----------|--|
| Q_{sn} , Q_{ln} | 60–90 | <ul style="list-style-type: none">• Odvisna sta od terena, letnega časa, oblačnosti, senčenja, temperature zraka in vlažnosti.• Q_{sn} in Q_{ln} sta običajno približno v enakem obsegu, vendar z drugačnim predznakom.• Q_{ln} je običajno negativen in prevladuje v zimskem času.• Q_{sn} je pozitiven in prevladuje spomladi.• Zgodaj spomladi, preden nastopi taljenje se Q_{sn} in Q_{ln} med sabo uravnovešata, zato je njun vpliv majhen. |

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice 5

| | | |
|------------|------|--|
| Q_h, Q_e | 5–40 | <ul style="list-style-type: none"> • Odvisna od temperaturnega gradienta, vlažnosti in hitrost vetra. • Q_h in Q_e sta običajno nasprotnega predznaka, zato se uravnovešata. Ali je toplo ($Q_h +$) in suho ($Q_e -$), ali pa je hladno ($Q_h -$) in vlažno ($Q_e +$). • Včasih sta Q_h in Q_e istega predznaka, ampak majhne velikost (npr. hladno in suho vreme). • Včasih sta oba pozitivna in velika (tj. toplo in vlažno vreme), običajno ob močnem vetru, ki se pojavi ob dežju. |
| Q_g | 2–5 | <ul style="list-style-type: none"> • Običajno majhen, saj je največkrat temperatura tal približno enaka temperaturi snega. Med taljenjem sta sneg iz zemlja na 0 °C, tako da je $Q_g = 0$. |
| Q_p | 0–1 | <ul style="list-style-type: none"> • Toplota, ki jo vsebujejo padavine je razmeroma majhna v primerjavi z latentno toploto, ki je potrebna za taljenje snega, razen če je količina padavin zelo velika in temperatura padavin znatno višja od 0 °C. |

6.2 Določanje sproščanja vode pri taljenju snega

Enačba (2), ki predstavlja energijsko bilanco snežne odeje, povzema vire energije, ki so na voljo za taljenje snega. Je osnovna enačba, ki je primerna za računanje odtoka zaradi taljenja snežne odeje, saj vsota vseh virov energije (toplote) predstavlja skupno količino energije, ki je na voljo za taljenje snega (Q_m) (USACE, 1998).

Ko je snežna odeja v toplotnem ravnovesju ($Q_m = 0$), jo bo negativna energijska bilanca ohladila, medtem ko jo bo pozitivna energijska bilanca segrela. Sneg ne more biti toplejši od nič stopinj Celzija, in taljenje se ne more pojaviti v večjih količinah, dokler celotna snežna odeja ne doseže te temperature (USDA, 2004).

Poznamo dva osnovna načina računanja taljenja snega, ki sta opisana v naslednjih podpoglavjih. Prva metoda uporablja enačbe energijske bilance, ki jo sestavljajo kratko- in dolgovalovno sevanje, zaznavna in latentna toplota, toplota iz zemljišča in padavin ter notranje spremembe v snežni odeji. Druga osnovna metoda izhaja iz temperaturnega indeksa in je za razliko od prve metode bolj enostavna za uporabo. Temperatura zraka je predpostavljena kot reprezentativni indeks vseh energijskih virov, ki povzročajo taljenje in je lahko uporabljena kot samostojna spremenljivka v računanju taljenja snega (USACE, 1998).

6.2.1 Računanje s pomočjo energijske bilance

Ko postane celotna snežna odeja izotermna pri nič stopinj Celzija, bodo pozitivne vrednosti Q_m povzročile taljenje. Količino staljenega snega v določeni točki lahko izrazimo s splošno enačbo (11):

$$M = \frac{Q_m}{334,9 \rho_w B} \quad (11)$$

| | |
|----------|--|
| M | višina staljenega snega (vodni ekvivalent) [mm], |
| Q_m | vsota toplotnih (energijskih) vložkov [kJ/m ²], |
| B | termalna vrednost snežne odeje (določa delež ledu v snegu, običajno med 0,95 in 0,97), |
| 334,9 | specifična talilna toplota ledu [kJ/kg], |
| ρ_w | gostota vode [kg/m ³]. |

S splošno enačbo (11) lahko opišemo taljenje snežne odeje tudi na časovno enoto (npr. mm vodnega ekvivalenta na dan), kadar Q_m izrazimo v kJ/m² na dan.

Taleča se snežna odeja je sestavljena iz mešanice snega (ledu) in majhne količine proste (tekoče) vode, ujete v medprostorih med snežnimi zrn. Relativni delež snežne odeje, ki je sestavljena iz ledu, določa termalna vrednost (B) snežne odeje. Sneg, ki ne vsebuje proste vode, ima vrednost B enako 1,0. Vendar pa je na začetku taljenja nekaj proste vode zadržane v snežni odeji in zaradi nje je termalna vrednost manj kot 1,0. Toplotna energija, ki je potrebna za sprostitvev 1 g vode je nekoliko manjša kot specifična talilna toplota ledu (to je energija, ki je potrebna za spremembo ledu v vodo – 334,9 kJ/kg ali 80 cal/g za čisti led). Po nekaj urni prosti drenaži zaradi gravitacije, je za talečo se snežno odejo termalna vrednost v povprečju običajno med 0,95 in 0,97, kar ustreza 3–5 odstotkom tekoče vode v snegu. Termalna vrednost snega je lahko precej nižja za »zrel« sneg in v skrajnih primerih, ko voda ne more prosto odtekati iz snežne odeje (USACE, 1998).

Raziskovalci so na podlagi študij, s katerimi so prvotno želeli ugotoviti maksimalne razsežnosti hipotetičnih poplav, razvili enačbe s katerimi lahko izračunamo višino staljenega snega za vsak posamezen energijski vnos. Danes so te enačbe uporabljene v računalniških modelih kot sta HEC-HMS (*angl.* The Hydrologic Engineering Center) in SSARR (*angl.* The Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation), uporablja pa se jih tudi pri napovedovanju dejanskih poplav (USACE, 1998).

a) Taljenje zaradi kratkovalovnega sevanja (12) (USACE, 1998):

$$M_{SW} = \frac{1000(1-a)I_i}{333.9 \rho B} \quad (12)$$

| | |
|----------|--|
| M_{SW} | višina staljenega snega zaradi kratkovalovnega sevanja [mm/dan], |
| a | albedo snega, |
| I_i | dnevni vnos sončevega sevanja [kJ/m^2 na dan], |
| ρ | gostota vode (1000 kg/m^3), |
| B | termalna vrednost snežne odeje, |
| 333.9 | specifična talilna toplota ledu [kJ/kg]. |

b) Taljenje zaradi dolgovalovnega sevanja (13 in 14):

- Taljenje pod drevesnimi krošnjami (gozd) ali ob nizki oblačnosti (enačba 13) (Harr, 1981):

$$M_l = 0,133T_a \quad (13)$$

- Taljenje ob jasnem vremenu (enačba 14) (Singh in Singh, 2001):

$$M_l = 0,94T_a - 20,1 - 1,24T_s \quad (14)$$

| | |
|-------|---|
| M_l | višina staljenega snega zaradi dolgovalovnega sevanja [mm/dan], |
| T_a | temperatura zraka [$^{\circ}\text{C}$], |
| T_s | temperatura na površini snežne odeje [$^{\circ}\text{C}$]. |

Ko se sneg tali, je temperatura na površini snežne odeje (T_s) enaka 0 in M_l ni pozitiven, dokler temperatura zraka ne preseže $21,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

c) Taljenje zaradi zaznavne toplote (15) (Singh in Singh, 2001):

$$M_c = 0,113 \left(\frac{p}{100} \right) v T_a \quad (15)$$

| | |
|-------|---|
| M_c | višina staljenega snega zaradi zaznavne toplote [mm/dan], |
|-------|---|

| | |
|-------|-----------------------------------|
| p | zračni tlak [KN/m ²], |
| v | hitrost vetra [km/h], |
| T_a | povprečna temperatura zraka [°C]. |

d) Taljenje zaradi latentne toplote (16) (Singh in Singh, 2001):

$$M_e = 0,44vT_d \quad (16)$$

| | |
|-------|---|
| M_e | višina staljenega snega zaradi latentne toplote [mm/dan], |
| v | hitrost vetra [km/h], |
| T_d | temperatura rosišča [°C]. |

Za temperaturo rosišča lahko privzamemo minimalno temperaturo zraka.

e) Združeni konvekcijsko-kondenzacijski enačbi (17 in 18) (Harr, 1981):

Ti enačbi veljata samo v primeru dežja. Če predpostavimo, da je ob deževnem vremenu zrak zasičen, lahko temperaturo zraka uporabimo kot kazalec taljenja snega zaradi konvekcije in kondenzacije.

- Združena konvekcijsko-kondenzacijska enačba (17) na negozdnatih tleh:

$$M_{ce} = 0,086vT_a \quad (17)$$

- Združena konvekcijsko-kondenzacijska enačba (18) na močno gozdnatih tleh:
Predpostavljena hitrost vetra pod krošnjami je 2,4 m/s.

$$M_{ce} = 0,206T_a \quad (18)$$

| | |
|----------|---|
| M_{ce} | višina staljenega snega zaradi latentne in zaznavne toplote [cm/dan], |
| v | hitrost vetra na 15 m nad površino snežne odeje [m/s], |
| T_a | temperatura zraka [°C]. |

f) Taljenje zaradi dežja (19) (USACE, 1998):

$$M_r = 0,0125 T_r P_r \quad (19)$$

| | |
|-------|--|
| M_r | višina staljenega snega zaradi toplote, ki jo dovaja dež [mm/dan], |
| T_r | temperatura dežja [°C], |
| P_r | dnevne padavine [mm]. |

g) Taljenje zaradi talne toplote

Zadnji vir energije, ki prispeva k taljenju snega izhaja iz tal pod snežno odejo. Ko postane snežna odeja dovolj debela, da izolira vplive med tlemi in nizkimi temperaturami nad snežno odejo, tla začnejo v snežno odejo oddajati toplotno energijo, ki pospeši taljenje. Terenske raziskave so podale povprečno vrednost vpliva tal na taljenje, ki znaša od 0,025 do 0,076 cm/dan (USACE, 1998).

6.2.1.1 Posplošene enačbe v primeru dežja

Za praktično inženirsko uporabo so zgornje enačbe pogosto združene v posplošene enačbe, ki so namenjene reševanju računanja staljenega snega v točno določenih meteoroloških pogojih in določenem obsegu gozdnih površin. To se doseže z uvedbo konstant, ki predstavljajo srednjo izpostavljenost povodja sončnemu sevanju ali vetru. To podpoglavje predstavlja enačbe za uporabo v pogojih, ki zajemajo dežne padavine in različno stopnjo pokritosti povodja z gozdom (USACE, 1998). Preglednica 6 je glavna smernica, ki ji moramo slediti pri izbiri ustrezne enačbe.

Preglednica 6: Klasifikacija gozdnatosti (USACE, 1998).

| Opis kategorije | Povprečen obseg gozdnih površin [%] |
|--------------------|-------------------------------------|
| Močno gozdnata tla | >80 |
| Gozdnata tla | 60–80 |
| Delno gozdnata tla | 10–60 |
| Negozdnata tla | <10 |

Uporaba enačb iz energijske bilance je za izračun taljenja snega najpreprostejša v situaciji, ko na snežno odejo pada dež, saj je takrat sončno sevanje minimalno in atmosfera predpostavljeno nasičena. Za razmere, ko na snežno odejo pada dež, sta bili razviti dve enačbi (20 in 21) (USACE, 1998):

a) Negozdnata in delno gozdnata tla:

$$M = (1.33 + 0,293kv + 0,0126P_r) T_a + 2,3 \quad (20)$$

b) Gozdnata tla:

$$M = (3.38 + 0,0126P_r) T_a + 1,3 \quad (21)$$

| | |
|-------|--|
| M | višina staljenega snega [mm/dan], |
| k | vetrni koeficient povodja, |
| v | hitrost vetra na 15 m višine [km/h], |
| P_r | dnevne padavine [mm], |
| T_a | povprečna temperatura zasičenega zraka [°C]. |

Koeficient izpostavljenosti vetru (k), ki velja za celotno povodje bi bil v primeru, ko nimamo gozda enak 1, v primeru večje gozdnatosti pa lahko celo 0,3 (odvisno od gostote gozdnih površin). Ta dejavnik lahko ocenimo iz topografskih kart in letalskih posnetkov, vendar je najbolje, da ga potrdimo z umerjanjem modela (USACE, 1998).

6.2.1.2 Posplošene enačbe v primeru, ko ni dežja

Računanje taljenja snega je v primeru, ko je nebo jasno in posledično ni dežnih padavin bolj zapleteno, kot v primeru dežja. V enačbe mora biti vključena tudi spremenljivka zaradi vpliva sončnega sevanja, razen v primeru večje gozdnatosti. Potrebno je uvesti dodatne spremenljivke kot sta albedo in oblačnost. V tem primeru ne moremo predpostaviti, da je zrak nasičen, zaradi česar je rosišče potrebno uporabljati kot spremenljivko (USACE, 1998).

V enačbah 22, 23, 24, in 25 (USACE, 1998) se opiramo na preglednico 6, ki ponazarja klasifikacijo gozdnatosti.

a) Negozdnata tla:

$$M = k'(1 - F)(3,08 I_i)(1 - a) + (1 - N)(0,969T'_a - 21,34) + N(1,33T'_c) + k(0,239v)(0,22T'_a + 0,78T'_d) \quad (22)$$

b) Delno gozdnata tla:

$$M = k'(1 - F)(2,43 I_i)(1 - a) + k(0,239v)(0,22T'_a + 0,78T'_d) + F(1,33T'_a) \quad (23)$$

c) Gozdnata tla:

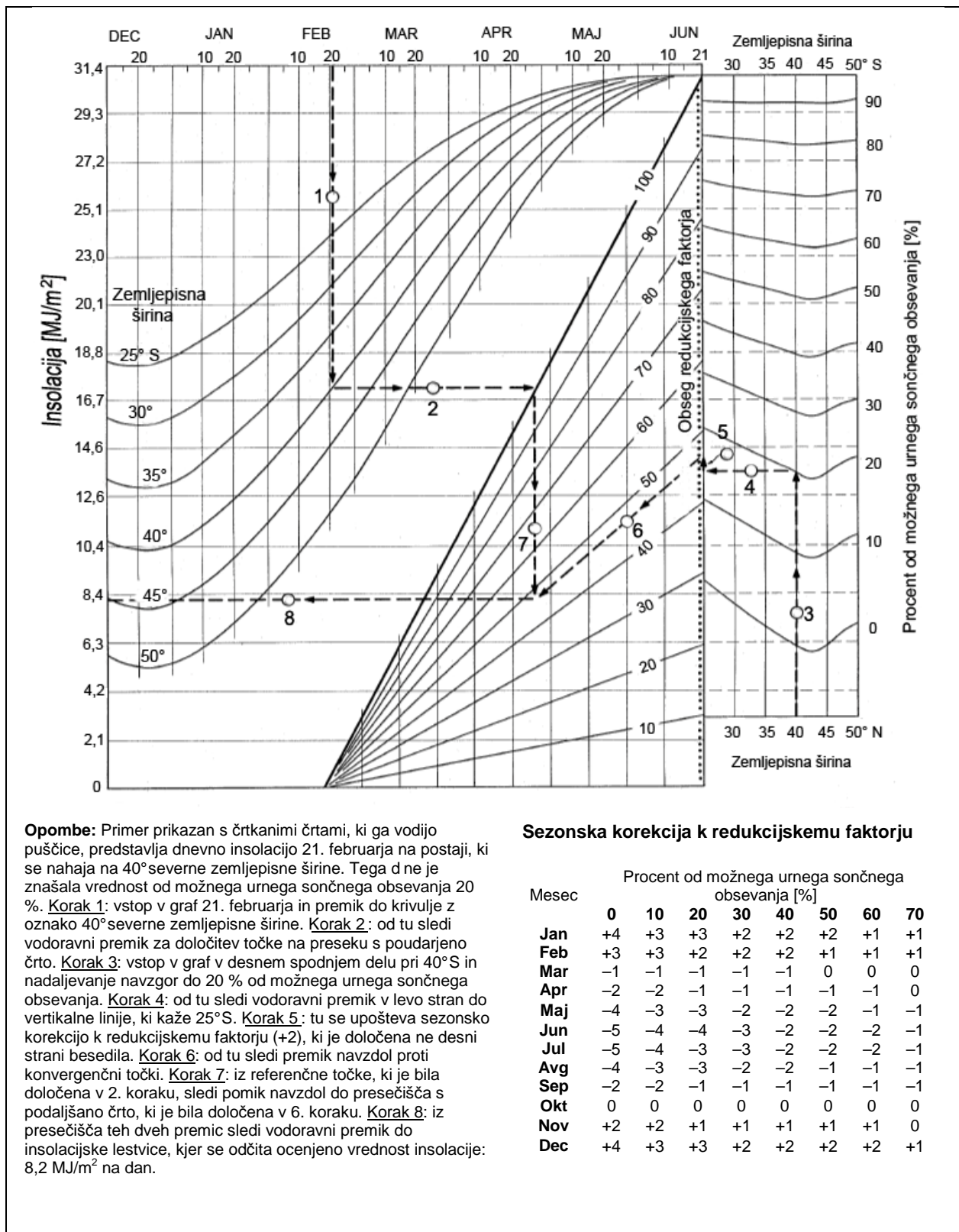
$$M = k(0,239v)(0,22T'_a + 0,78T'_d) + F(1,33T'_a) \quad (24)$$

d) Močno gozdnata tla:

$$M = 3,38(0,53T'_a + 0,47T'_d) \quad (25)$$

| | |
|--------|---|
| M | višina staljenega snega [mm/dan], |
| k' | faktor taljenja zaradi kratkovalovnega sevanja, |
| F | povprečen obseg gozdnih površin v povodju, izražen kot decimalna vrednost, |
| I_i | insolacija [MJ/m^2], |
| a | povprečni albedo snega, |
| N | ocenjena oblačnost, izražena kot decimalna vrednost, |
| T'_a | razlika med T zraka (izmerjena na višini 3 m) in T površja snežne odeje [$^{\circ}\text{C}$], |
| T'_c | razlika med T v spodnjem delu oblaka in T površja snežne odeje [$^{\circ}\text{C}$], |
| k | konvekcijsko-kondenzacijski faktor taljenja, |
| T'_d | razlika med T rosišča (izmerjena na višini 3 m) in T površja snežne odeje [$^{\circ}\text{C}$], |
| v | hitrost vetra na višini 15 m [km/h]. |

Insolacijo, ki predstavlja količino neposrednega sončnega obsevanja, ki pade na enoto vodoravne površine, se meri le na nekaterih meteoroloških postajah. Zato je malo verjetno, da bi lahko opazovanja sončnega obsevanja v preteklosti, neposredno uporabili kot vložek v modelu (npr. za umerjanje modela). Ker je vremenskih postaj za merjenje insolacije zelo malo, so na podlagi datuma, trajanja sončnega obsevanja in zemljepisne širine za oceno insolacije razvili nomogram za oceno le-tega (slika 23) (USACE, 1998).



Slika 23: Nomogram za oceno insolacije kot funkcija zemljepisne širine, datuma in trajanja sončnega obsevanje (USACE, 1998)

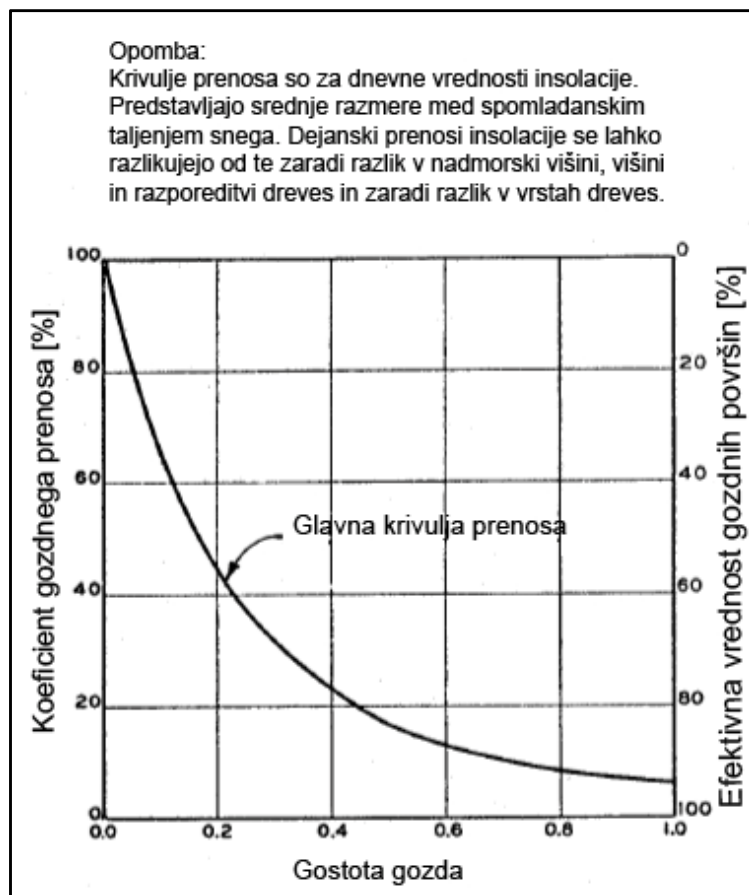
Meritve za določevanje albeda (a) na površini snega niso redne, zato je to vrednost potrebno oceniti na podlagi preizkusov v laboratoriju. Albedo na površju snežne odeje je podrobneje razložen v poglavju 4.4 in za določevanje le-tega uporabljamo graf, ki je predstavljen na sliki 16. Albedo je možno določiti tudi z računalniškimi simulacijami kot funkcijo upadanja, po enačbi 26:

$$a = e(f)^{N^g} \quad (26)$$

- a albedo na površini snežne odeje,
 N število dni od zadnjih snežnih padavin,
 e, f, g eksperimentalni koeficienti.

Vrednosti sončnega sevanja so običajno določene z merjenjem na vodoravni površini. Na povodjih, kjer je izpostavljenost soncu obrnjena pretežno proti severu ali jugu moramo v enačbo za taljenje vpeljati še koeficient taljenja zaradi kratkovalovnega sevanja (k'). Vrednost koeficienta k' bi bila enaka 1 na povodju, ki je pretežno vodoravno ali na povodju, katerega južna in severna pobočja so površinsko uravnotežena. V spomladanskem času se vrednost koeficienta giblje od 0,9 do 1,1 (USACE, 1998).

Za delno gozdnata povodja je potrebno oceniti efektivno vrednost gozdnih površin (F), ki se uporablja za določitev taljenja snega zaradi kratko- in dolgovalovnega sevanja. Koeficient F predstavlja povprečen delež povodja, ki je izvzet iz neposrednega sončnega sevanja zaradi gozda, izražen kot decimalni ulomek. Določitev koeficienta F mora temeljiti na delno subjektivni oceni gozdnih značilnosti, kot sta gostota in razmik gozdnih sklopov, oceni zemljepisne širine in oceni dnevnih učinkov gozda na senčenje. Slika 24, s pomočjo katere določimo koeficient F , prikazuje prenos sončne energije skozi gozd z različno gostoto (USACE, 1998).



Slika 24: Krivulja srednjega prenosa za dnevno insolacijo, izražena glede na gostoto gozda (USACE, 1998)

6.2.1.3 Primeri izračuna taljenja snega za predpostavljene vremenske pogoje v obdobju z in brez padavin

V preglednici 7 je opisanih sedem domnevnih primerov, skupaj s predpostavljenimi meteorološkimi pogoji. Prvi štirje predstavljajo razmere brez dežnih padavin, zadnji trije pa situacijo s padavinami. Količine staljenega snega so izračunane s pomočjo primernih posplošenih enačb, ki so predstavljene v prejšnjih dveh podpoglavjih. Iz preglednice 8 je razvidno, da ima v obdobju brez dežja pri taljenju zelo pomembno vlogo kratkovalovno sevanje, prav tako pa je razvidno, kako na taljenje vplivata spremenjena oblačnosti in albedo. V obdobju dežja je viden prevladujoč vpliv taljenja zaradi kondenzacije, vidi pa se tudi vpliv vetra na kondenzacijo. V nasprotju s kondenzacijo je vpliv dežja relativno majhen tudi v primeru obilnejših padavin.

Primeri 1 in 3 v preglednici 7 ponazarjata vpliv oblačnosti v primeru, ko ni dežnih padavin. Delujeta dva dejavnika in sicer: kratkovalovno sevanje se zmanjša zaradi prisotnosti oblakov, neto dolgovalovno sevanje pa se zaradi zmanjšane Zemljinega sevanja in povečanega

povratnega sevanja od oblakov poveča. Zatorej ti dve komponenti ena drugo uravnovešata. To pomeni, da ko je enkrat določena največja možna stopnja insolacije za določen čas v letu, na določeni zemljepisni širini, je oblačnost v splošni enačbi na nek način neobčutiljiva spremenljivka (USACE, 1998).

Preglednica 7: Količina staljenega snega na podlagi določljivih meteoroloških spremenljivk (USACE, 1998).

a) Predpostavljeni vremenski pogoji (T_a – temperatura zraka, T_d – temperatura rosišča, I_i – insolacija P_r – dnevne padavine, v – povprečna hitrost vera):

| Primer | Vremenski pogoji | T_a [°C] | T_d [°C] | I_i [MJ/m ²] | P_r [mm] | v [km/h] |
|--------|---|------------|------------|----------------------------|------------|------------|
| 1 | Jasen, vroč poletni dan. Ni gozdnih površin, albedo = 40 %. | 21 | 7 | 30 | 0 | 5 |
| 2 | Jasen, vroč poletni dan. 40 % gozdnih površin. | 21 | 7 | 30 | 0 | 5 |
| 3 | Vroč poletni dan. Oblačno. | 18 | 10 | 20 | 0 | 5 |
| 4 | Jasen, vroč poletni dan. Novozapadli sneg, albedo = 70 %. | 21 | 7 | 30 | 0 | 5 |
| 5 | Toplo, vetrovno in deževno. Ni gozdnih površin. | 10 | 10 | 0 | 76,2 | 25 |
| 6 | Toplo in vetrovno. Rahel dež. Ni gozdnih površin. | 10 | 10 | 0 | 12,7 | 25 |
| 7 | Toplo in rahlo vetrovno. Rahel dež. Ni gozdnih površin. | 10 | 10 | 0 | 12,7 | 5 |

b) Dnevne količine staljenega snega (M_{sw} – količina staljenega snega zaradi kratkovalovnega sevanja, M_l – količina staljenega snega zaradi dolgovalovnega sevanja, M_{ce} – količina staljenega snega zaradi zaznavne in latentne toplote, M_r – količina staljenega snega zaradi dežja, M_g – količina staljenega snega zaradi talne toplote):

| Primer | M_{sw} [mm] | M_l [mm] | M_{ce} [mm] | M_r [mm] | M_g [mm] | ΣM [mm] | $\Sigma M + \text{dež}$ [mm] |
|--------|---------------|------------|---------------|------------|------------|-----------------|------------------------------|
| 1 | 54,1 | -0,8 | 11,5 | 0,0 | 0 | 64,8 | 65,28 |
| 2 | 25,7 | 11,2 | 7,1 | 0,0 | 0 | 44,0 | 43,94 |
| 3 | 38,6 | 8,6 | 13,4 | 0,0 | 0 | 60,6 | 60,98 |
| 4 | 27,2 | -0,8 | 11,8 | 0,0 | 0 | 38,2 | 38,35 |
| 5 | 1,3 | 13,2 | 57,6 | 9,7 | 0,5 | 82,3 | 158,5 |
| 6 | 1,3 | 13,2 | 57,6 | 1,5 | 0,5 | 74,1 | 86,8 |
| 7 | 1,3 | 13,2 | 11,7 | 1,5 | 0,5 | 28,2 | 40,9 |

6.2.2 Računanje s pomočjo temperaturnega indeksa

Metoda s pomočjo temperaturnega indeksa predstavlja drugo osnovno enačbo (enačba 27) računanja taljenja snežne odeje. Ta metoda uporablja temperaturo zraka kot indeks (kazalnik) taljenja snežne odeje. S pomočjo te metode se rešuje temeljno težavo v uporabni snežni hidrologiji, zlasti pri napovedovanju pretoka rek, saj metode z uporabo energijske bilance včasih ni mogoče izvesti zaradi pomanjkljivih podatkov (USACE, 1998).

$$M_s = C_m(T_a - T_b) \quad (27)$$

- M_s višina staljenega snega [mm/dan],
 C_m koeficient stopnje taljenja [mm/°C na dan],
 T_a temperatura zraka [°C],
 T_b temperatura snežne odeje [°C].

Za temperaturo snežne odeje (T_b) vzamemo vrednost 0 °C, saj taljenje običajno nastopi pri tej temperaturi. Koeficient stopnje taljenja se običajno giblje med 1,8 in 3,7 mm/°C. Temperaturni parameter je odvisen od fizikalnih lastnosti snežne odeje, ki se s časom spreminjajo. Posledično se spreminja tudi vrednost C_m , ki je nizka na začetku sezone taljenja in proti koncu sezone vedno višja. V literaturi se pojavljajo različne vrednosti za koeficient stopnje taljenja. V preglednici 8 so prikazane vrednosti, ki jih je na podlagi večletnega raziskovanja v treh snežnih laboratorijih določilo združenje ameriških vojaških inženirjev (*angl.* U.S. Army Corps of Engineers).

Preglednica 8: Koeficient stopnje taljenja, glede na različne pogoje (USACE, 1998).

| Primer | T_a [°C] | T_b [°C] | Staljeni sneg [mm] | C_m [mm/°C] | Vremenski pogoji |
|--------|------------|------------|--------------------|---------------|--------------------------------------|
| 1 | 21 | 0 | 65,28 | 1,73 | Sončen, topel dan, nizek albedo. |
| 2 | 21 | 0 | 60,96 | 1,85 | Sončen, topel dan, 40 % gozda. |
| 3 | 18 | 0 | 38,35 | 1,02 | Topel dan, oblačno. |
| 4 | 21 | 0 | 43,94 | 1,17 | Sončen, topel dan, novozapadli sneg. |
| 5 | 10 | 0 | 82,30 | 4,57 | Močan dež, vetrovno. |
| 6 | 10 | 0 | 74,17 | 4,14 | Rahel dež, vetrovno. |
| 7 | 10 | 0 | 28,19 | 1,57 | Rahel dež, rahlo vetrovno. |

Preglednica 9 prikazuje razliko v vrednosti koeficienta stopnje taljenja na gozdnatem in odprtem območju glede na količino tekočih padavin.

Preglednica 9: Koeficient stopnje taljenja na gozdnatih in odprtih površinah ob deževnem vremenu (Singh in Singh, 2001: str. 259).

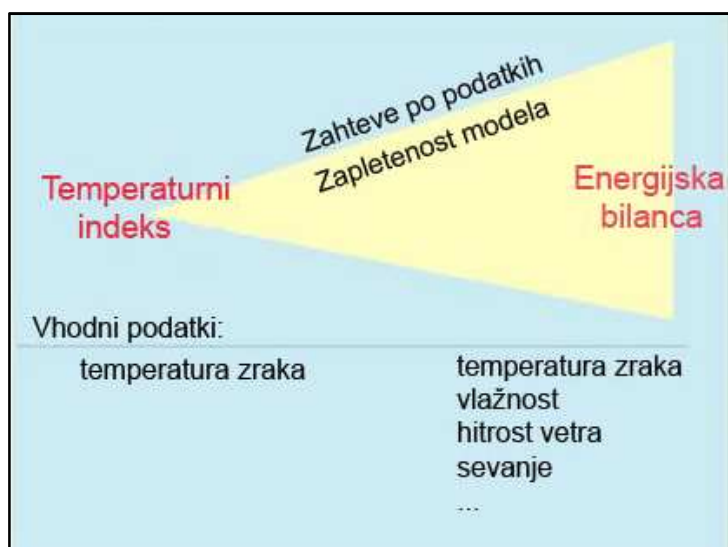
| Padavine [mm] | C_m [mm/°C na dan] odprte površine | C_m [mm/°C na dan] gozdne površine |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 0–1,0 | 3,21 | 2,16 |
| 1.0–10,0 | 3,33 | 2,33 |
| >10,0 | 3,38 | 2,79 |

6.2.3 Primerjava osnovnih metod za računanje taljenja snežne odeje

Primerjava metode temperaturnega indeksa in metode energijske bilance (slika 25) kaže tako na prednosti kot na slabosti posameznega pristopa. Prednost metode temperaturnega indeksa je v vrednosti primarnega indeksa – temperature zraka, ki je pogosto opazovan in njegova prostorska variabilnost je v večini primerov zadovoljivo ocenjena. Slabost tega pristopa je, da je to indeksna metoda in v zvezi med temperaturo zraka in toplotno izmenjavo na površini snežne odeje lahko pride do pomembnih razhajanj. Prednost uporabe teoretičnega pristopa prenosa toplote (metoda energijske bilance) je, da so ta razhajanja zmanjšana. Slabost tega pristopa pa leži v podatkih, ki jih metoda zahteva. V večini primerov nekatere od spremenljivk niso opazovane in morajo biti zato ocenjene: ocena sončnega sevanja iz odstotka sončnega obsevanja ali oblačnosti; ocena atmosferskega dolgovalovnega sevanja iz temperature zraka in parnega pritiska; ocena albeda na podlagi časa od zadnjega sneženja. Te ocene pa povzročijo napake: npr., število sončnih ur se na dani lokaciji spreminja od dneva do dneva, meseca do meseca, prav tako se spreminja tudi urni vpliv sončnega sevanja, ki se spreminja z višino (Singh in Singh, 2001). Primerjava obeh metod je povzeta v preglednici 10.

D.M. Rockwood (1972) je poročal, da je metoda s temperaturnim indeksom zaradi majhne zahteve po podatkih najbolj praktičen način za dnevne napovedi pretokov. Izbira metode, za določeno vrednotenje, je odvisna od vrste uporabe. Za napovedovanje lastnosti poplav na teoretični osnovi, pa ima zaradi potrebe po vzpostavitvi zgornjih mej v številnih funkcijah, s katerimi računamo taljenje snega, prednost pristop z uporabo energijske bilance.

V odtoku, ki ga povzroči taljenje snega, kaže odnos med temperaturo zraka in sevanjem visoke vrednosti korelacijskega koeficienta. Ti rezultati kažejo, da bi temperatura zraka in sevanje lahko razložila večino odtoka zaradi taljenja snega v obdobju brez tekočih padavin. E.A. Anderson je leta 1973 izvedel natančno analizo energijske bilance in ponovno preučil nekatere izsledke združenja ameriških vojaških inženirjev (*angl.* U.S. Army Corps of Engineers). Izkazalo se je, da obe metodi, preizkušeni s podatki, pridobljenimi s pomočjo snegomera in snežne blazine, dajeta podobne rezultate (Singh in Singh, 2001).



Slika 25: Primerjava modela temperaturnega indeksa in modela energijske bilance (Glacier meteorology, 2010)

Preglednica 10: Primerjava metode temperaturnega indeksa in metode energijske bilance (Glacier meteorology, 2010).

| | Temperaturni indeks | Energijska bilanca |
|------------------|--|---|
| Prednosti | <ul style="list-style-type: none"> • Široka dostopnost temperaturnih podatkov; • Enostavna interpolacija in napovedovanje; • Dobro delovanje modela; • Preprosto računanje. | <ul style="list-style-type: none"> • Fizikalna osnova – ustrežnejše opisani fizikalni procesi; • Napovedi so zanesljivejše. |
| Slabosti | <ul style="list-style-type: none"> • Temeljijo na empirični in ne fizikalni osnovi; • Koeficient stopnje taljenja je spremenljiv, deluje ob »povprečnih« pogojih; • Ne deluje v tropih; • Stabilnost parametrov v modelu je v drugačnih podnebnih razmerah vprašljiva. | <ul style="list-style-type: none"> • Velike zahteve po podatkih (pogosto niso na voljo). |

Modela temperaturnega indeksa in energijske bilance sta koristni orodji, katerih izbira je odvisna od razpoložljivih podatkov. Oba modela je potrebno umerjati (uravnavanje parametrov). Pri sami izbiro, se moramo zavedati omejitev, ki jih ima posamezna metoda. Znanstveniki so opozorili na potrebe po drugih pristopih, ki bi predstavljali neko vmesno kompleksnost in zahtevo po zmernem številu vhodnih podatkov (Glacier meteorology, 2010).

6.3 Program HEC-HMS

HEC-HMS za izračun stopnje taljenja snežne odeje uporablja metodo temperaturnega indeksa, ki temelji na temperaturi zraka in razmerah v snežni odeji. Koncept "cold content" je v izračunu vključen na ta način, da se upošteva sposobnost snežne odeje, da zamrzne tekočo vodo, ki v snežno odejo vstopi zaradi dežja. S pomočjo podatkov o temperaturi program določi ali so predhodno izračunane padavine dež ali sneg. Končni rezultat te metode je tekoča voda, ki postane površinski odtok porečja.

Inženirji do danes v program HEC-HMS še niso prenesli vseh funkcij, ki so na voljo v programu HEC-1, delujočem v MS-DOS operacijskem sistemu. Program HEC-1 je ponuja možnost izbire ocene pretoka zaradi taljenja snega s pomočjo energijske bilance in temperaturnega indeksa, torej je bil kompleksnejši in posledično natančnejši.

6.3.1 Vhodni podatki za metodo temperaturnega indeksa

Metoda temperaturnega indeksa je razširitev pristopa stopinja/dan, k modeliranju snežne odeje. Tipičen pristop te metode je, da upošteva ustaljeno količino staljenega snega za vsako stopinjo nad lediščem. Ta metoda vključuje konceptualno predstavitev hladne energije shranjene v odeji, skupaj z omejenim spominom o preteklih razmerah in drugimi dejavniki, ki jih je potrebno upoštevati za izračun višine taline za vsako stopinjo nad lediščem. Ko se vremenske razmere in notranje razmere v snežni odeji spremenijo, se spremeni tudi koeficient taljenja. Slika 26 prikazuje okence iz programa HEC-HMS, v katerega se vnaša vhodne parametre po metodi temperaturnega indeksa. V preglednici 11 so ti parametri razloženi in so enaki za vsa obravnavana podpovodja v modelu, torej so enaki tudi za vse višinske cone.

Slika 26: Vhodni parametri metode temperaturnega indeksa v meteorološkem modelu programa HEC-HMS

Preglednica 11: Vhodni parametri metode temperaturnega indeksa v meteorološkem modelu, ki so za vsa obravnavana podpovodja enaki.

| | |
|---------------------------------------|--|
| PX Temperature [°C] | <u>Temperatura PX</u> se uporablja za razlikovanje med dežnimi in snežnimi padavinami. Ko je temperatura zraka nižja od izbrane temperature PX se predvideva snežne padavine, v nasprotnem primeru se predvideva dežne padavine. Temperatura PX je običajno eno do dve stopinj nad lediščem. |
| Base Temperature [°C] | Nad <u>temperaturno mejo</u> se prične taljenje snega. Če je temperatura zraka nižja od te temperature se predvideva, da se ni stalilo nič snega. Običajno je temperaturna meja enaka nič ali blizu ničle. |
| Wet Meltrate [mm/°C na dan] | <u>Mokra vrednost taljenja</u> se uporablja med obdobji padavin v obliki dežja, pri vrednostih večjih od mejne stopnje dežja. Predstavlja vrednost pri kateri se topi sneg medtem ko dežuje. |
| Rain Rate Limit [mm/dan] | <u>Mejna vrednost dežja</u> razlikuje med suhim in mokrim taljenjem. Mokra vrednost taljenja se uporablja za stopnjo taljenja ko dežuje pri vrednostih, večjih od mejne stopnje dežja. Če je vrednost dežnih padavin nižja od mejne vrednosti dežnih padavin, se vrednost taljenja izračuna kot če padavin ne bi bilo. |

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 11

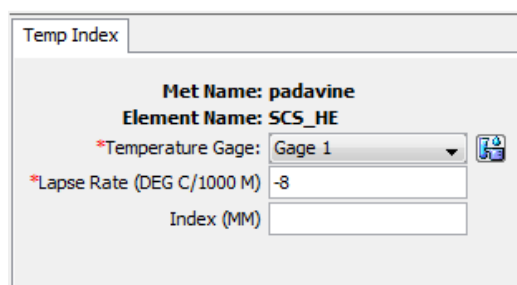
| | |
|---------------------------------|---|
| ATI-Meltrate Coefficient | <p>Stopnja taljenja mora biti izračunan tudi za časovne intervale, ko je vrednost padavin manjša od mejne vrednosti dežja. Izračun se začne s <u>predhodnim temperaturnim indeksom (ATI) stopnje taljenja</u>. Za posodabljanje predhodnega indeksa stopnje taljenja iz enega časovnega intervala na naslednjega se uporablja koeficient, katerega tipična vrednost je 0.98 (Scharffenberg in Fleming, 2010). ATI stopnja taljenja pri modeliranju upošteva, da se z zorenjem snežne odeje taljenje povečuje. Zorenje se začne, ko je zrak temperature nad lediščem. Dnevni cikel povzroča taljenje ledenih kristalov v snegu, ki nato ponovno zamrznejo, medtem pa se povprečna velikost ledenih kristalov poveča. Večji ledeni kristali odbijejo manj sončnega sevanja, zato se vanje absorbira več energije, kar pa poveča stopnjo taljenja pri isti temperaturni razliki (USACE, 2011).</p> |
| Cold Limit [mm/dan] | <p><u>Hladna meja</u> razloži hitre spremembe v temperaturi, katerim je podvržen sneg med obilnimi padavinami. Ko vrednost padavin preseže določeno hladno mejo, je predhodni "cold content" indeks nastavljen na temperaturo padavin. Če je temperatura padavin nad osnovno temperaturo, je "cold content" indeks nastavljen na osnovno temperaturo. Če je temperatura padavin nižja od osnovne temperature, je "cold content" indeks nastavljen na dejansko temperaturo. Če je vrednost padavin manjša od hladne meje, pa je "cold content" izračunan kot predhodni indeks. Tipična vrednost hladne meje je 20 mm/dan (Scharffenberg in Fleming, 2010).</p> |
| ATI-Coldrate Coefficient | <p>Koeficient predhodnega "cold content" temperaturnega indeksa se uporablja za posodabljanje predhodnega "cold content" indeksa iz enega časovnega intervala do naslednjega. Tipična vrednost koeficienta je 0,84 (Scharffenberg in Fleming, 2010). <u>ATI stopnje hlajenja</u> določa, kako hitro energija prodira v sneg.</p> |
| Water Capacity [%] | <p>Zmožnost maksimalnega <u>zadrževanja tekoče vode</u> določa količino staljene vode, ki se mora nakopičiti v snežni odeji, preden tekoča voda postane na površini tal na voljo za infiltracijo ali odtok. Običajno je največje zadrževanje tekoče vode v snežni odeji od 3 do 5 % snežnega vodnega ekvivalenta, lahko pa je tudi višje (Scharffenberg in Fleming, 2010). Tekoča voda lahko v snegu vztraja le, če je temperatura snežne odeje enaka 0 °C, pri tem pa je "cold content" enak nič.</p> |

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 11

| | |
|-------------------------------|--|
| Groundmelt [mm/dan] | <u>Taljenje zaradi toplih tal</u> se začne v spodnjem delu snežne odeje, če snežna odeja leži na delno ali popolnoma odmrznjenih tleh. V takem primeru so topla tla izolirana s snežno odejo. Za določanje taljenja snežne odeje zaradi kontakta z odmrznjenimi tlemi sta na voljo dve metodi. V našem primeru smo se zaradi kratkega obdobja modeliranja odločili za konstantno vrednost, ki se glede na vremenske razmere nad snežno odejo in čas v letu ne spreminja. Druga možnost pa je, da program določi stopnjo taljenja zaradi toplote tal glede na čas v letu. |
|-------------------------------|--|

Slika 27 prikazuje okence iz programa HEC-HMS, v katerega se vnaša vhodne parametre metode temperaturnega indeksa, ki so za vsako obravnavano podpovodje drugačni.



Slika 27: Vhodni parametri metode temperaturnega indeksa v meteorološkem modelu, ki jih določimo za vsako podpovodje

Vsako podpovodje mora imeti določen temperaturni gradient, ki določa za koliko °C se zniža temperatura zraka pri povečanju nadmorske višine za 1000 m. Temperaturni gradient je negativen, če je zrak hladnejši na visoki nadmorski višini, kot na nizki nadmorski višini.

Vsako povodje je razdeljeno na enega ali več višinskih pasov (slika 28) in vsak pas ima svoje parametre (preglednica 12). En višinski pas se lahko uporablja kadar obravnavamo povodja z zelo majhnimi spremembami višine terena. Pri povodjih z velikimi višinskimi razlikami pa moramo uporabiti več višinskih pasov.

Temp Index Band 1

Met Name: padavine
Element Name: SCS_HE
Band Name: Band 1

*Percent (%) 25,47
 *Elevation (M) 860
 Index (MM)
 *Initial SWE (MM) 110
 *Initial Cold Content (MM) 0
 *Initial Liquid Water (MM) 0
 *Initial Cold Content ATI (DEG C) 0
 *Initial Melt ATI (DEGC-DAY) 0

Slika 28: Vhodni parametri najnižjega višinskega pasu

Preglednica 12: Vhodni parametri metode temperaturnega indeksa v meteorološkem modelu, določeni za vsak višinski pas.

| | |
|-------------------------------------|--|
| Percent [%] | Delež povodja, ki ga zastopa posamezen višinski pas. |
| Elevation [m] | Povprečna nadmorska višina pasu. Ne zahteva se, da sta dva višinska pasova stična. Odstotek, določen za posamezno višin pasu je samodejno popravljen, če vsota odstotkov v vseh povodjih ni enaka 100. Število višinskih pasov je neomejeno, vendar je za zagon modela potreben vsaj eden. |
| Initial SWE [mm] | Vrednost <u>snežnega vodnega ekvivalenta</u> iz začetka simulacije. Ta podatek se navadno določi z interpolacijo iz dejanskih meritev snežnega vodnega ekvivalenta. Če snega ni, vrednost nastavimo na nič. |
| Initial Cold Content [mm] | <u>Začetni "cold content"</u> je toplota (energija), ki je potrebna za dvig temperature snežne odeje na 0 °C in je izražena kot število, enakovredno milimetrom zamrznjene vode. Navadno ta vrednost na začetku simulacije ni znana, razen v primeru ko ni snega, takrat pa se vrednost nastavi na nič. Če vrednosti ne poznamo, se jo prav tako lahko nastavi na nič. Napaka pri tem je lahko majhna za relativno tanke in kratkotrajne snežne odeje, v globokih, sezonskih snežnih odejah pa so te napake večje. |

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 12

| | |
|---|---|
| Initial Liquid Water [mm] | Količina <u>tekoče vode</u> , ki se ob začetku simulacije zadržuje v snežni odeji. Tekoča voda lahko v snežni odeji ostane le, če je temperatura snega 0 °C. Pojavu, kjer je v snežni odeji prisotna tekoča voda, pravimo zorenje snega. Ta vrednost na začetku simulacije ni znana, razen če sneg ni prisoten, torej se lahko v tem primeru vrednost nastavi na nič. Če je sneg na začetku simulacije mrzel, je lahko ta vrednost prav tako enaka nič. |
| Initial Cold Content ATI [°C] | <u>Začetni "cold content" indeks predhodne temperature</u> je indeks temperature snega blizu površine snežne odeje. Ta vrednost se uporablja za oceno "cold content" snega. Treba jo je nastaviti na približno temperaturo, ki jo ima snežna odeja na začetku simulacije. Če začetne temperature ne poznamo, se jo lahko nastavi na 0 °C. |
| Initial Melt ATI [°C na dan] | Sezonsko nihanje stopnje taljenja se indeksira s funkcijo predhodne temperature. Ta funkcija omogoča spremembo stopnje taljenja ko sneg zori in se stara. Če na začetku simulacije na tleh ni snega se vrednost lahko nastavi na 0. Prav tako se ga lahko nastavi na 0, če se simulacija začne med ali na koncu hladnega obdobja, ko je temperatura zraka nenehno pod temperaturo podlage (Scharffenberg in Fleming, 2010). |

6.4 Program SRM

Računalniški program SRM (angl. *Snowmelt-Runoff Model*) je namenjen izdelavi simulacij in napovedi dnevnih pretokov v gorskih porečjih, kjer je taljenje snega pomemben dejavnik, ki prispeva k odtoku s porečja. V zadnjem času je bil uporabljen tudi za oceno vpliva podnebnih sprememb na višino sezonske snežne odeje in pretok. Model taljenja snežne odeje je leta 1975 razvil Jaroslav Martinec za uporabo v majhnih evropskih porečjih. Zahvaljujoč napredku satelitskega daljinskega zaznavanja snežne odeje, je bil SRM uporabljen v vedno večjih porečjih. Pred kratkim je bil modeliran odtok v povodju reke Ganges, ki ima površino 917,444 km² in razpon nadmorske višine od 0 do 8840 m. V nasprotju s prvotnimi predpostavkami se zdi, da model ne predstavlja nobenih omejitev uporabe glede na velikost območja in razpon nadmorske višine. Izračuni odtoka s pomočjo modela SRM so se izkazali kot razmeroma lahko razumljivi. Do sedaj je bil model s strani različnih agencij, inštitutov in univerz uporabljen v več kot 100 porečjih, ki se nahajajo v 29 različnih državah (Martinec in sod., 2008).

Model SRM se lahko uporablja v gorskih porečjih skoraj vseh velikosti (do sedaj od 0,76 do 917.444 km²) in na vseh nadmorskih višinah. Zagon modela se začne z znano ali ocenjeno vrednostjo pretoka in nadaljuje z vnosom spremenljivk (temperatura, padavine in pokrovnost območja s snegom) za neomejeno število dni, dokler so vrednosti spremenljivk na voljo.

Model SRM se lahko uporablja za naslednje namene:

- 1) Simulacija dnevnih pretokov v sezoni taljenja snega v enem letu, ali v zaporedju let. Da bi ocenili uspešnost modela in preverili vrednosti parametrov modela, se lahko rezultate primerja z vrednostjo izmerjenega odtoka. Simulacija lahko služi tudi za oceno vzorcev odtoka v porečjih kjer ni merilnih postaj s pomočjo satelitskega spremljanja zasneženih območij in ekstrapolacijo temperatur in padavin iz bližnjih postaj.
- 2) Kratkoročne in sezonske napovedi odtoka. Računalniški program SRM vključuje izpeljavo modificiranih (spremenjenih) krivulj praznjenja, ki povezujejo področja pokrita s snežno odejo s kumulativnimi globinami snega, ki so izračunane s programom SRM. Te krivulje omogočajo ročno ekstrapolacijo snežne pokrovnosti za nekaj dni vnaprej na podlagi temperaturne napovedi, z namenom, da je ta vhodna spremenljivka na voljo za napovedi pretokov. Modificirane krivulje praznjenja se lahko uporabi tudi za oceno snežnih zalog za sezonske napovedi odtoka.
- 3) V zadnjih letih se je model SRM uporabljal za novo nalogo: oceno potencialnega vpliva podnebnih sprememb na sezonsko snežno odejo in odtok. Računalniški program je bil spremenjen, in ustrezno dopolnjen (Martinec in sod., 2008).

Namestitev programa

Program WinSRM (različica 1.11) je bil razvit za operacijski sistem Windows (Win2000/98/95/XP), deluje pa tudi v novejših (Windows Vista, Windows 7). Po namestitvi programa moramo v nadzorni plošči zapis časa in datuma nastaviti na Angleškega (ZDA), drugače program ne bo shranjeval vnesenih podatkov in parametrov.

6.4.1 Struktura modela

Voda, ki je produkt taljenja snega in dežnih padavin, se vsakodnevno pretvori v pretok iz povodja na podlagi spodnje enačbe (28) (Martinec in sod., 2008):

$$Q_{n+1} = [c_{Sn} \cdot a_n (T_a + \Delta T_n) S_n + c_{Rn} \cdot P_n] \frac{A \cdot 1000}{86400} (1 - k_{n+1}) + Q_n k_{n+1} \quad (28)$$

- Q povprečen dnevni pretok [m^3/s],
 c koeficient odtoka, ki izraža izgube kot razmerje (odtok/padavine); c_S se sklicuje na taljenja snega, c_R na dež,
 a faktor stopinja-dan [$\text{cm}/^\circ\text{C}$ na dan]; označuje globino staljenega snega, ki je posledica 1 stopinje-dan,
 T število stopinj/dni [$^\circ\text{C}$ dan],
 ΔT Prilagoditev s pomočjo temperaturnega gradienta pri ekstrapolaciji temperature izmerjene na postaji, s povprečno nadmorsko višino porečja ali cone [$^\circ\text{C}$ dan],
 S razmerje med območjem pokritim s snegom in celotnim območjem,
 P padavine, ki prispevajo k odtoku [cm]. V naprej izbrana temperatura, T_{CRIT} , določi, če je ta prispevek dež oz. sneg, ki se obdrži na doslej neprekritem (s snegom) območju, dokler se ne pojavijo pogoji za taljenje snega,
 A velikost porečja ali cone [km^2],
 k koeficient upadanja kaže upad pretoka v obdobju brez taljenja snega ali tekočih padavin,
 n zaporedje dni v obdobju računanja pretoka.

T , S in P so spremenljivke, ki se merijo ali določijo vsak dan. c_R , c_S in temperaturni gradient potrebujemo za določanje ΔT . T_{CRIT} , k in časovna zakasnitev so parametri, ki so značilni za določeno porečje ali bolj splošno, za dano podnebje.

Če razpon nadmorske višine porečja presega 500 m je priporočljivo, da se porečje razdeli na več višinskih območji, ki si sledijo na približno 500 m nadmorske višine. Za razpon nadmorske višine 1500 m in tri višinske cone A, B in C, enačba (29) modela postane sledeča:

$$Q_{n+1} = \left\{ [c_{SA_n} a_{A_n} (T_n + \Delta T_{A_n}) S_{A_n} + c_{RA_n} P_{A_n}] \frac{A_A \cdot 1000}{86400} + [c_{SB_n} a_{B_n} (T_n + \Delta T_{B_n}) S_{B_n} + c_{RB_n} P_{B_n}] \frac{A_B \cdot 1000}{86400} + [c_{SC_n} a_{C_n} (T_n + \Delta T_{C_n}) S_{C_n} + c_{RC_n} P_{C_n}] \frac{A_C \cdot 1000}{86400} \right\} (1 - k_{n+1}) + Q_n k_{n+1} \quad (29)$$

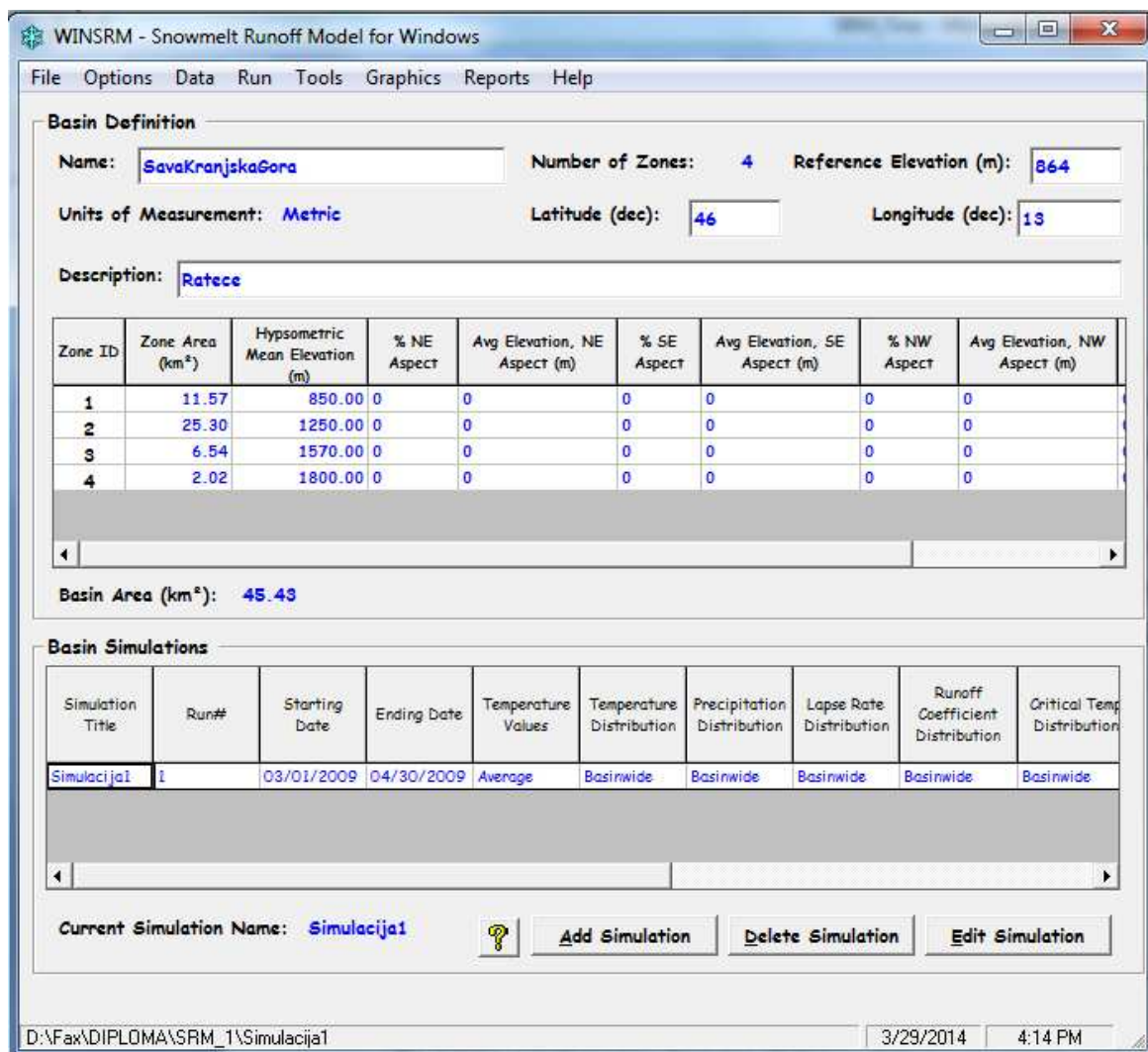
Indeksi A, B in C se nanašajo na posamezno višinsko območje.

6.4.2 Vhodni podatki za program SRM

6.4.2.1 Značilnosti porečja

Površina porečja oziroma con

Ko določimo višinsko razliko med vodotokom in najvišjo točko porečja, porečje razdelimo na višinske cone, ki jih razporedimo na približno 500 m.n.v. in jim določimo velikost v km² ter delež porečja, ki ga predstavljajo. Ko so cone določene, v model vnašamo spremenljivke in parametre za vsako cono posebej, da bi dobili čim natančnejši rezultat odtoka, ki ga povzroči taljenje snega. Za lažje delovanje programa, mora biti s pomočjo hipsometrične črte določena srednja hipsometrična višina vsake cone. Te podatke najlažje pridobimo z računalniško analizo in digitalnim modelom višin (DMV). Pri vnosu velikosti in povprečni nadmorski višini posameznih con, smo upoštevali enake podatke kot smo jih uporabili v modelu HEC-HMS. Slika 29 prikazuje glavno okno modela SRM, kjer izberemo začetni in končni datum simulacije, zapis enot, določimo število con, vpišemo nadmorsko višino meteorološke postaje ter določimo površino in povprečno nadmorsko višino vsake cone.



Slika 29: Glavno okno modela SRM

6.4.2.2 Spremenljivke

a) Temperatura

Da lahko izračunamo dnevne globine staljenega snega, je treba število stopinj/dni določiti iz meritev temperature. V program lahko vnesemo povprečne ali maksimalne in minimalne vrednosti temperatur, ki jih program sam pretvori v srednje vrednosti za vsako cono posebej. Ker se povprečne temperature nanašajo na 24-urno obdobje, ki se prične ob 6 uri zjutraj, postanejo stopinje/dnevi T [°C dan]. Prilagoditev višine ΔT se izračuna po enačbi (30):

$$\Delta T = \gamma \cdot (h_{st} - \bar{h}) \cdot \frac{1}{100} \quad (30)$$

γ temperaturni gradient [°C na 100 m],

| | |
|-----------|--|
| h_{st} | nadmorska višina temperaturne postaje [m], |
| \bar{h} | hipsometrična višina cone [m]. |

Program sprejme podatke iz ene temperaturne postaje (možnost 0, celotno porečje) ali iz več postaj (možnost 1, po conah). Pri možnostjo 0, je vpisana nadmorska višina postaje in podatki o temperaturi so ekstrapolirani na hipsometrične srednje nadmorske višine vseh con s pomočjo temperaturnega gradienta. Če je na voljo več postaj, lahko uporabnik pripravi enotno »sintetično postajo« in še vedno uporabljaj možnost 0, alternativna uporaba pa je možnost 1. Vhodni podatki o temperaturi so opisani v poglavju 9.2.

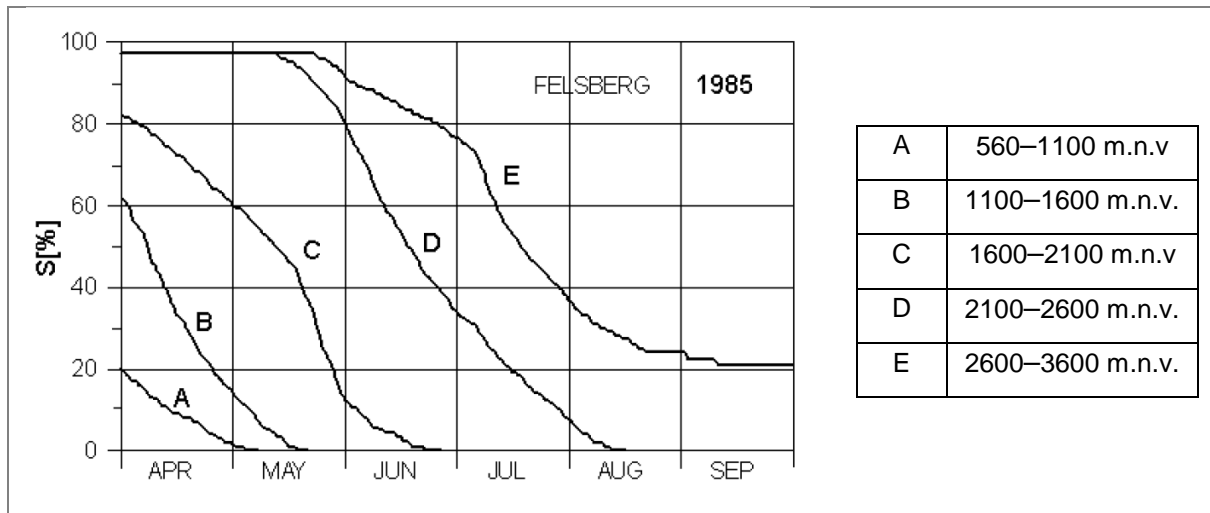
b) Padavine

V program lahko vnesemo podatke o dnevni padavinah iz ene padavinske postaje (možnost 0, celotno porečje) enako možnost uporabimo tudi v primeru, ko imamo več padavinskih postaj in združimo podatke v »sintetično postajo«. Druga možnost pa je vnašanje padavin iz različnih padavinskih postaj za vsako cono posebej (možnost 1, po conah). V povodnjih z velikimi višinskimi razlikami, kjer je na voljo le padavinska postaja na majhni nadmorski višini, lahko pride do podcenjevanja padavin v višjih conah, zato je priporočljiva ekstrapolacija padavinskih podatkov. Za razlikovanje med dežnimi in snežnimi padavinami se uporablja kritično temperaturo, ki loči ali so padavine tekoče, ali prispevajo k snežni odeji. V primeru snežnih padavin, se zakasneli vpliv na pretok obravnava različno v primeru ali je sneg padel na kopna ali zasnežena tla. Vhodni podatki o padavinah so opisani v poglavju 9.1.

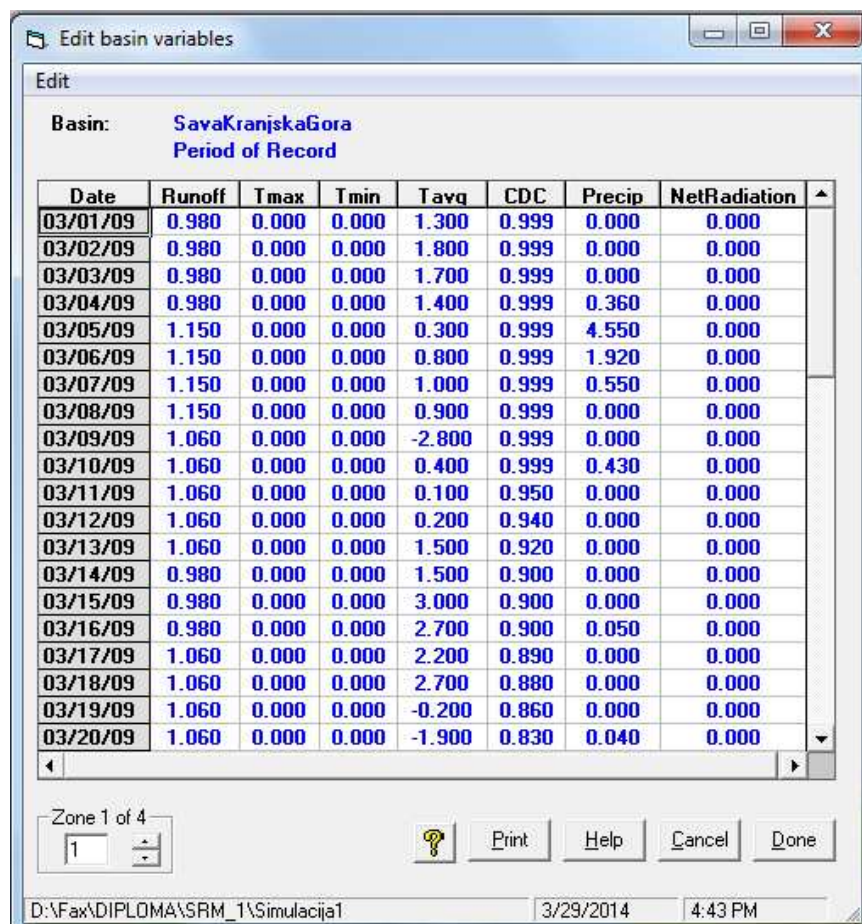
c) Območje pokrito s snegom

V gorskih porečjih se v obdobju taljenja snega površina prekrita s snežno odejo postopoma manjša. Krivulje praznjenja (slika 30) snežne pokrovnosti lahko interpoliramo iz periodičnih kartografiranj snežne odeje. Iz teh krivulj dnevno razberemo pomembne vhodne podatke SRM modela. Snežno odejo lahko kartografiramo s terenskimi opazovanji (primerno za zelo majhna porečja), s zračnimi posnetki (posebno v primerih poplav) in z najbolj učinkovito metodo, sateliti.

Slika 31 prikazuje okno modela SRM, kamor za vsako cono posebej vnašamo vrednosti spremenljivk.



Slika 30: Primer krivulj praznjenja snežne pokrovnosti povodja Felsberg za 5 višinskih con, narejenega na podlagi satelitskih posnetkov Landsata 5-MSS (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 28)



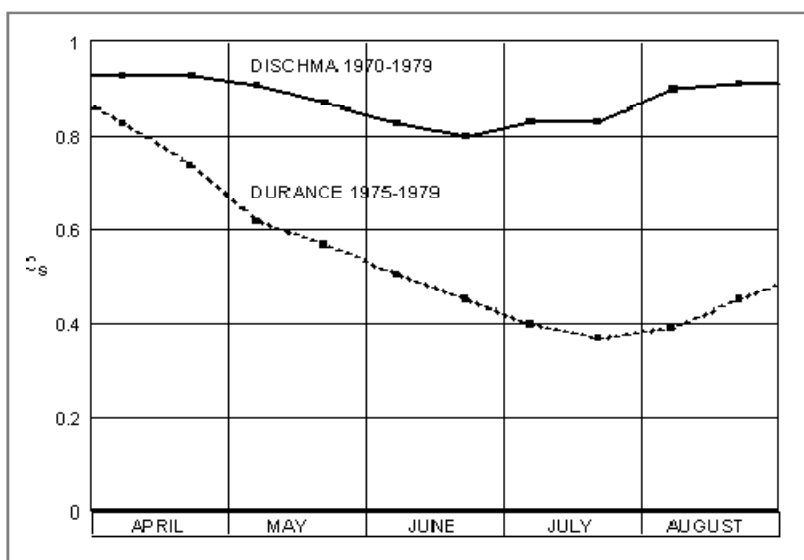
Slika 31: Okno modela SRM za vnos spremenljivk posamezne višinske cone

6.4.2.3 Parametri

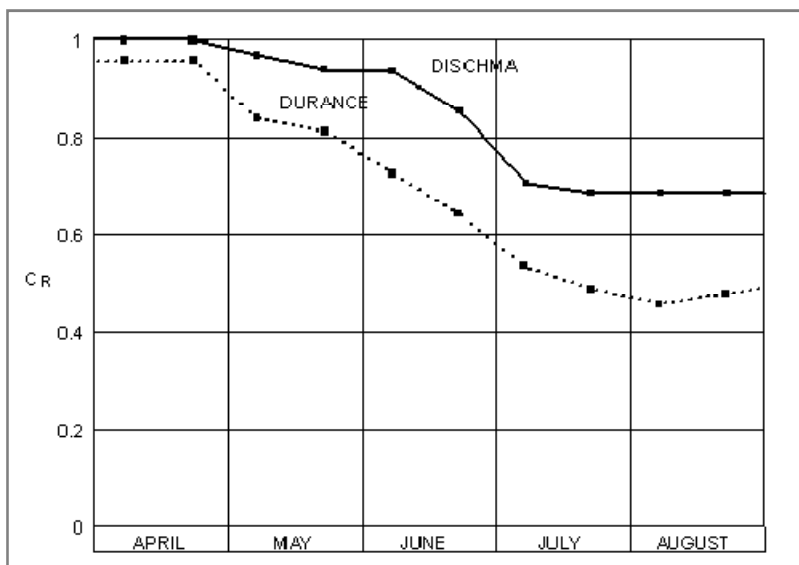
SRM parametri niso umerjeni ali optimizirani na podlagi zgodovinskih podatkov. Določimo jih na podlagi meritev ali jih ocenimo glede na hidrološko presojo na podlagi lastnosti povodja, fizičnih zakonov in teoretičnih odnosov. Občasne kasnejše spremembe ne smejo preseči meje sprejemljivih hidroloških in fizičnih vrednosti.

a) Koeficient odtoka, c

Koeficient odtoka opredeli izgube, ki so razlika med razpoložljivim volumnom vode (staljeni sneg + dež) in iztokom iz porečja. Na dolgi rok bi moral ustrezati razmerju med izmerjenimi padavinami in izmerjenim pretokom. Na začetku sezone taljenja snega, so izgube običajno zelo majhne, saj je evaporacija s površine snežne odeje zelo omejena, posebej na visokih nadmorskih višinah. Ko se ozračje prične segrevati, je kmalu nekaj površine izpostavljene in prične rasti vegetacija, zato takrat pričakujemo več izgub zaradi evapotranspiracije in prestrezanja padavin. Proti koncu sezone taljenja se v nekaterih povodjih pojavi struga direktnega toka iz preostalih snežnih polj, kar vodi v zmanjšanje izgub in večanje koeficienta odtoka (slika 32 in slika 33). Koeficient c se razlikuje za taljenje snega in dežne padavine. Program sprejme ločene vrednosti za sneg (c_S) in dež (c_R) ter omogoča pol-mesečno oziroma dnevno spreminjanje vrednosti koeficientov v vsaki višinski coni. Izmed SRM parametrov je koeficient odtoka prvi kandidat za spremembo vrednosti, če simulacija ne uspe zadovoljivo.



Slika 32: Povprečni koeficient odtoka za sneg alpskega povodja Dischma (43,3 km², 1668–3146 m.n.v.) in Durance (2170 km², 786–4105 m.n.v.) (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 31)



Slika 33: Povprečni koeficient odtoka za dež alpskega povodja Dischma (43,3 km², 1668–3146 m.n.v.) in Durance (2170 km², 786–4105 m.n.v.) (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 31)

b) Faktor stopinja/dan, a

Faktor stopinja/dan a pretvori število stopinj/dni T [°C dan] v dnevno debelino staljenega snega M [cm] po enačbi (31):

$$M = a \cdot T \quad (31)$$

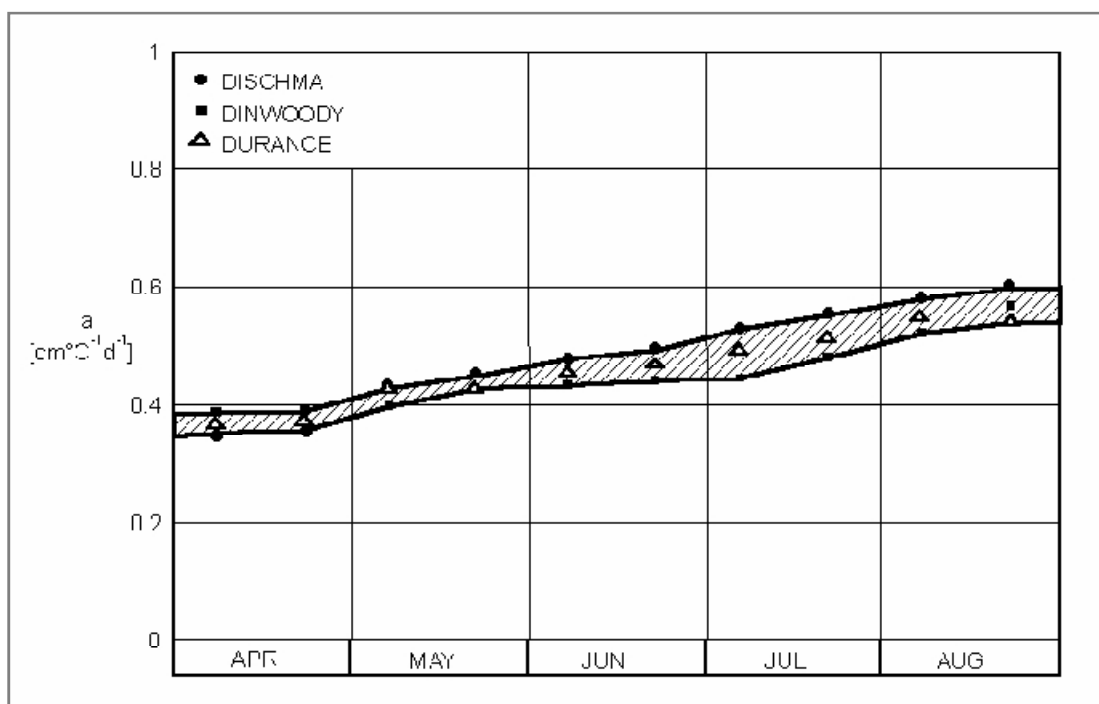
Razmerja stopnja/dan je mogoče oceniti na podlagi primerjave vrednosti stopnja/dan z dnevnim zmanjšanjem snežnega vodnega ekvivalenta, ki se ga meri z radioaktivnim merilnikom, snežno blazino ali snežnim lizimetrom. Take meritve (Martinec, 1960) so pokazale veliko spremenljivost vrednosti stopinj/dni iz dneva v dan. To je razumljivo, saj metoda stopnja/dan oziroma metoda temperaturnega indeksa ne upošteva drugih elementov energijske bilance, predvsem sončnega sevanja, hitrost vetra in latentne toplote kondenzacije.

Zaradi pomanjkljivih podatkov, je lahko faktor stopinja/dan pridobljen iz empirične zveze (enačba 32), ki jo je leta 1960 določil Matinec.

$$a = 1,1 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (32)$$

- a faktor stopinja/dan [cm/°C na dan],
- ρ_s gostota snega,
- ρ_w gostota vode.

Ko gostota snega narašča, se albedo zmanjšuje, zato vsebnost tekoče vode v snežni odeji narašča. Slika 34 prikazuje sezonski trend faktorja stopinja/dan v Alpah in v Skalnem Gorovju, za tri različna porečja.



Slika 34: Povprečna vrednost faktorja stopinja/dan v porečju Dischma (43,3 km², 1668–3146 m.n.v.), Durance (2170 km², 786–4105 m.n.v.) in Dinwoody (228 km², 1981–4202 m.n.v.) (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 32)

c) Temperaturni gradient, γ

Če so na voljo temperaturne postaje na različnih nadmorskih višinah, lahko gradient vnaprej določimo na podlagi predhodnih podatkov. V nasprotnem primeru ga je treba oceniti po podobnosti iz drugih porečji ali glede na podnebne razmere. V SRM simulacijah, je bila za temperaturni gradient običajno uporabljena vrednost 0,65 °C na 100 m.

V program lahko vnesemo enake vrednosti gradienta za celotno porečje (možnost 0), ali različne vrednosti za vsako cono (možnost 1). Sezonska nihanja je mogoče prilagoditi tudi z vnašanjem vnaprej določene vrednosti gradienta za vsakih 15 dni, omogočeno pa je tudi ročno spreminjanje vrednosti za izbrane dni, v primeru posebnih meteoroloških razmer (na primer, temperaturne inverzije).

d) Kritična temperatura, T_{CRIT}

Kritična temperatura določi, ali so izmerjene oziroma napovedane padavine dež ali sneg. SRM na podlagi kritične temperature odloči, ali padavine (dež) takoj prispevajo k odtoku ali, se kopičijo kot sneg in začnejo prispevati k dotoku v toplejših dneh. V visokih porečjih, kjer se snežna odeja zadrži do julija je kritična temperatura, ko se prične taljenje v aprilu + 3 °C in upade do + 0,75 °C v juliju. Za nižja porečja moramo te vrednosti temperatur prilagoditi.

e) Prispevno območje dežnih padavin, RCA

Ko so padavine določene kot dež, jih je mogoče obravnavati na dva načina. Na začetku sezone taljenja snega (možnost 0), se domneva, da se dež obdrži v snegu, ki je običajno suh in globok. Dežni odtok se doda k snežnemu samo iz površin, ki jih sneg ne prekriva, torej se višina dežnih padavin zmanjša za razmerje med površino brez snega in celotno površino. Ko snežna odeja postane zrela (uporabnik mora odločiti, na kateri datum) je treba program spremeniti na možnosti 1. Ko na snežno odejo pada dež se predpostavi, da se iz nje sprosti enaka količina vode, ki jo predstavljajo dežne padavine, zato se dež iz celotnega porečja doda k staljenemu snegu. Talilni učinek dežja program zanemari, ker dodatna toplota zaradi tekočih padavin velja za majhno.

f) Koeficient upadanja, k

Iz enačbe (1) je razvidno, da je koeficient upadanja pomemben parameter modela, saj $(1 - k)$ predstavlja del dnevne staljene vode, ki se takoj pojavi v odtoku. Analiza podatkov o preteklih pretokih je običajno dober način za določevanje koeficienta. Slika 35 prikazuje takšno oceno alpskega porečja Dischma (43,3 km², 1668–3146 m.n.v.). Vrednosti Q_n in Q_{n+1} so izrisane druga proti drugi in najnižja ovojnica vseh točk prikazuje k -vrednosti. Na podlagi odnosa $k = Q_{n+1}/Q_n$ lahko na primer pridobimo: $k_1 = 0,667$ za $Q_n = 14$ m³/s in $k_2 = 0,85$ za $Q_{n+1} = 1$ m³/s. To pomeni, da k ni konstantna, temveč se povečuje z manjšanjem Q -ja v skladu z enačbo (33):

$$k_{n+1} = x \cdot Q_n^{-y} \quad (33)$$

kjer sta konstanti x in y , za dano porečje, določeni z reševanjem enačb (34) in (35):

$$k_1 = x \cdot Q_1^{-y}$$

$$k_2 = x \cdot Q_2^{-y}$$

$$\log k_1 = \log x - y \log Q_1 \quad (34)$$

$$\log k_2 = \log x - y \log Q_2 \quad (35)$$

V primeru iz slike 35,

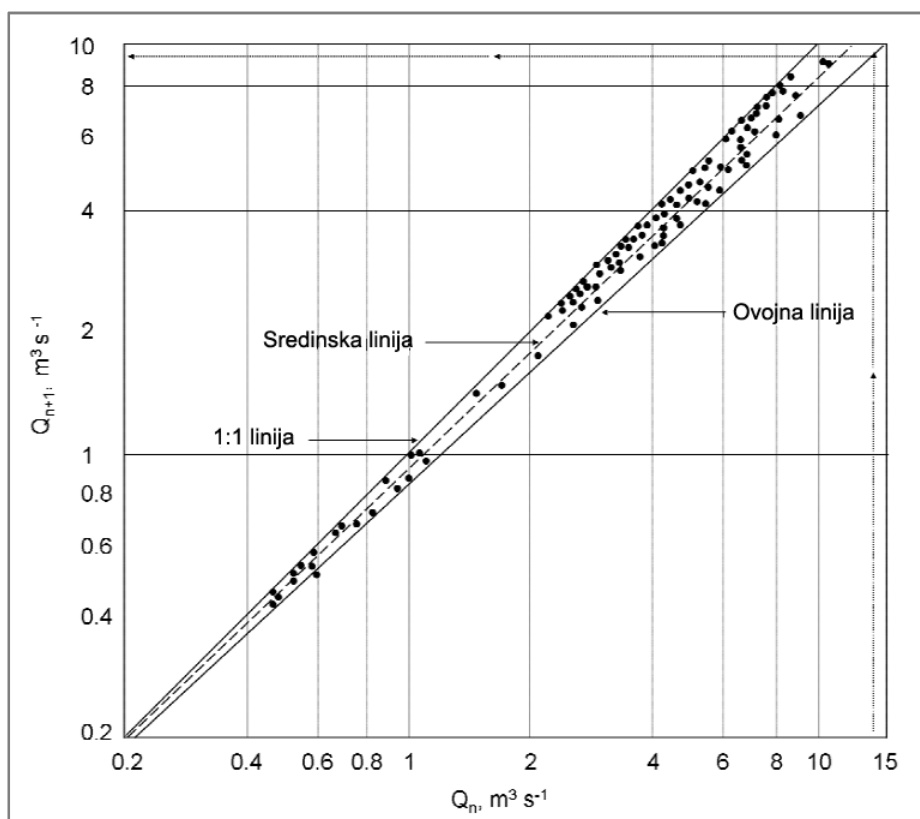
$$\log 0,677 = \log x - y \log 14$$

$$\log 0,85 = \log x - y \log 1$$

$$x = 0,85$$

$$y = 0,086$$

Za izračun konstant x in y (iz enačbe 33) lahko uporabimo sredinsko ali ovojno linijo, s pomočjo katere določimo k -vrednosti.



Slika 35: Grafični prikaz pretoka upadanja Q_n v primerjavi s Q_{n+1} za porečje Dischma v Švici (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 35)

g) Čas zakasnitve, L

Značilno dnevno nihanja odtoka zaradi taljenja snega omogoča, da se čas zakasnitve določi neposredno iz hidrografov preteklih let. Če na primer, pretok začne naraščati vsak dan okoli poldneva, zaostaja za dvigom temperature za približno 6 ur. Zato izmerjene temperature na

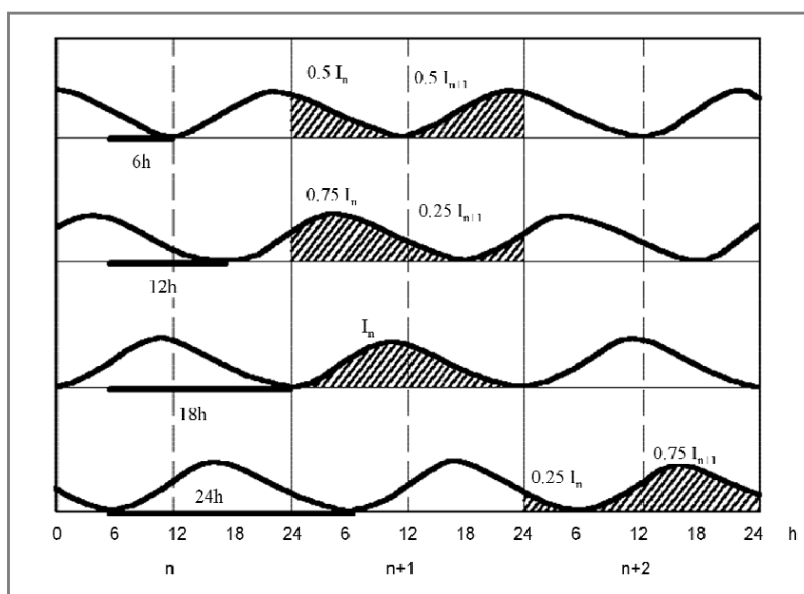
n-ti dan ustrezajo pretoku med dvanajsto uro na n-ti dan in dvanajsto uro na n+1 dan. Podatki o pretokih so običajno objavljeni za intervale od polnoč do polnoči in potrebujejo prilagoditev, da se jih lahko primerja s simuliranimi vrednostmi. Nasprotno, lahko popravimo simulirane vrednosti, da se nanašajo na obdobje od polnoči do polnoči. Slika 36 prikazuje postopek za različne čase zakasnitev. Za $L = 6$ ur, 50 % vnosa izračunanega za temperaturo in padavine na n-ti dan (I_n) plus 50 % za I_{n+1} , da rezultat v n+1 dnevnem odtoku (enačba 36, 37, 38 in 39):

$$L = 6h \quad 0,5 \cdot I_n + 0,5 \cdot I_{n+1} \quad \rightarrow Q_{n+1} \quad (36)$$

$$L = 12h \quad 0,75 \cdot I_n + 0,25 \cdot I_{n+1} \quad \rightarrow Q_{n+1} \quad (37)$$

$$L = 18h \quad I_n \quad \rightarrow Q_{n+1} \quad (38)$$

$$L = 24h \quad 0,25 \cdot I_n + 0,75 \cdot I_{n+1} \quad \rightarrow Q_{n+2} \quad (39)$$



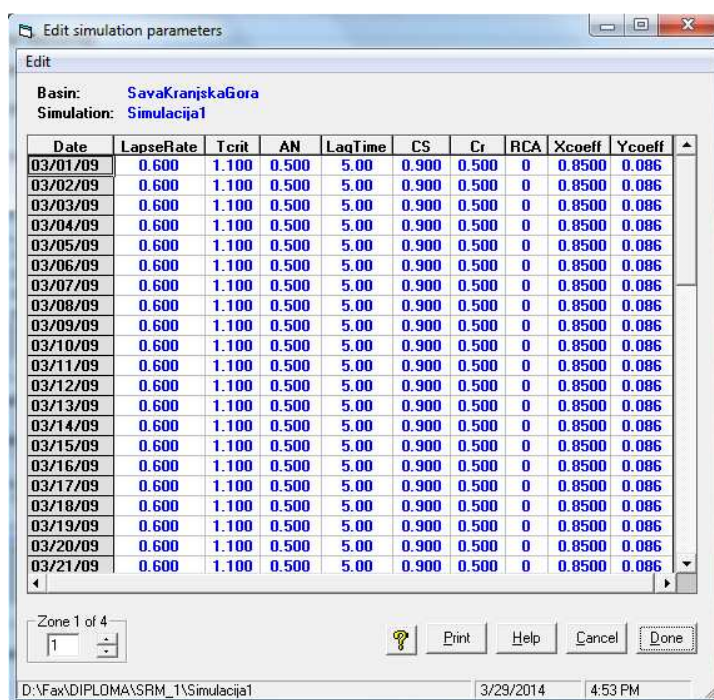
Slika 36: Hidrografi taljenja snega, ki ponazarjajo pretvorbo vrednosti izračunanega odtoka za obdobje 24 ur v zapis dnevnih obdobjij (Martinec, Rango in Roberts, 2008: str. 40)

Če hidrografi niso na voljo, čas zakasnitve lahko ocenimo glede na velikost porečja. WMO (angl. *World Meteorological Organization*) je leta 1986 opravil medlaboratorijski preizkus, kjer je večina modelov umerjala čas zakasnitve. Izkazalo se je, da so ti rezultati v pomoč pri določevanju prave vrednosti, zato lahko upoštevamo odnose med časom zakasnitve in velikostjo porečja iz preglednice 13.

Preglednica 13: Čas zakasnitve, glede na velikost porečja.

| Velikost porečja | L [h] |
|-------------------------------------|-------|
| Porečje W-3 (8,42 km ²) | 3,0 |
| Dischma (43,3 km ²) | 7,2 |
| Dunajec (680 km ²) | 10,5 |
| Durance (2170 km ²) | 12,4 |

Slika 37 prikazuje okno modela SRM, kamor za vsako cono posebej vnašamo posamezne parametre porečja.



Slika 37: Okno modela SRM za vnos parametrov posamezne višinske cone

6.4.3 Ocena natančnosti modela

Računalniški program SRM vključuje grafični prikaz izračunanega hidrograma odtoka in izmerjenega odtoka. Vizualni pregled na prvi pogled kaže, ali je simulacija uspešna ali ne. Za bolj objektivno oceno, kako dobro je bila simulacija izvedena, SRM uporablja dve uveljavljeni merili točnosti, in sicer koeficient determinacije R^2 (enačba 40) in razliko volumnov D_V (enačba 41).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (40)$$

- Q_i izmerjen dnevni pretok [m^3/s],
 Q'_i izračunan dnevni pretok [m^3/s],
 \bar{Q} izmerjen povprečni letni ali obdobjni pretok [m^3/s],
 n število dnevnih vrednosti pretokov.

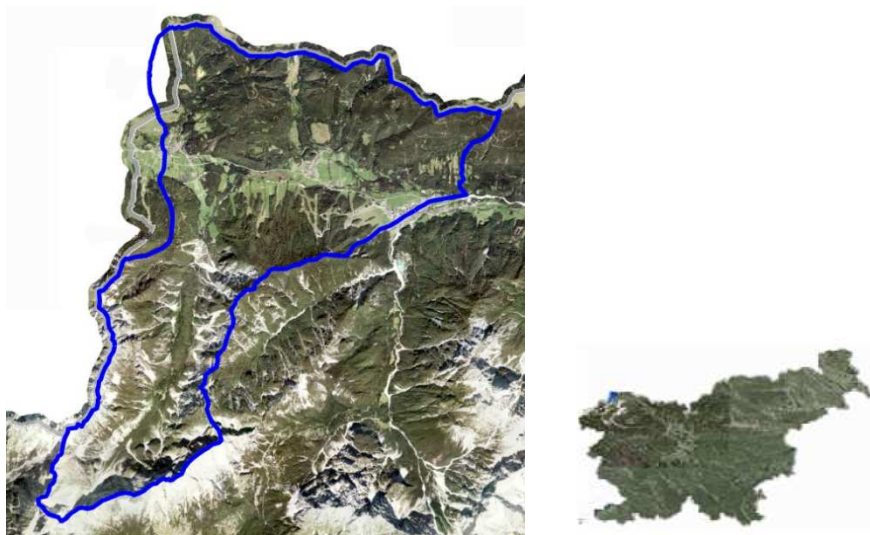
$$D_V[\%] = \frac{V_R - V'_R}{V_R} \cdot 100 \quad (41)$$

- V_R izmerjen letni ali obdobjni volumen odtoka [m^3],
 V'_R izračunan letni ali obdobjni volumen odtoka [m^3].

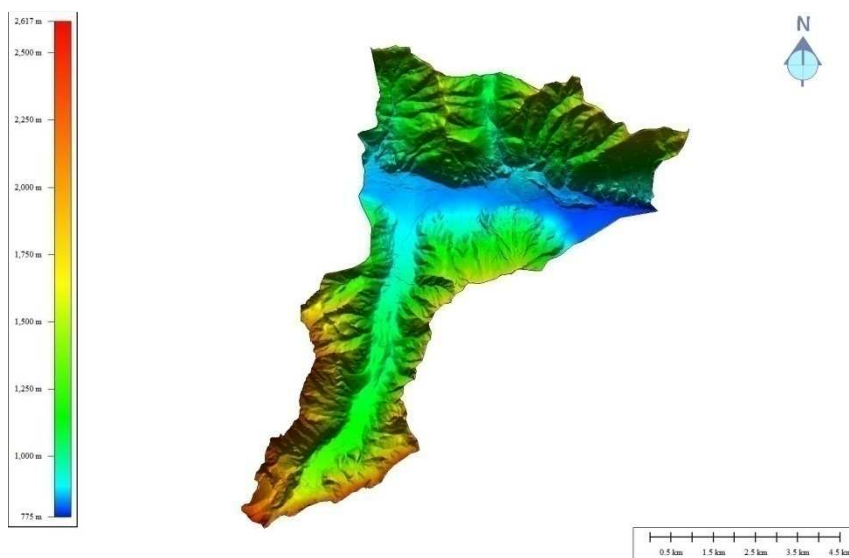
7 NARAVNO-GEOGRAFSKE ZNAČILNOSTI POREČJA SAVA-KRANJSKA GORA

7.1 Geografske značilnosti

Obravnavano porečje se nahaja na skrajnem SZ Slovenije (slika 38) v neposredni bližini meje z Italijo in Avstrijo in je del gorenjske regije. Spada pod občino Kranjska Gora in zajema tri večje kraje: Rateče, Podkoren in Kranjsko Goro (slika 49). Na severu sega do Karavank (z višinami od 1000 do 1800 m), obsežnejši južni del pa spada pod Julijske Alpe (z višinami od 1000 do 2500 m). Osrednji, dolinski in najmanjši del sestavljajo kmetijske in urbane površine z nadmorsko višino med 800 in 870 m (slika 39).

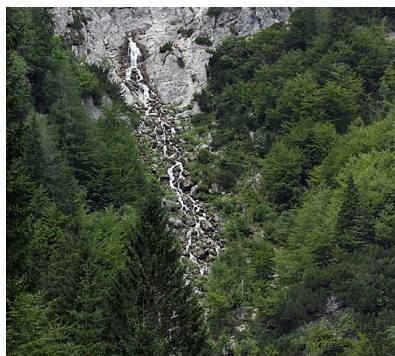


Slika 38: Ortofoto posnetek in lokacija obravnavanega porečja (Atlas okolja, 2013)



Slika 39: Prikaz nadmorskih višin porečja Sava-Kranjska Gora (Vidmar, 2013)

Padavinsko območje porečja obsega 45,42 km², os vodotoka od izvira do razvodnice pa je dolga 5,650 km. Po porečju Sava-Kranjska Gora teče glavni vodotok Sava Dolinka v katero se izlivajo manjši potoki. Sava Dolinka ima dva izvira: prvi je potok Nadiža v Tamarju (slika 40), drugi, stalni izvir pa so Zelenci pri Podkorenu (slika 45) (Jamnik, 2007).



Slika 40: Nadiža, prvi izvir reke Save (Občinski praznik Tamar, 2009)

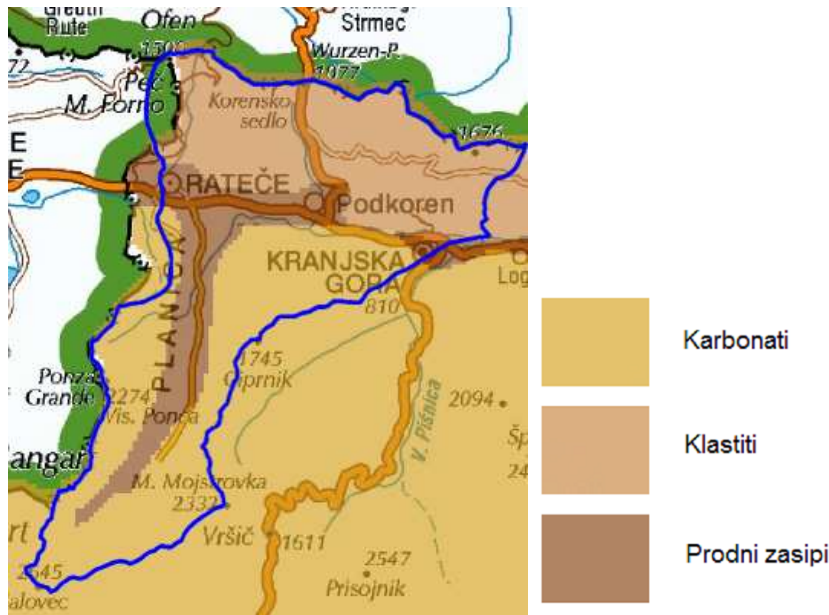
7.2 Geološka zgradba in geomorfologija

Ena izmed značilnosti slovenskih alpskih krajin je njihova geološka mladost. Kot mlado gorstvo so slovenske Alpe izrazito skalnate z zelo očitnimi erozijskimi procesi in nestabilnimi geomorfološkimi oblikami. Zgornjesavska dolina je nastala zaradi tektonskih in ledeniških delovanj (izpod Jalovca, Ponc in Mojstrovke je drsel Planiški ledenik, ki je s seboj prinesel velike količine grušča). Najprej na osnovi tektonskega preloma, ki poteka po sredini doline, kasnejše geomorfološke oblike doline pa so v največji meri posledica delovanja rek in ledenikov. Največji nanos grušča je na lokaciji današnjega Podkorena, ki je zajezil reko Savo in ustvaril Korenško jezero, katerega ostanek sta jezerce Zelenci in močvirje Blata. Vzdolžna dolina predstavlja naravno-geografsko mejo med Julijskimi Alpami in Karavankami, z obeh pogorij pa se vanjo priključujejo številne druge manjše alpske doline. Doline imajo značilno koritasto obliko, v obliki črke U (Mikoš, 2010).

Površje je večinoma sestavljeno iz apnenca in dolomita, zato se je tu razvila posebna oblika kraškega površja – visokogorski kras. Na posameznih mestih se ustvari visokogorski planotast svet, imenovan podi, poln škarpelj, brezen, globokih razpok, skalnih previsov, balvanov ter odlomov od sten. Za alpske krajine so značilni tudi ostri vrhovi in strma pobočja, najvišji vrhovi pa segajo prek 2000 m nadmorske višine (Mikoš, 2010).

Iz slike 41 je razvidno, da sever porečja prekrivajo klastiti (skrilavci in peščenjak), osrednji in nižinski del proti jugu prodni zasipi, južni višinski del pa predstavljajo karbonati (apnenci in

dolomiti). Zaradi prisotnosti prodnatih zasipov, ki se nahajajo nad debelimi plastmi nesprijetih nanosov, je na tem območju veliko padavinskih izgub.



Slika 41: Geološka karta porečja (Geopedija, 2013)

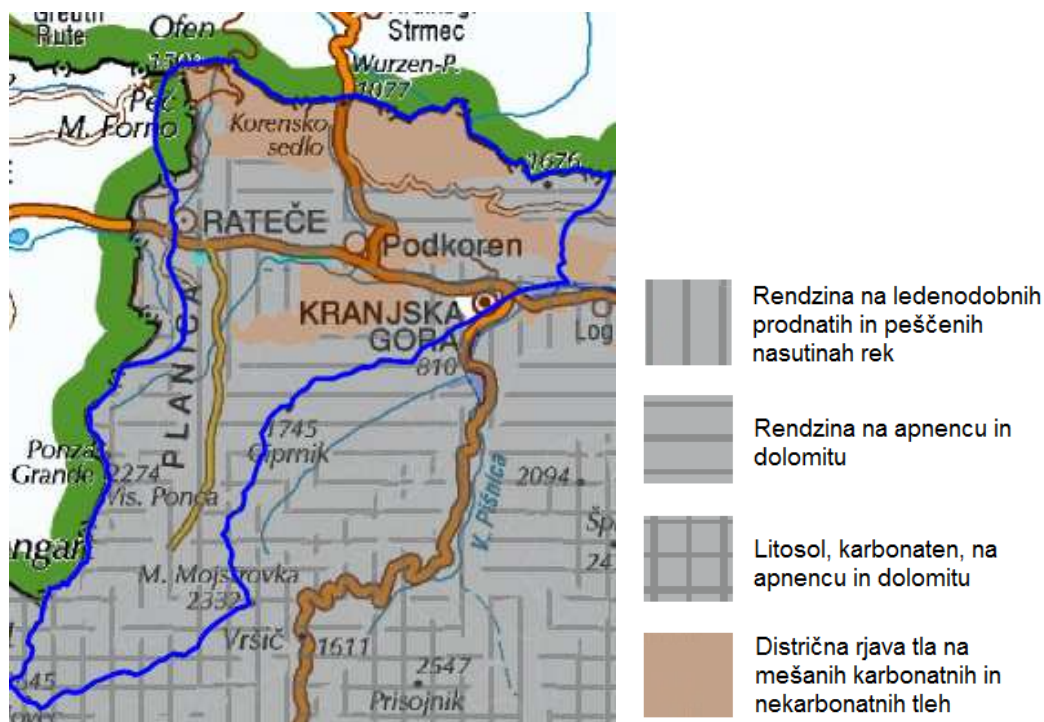
7.3 Pedologija

Prst je odvisna od geološke (matične) osnove, reliefa, podnebnih razmer (klime), vegetacije, vključno s človekom in časom. Tla sestavljajo tri komponente, povezane v sistem, sestavljen iz trde (organske in mineralne snovi), tekoče (talna voda) in plinaste (talni zrak) snovi. Podrobnejša opredelitev sloni na številnih morfoloških, fizikalnih, kemičnih, bioloških, vodno-zračnih in drugih lastnostih. Tla so razdeljena na razrede, tipe, podtipe in varietete (različice). V Sloveniji delimo tla na avtomorfna, hidromorfna in pogojno tudi tehnogena tla (Golob, 2012).

V avtomorfna tla uvrščamo tista zemljišča za katera je značilno, da atmosferska voda lahko prosto pronica skozi talni profil. Tla, ki se uvrščajo v ta oddelek, imenujemo še trdinska tla oziroma terestrična tla. Glede na stopnjo razvitosti talnega profila (razvojna stopnja), delimo avtomorfna tla na sledeče razrede: nerazvita tla, humusno akumulativna tla, kambična tla, eluvialno - iluvialna tla in antropogena tla (Sovre, 2009).

V hidromorfna tla uvrščamo zemljišča, ki so občasno ali trajno prekomerno vlažna, v delu profila ali v celotnem profilu. Glede na specifično delitev hidromorfnih tal je klasifikacija na razrede izvedena glede na tip vodnega režima, ob katerem so posebej pomembni štirje

razredi: nerazvita in slabo razvita obrečna tla, psevdoglejena tla, oglejena tla in šotna tla (cit. po Sovre, 2009, str: 35).



Slika 42: Pedološka karta porečja (Geopedija, 2013)

Pedološko sestavo tal smo določili s pomočjo pedološke karte porečja Sava-Kranjska Gora (slika 42) in preglednice 14, kjer so opisana nekatera izmed avtomorfnih tal. Na območju obravnavanega porečja se nahajajo le avtomorfna tla, in sicer humusno akumulativna tla (70 %), kambična tla (20 %) in nerazvita tla (10 %). V humusno akumulativnih tleh imamo rendzino na ledenodobnih prodnatih in peščenih nasutinah rek ter rendzino na apnencu in dolomitu. V kambičnih tleh imamo distrična rjava tla na mešanih karbonatnih in nekarbonatnih tleh. V nerazvitih tleh pa se nahaja litosol oziroma rendzina (kamenišče) na apnencu in dolomitu.

Preglednica 14: Opis avtomorfnih tal (Sovre, 2009, str. 36).

| Avtomorfna tla | | | |
|--------------------------|-----------|-------------------------------------|---|
| Razred | Talni tip | Podtip | Opis |
| Humusno akumulativna tla | Rendzina | Rendzine na mehkih karbonatnih tleh | Matična podlaga je lapor, fliš, mehki (lapornati) apnenci, lapornata sivica, ali jezerska kreda. Rendzine na mehkih karbonatnih kamninah so zaradi strmega reliefa večinoma pod gozdno in travniško vegetacijo. |

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 14

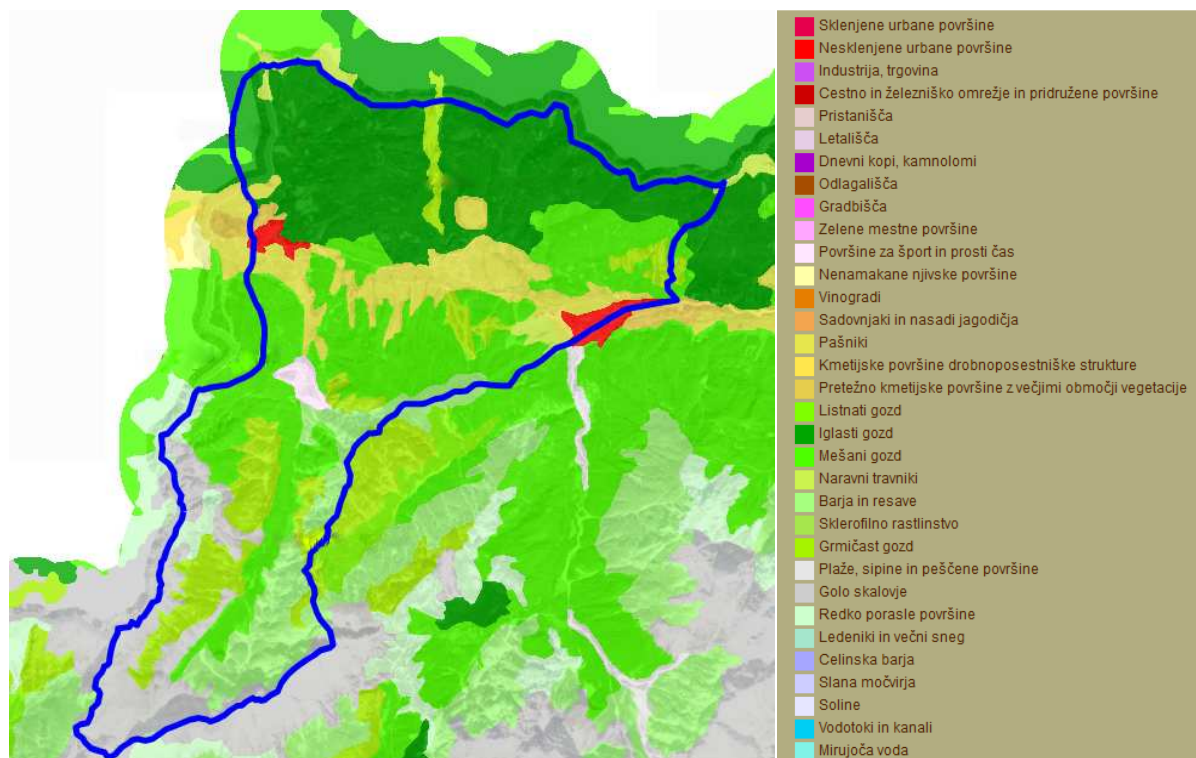
| | | | |
|-----------------|---------------------|--|---|
| | | Rendzine na trdnih karbonatnih tleh | Matična podlaga je apnenec in dolomit. Je nestabilna talna tvorba in se navadno pojavlja v višjem gorskem svetu ter na strmih pobočjih z nagibi preko 50 %. Zaradi plitvosti tal pa tudi zaradi strmega, vrtačastega in skalovitega reliefa so rendzine na apnencu v prvi vrsti gozdna tla. Tudi na dolomitni podlagi je gozd prevladujoča zarast, vendar so dokaj obsežna območja rendzin na dolomitu, ki so zaradi bolj umirjenega reliefa pod travinjem. |
| Kambična tla | Evtrična rjava tla | Evtrično rjava tla, na miocenskih ilovnatih in kremenovih peskih | Tla se po globini zelo razlikujejo in segajo od 30 do preko 100 cm globine. Evtrična rjava tla so pretežno ilovnate, meljasto-ilovnate ali glinasto-ilovnate teksture, z običajno nekaj povečano količino gline. Evtrična rjava tla predstavljajo najboljša tla v kmetijstvu. Na njih lahko gojimo vse vrste kmetijskih kultur, ki uspevajo v našem klimatskem območju. |
| | | Evtrična rjava tla, na mešanih karbonatnih in nekarbonatnih kamninah | |
| | | Evtrična rjava tla, na mehkih karbonatnih kamninah (lapornati apnenci) | |
| | | Evtrična rjava tla, na pobočnem grušču | |
| | | Evtrična rjava tla, na dolomitu | |
| | Distrična rjava tla | Evtrična rjava tla, na permo-karbonskih skrilavcih in peščenjakih | To so tla nastala na kislih, nekarbonatnih kamninah, zastopana so zlasti v hribovitem svetu pa tudi v ravnini. Distrična rjava tla navadno variirajo od 60 – 80 cm globine, redkeje več kot 100 cm. Po globini profila je tekstura dokaj izenačena. Glede na teksturo so zemljišča v glavnem dobro propustna za vodo in dobro zračna. |
| | | Na miocenskih peskih, peščenjakih in konglomeratih | |
| Antropogena tla | Rigosol | Vinogradniška tla (vitisol), evtrična | Rigosol je tip antropogenih tal pri katerem je pomešanih več horizontov do globine 50 – 70 cm. Rigolana tla so v največji meri zastopana v vinogradniških okoliših, tla pa se navadno rigolajo tudi za plantažne nasade sadnega drevja in jagodičja, globoko prekopana in podrahljana pa so ponekod tudi njivska in vrtna tla. |

7.4 Pokrovnost tal

Dolino Save Dolinke predstavljajo pretežno pašniki ter tri manjša območja nesklenjenih urbanih površin. Zaledje je večinoma gozdnato (severno iglasti gozd, južno mešani in grmičast gozd), jug porečja pa deloma prekriva tudi golo skalovje (slika 43). Preglednica 15 prikazuje posamezne deleže pokrovnosti tal porečja.

Preglednica 15: Deleži posamezne pokrovnosti tal na porečju Sava-Kranjska Gora.

| Pokrovnost tal | A (km ²) | Delež (%) |
|---------------------------------|----------------------|-----------|
| Gozd | 28,06 | 61,8 |
| Grmičevje | 5,27 | 11,6 |
| Pašnik | 4,82 | 10,6 |
| Travnik | 1,07 | 2,4 |
| Golo skalovje | 4,96 | 10,9 |
| Površine za šport in prosti čas | 0,36 | 0,8 |
| Nesklenjene urbane površine | 0,86 | 1,9 |



Slika 43: Pokrovnost tal porečja (Atlas okolja, 2013)

7.5 Določitev odtočnega potenciala

Za določitev koeficienta *CN* (preglednica 17) potrebujemo odtočni potencial in rabo tal. Koeficient *CN* je parameter, s katerim opišemo lastnosti zemljin in zajema vplive pedologije, rabe tal in predhodne vlažnosti tal. Odtočni potencial zemljine smo ocenili na podlagi hidravlične prevodnosti tal. V preglednici 16 je prikazana hidravlična prevodnost tal in pripadajoči odtočni potencial zemljine za različne tipe tal (Sovre, 2009). Na območju porečja Sava-Kranjska Gora je približno 10 % distričnih rjavih tal in 90 % rendzin, kar pomeni da ima

10 % tal odtočni potencial B in 90 % odtočni potencial A, zato je za porečje Sava-Kranjska Gora izbran odtočni potencial A. Za ta odtočni potencial je značilna stopnja infiltracijskih izgub med 7,5 in 11,5 mm/h (Brilly in Šraj, 2006).

Preglednica 16: Hidravlična prevodnost tal (Sovre, 2009, str. 41).

| Tip tal | Hidravlična prevodnost | Odtočni potencial |
|--|------------------------|-------------------|
| Distrična rjava tla na klastičnih kamninah | 2 - srednja | B |
| Distrična rjava tla na skrilavih glinavcih in peščenjakih | 2 - srednja | B |
| Rendzina na apnencu in dolomitu in rjava polkarbonatna tla | 3 - visoka | A |
| Rendzina na mehkih karbonatnih kamninah (lapor, fliš, litotamnijski apnenci) | 3 - visoka | A |
| Urbane, vodne in nerodovitne površine | Ni mogoče določiti. | |

Glede na odtočni potencial in rabo tal lahko ocenimo vrednost koeficienta CN (preglednica 17).

Preglednica 17: Koeficienti CN za izbrane rabe tal (Brilly in Šraj, 2006, str. 109, 110 in 111).

| Raba tal | Hidrolo. pogoji | Vrednosti CN glede na odtočni potencial | | | |
|---|-----------------|---|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Odprte površine (parki, nasadi, pokopališča itd.) | | | | | |
| slabi pogoji (pokritost s travo < 50 %) | | 68 | 79 | 86 | 89 |
| povprečni pogoji (pokritost s travo 50 % do 75 %) | | 49 | 69 | 79 | 84 |
| dobri pogoji (pokritost s travo > 75 %) | | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Neprepustne površine | | | | | |
| tlakovane površine, strehe, ceste | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| tlakovane ulice in ceste z robniki in kanaliziranimi odtoki | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| tlakovane ulice in ceste z odprtimi kanali | | 83 | 89 | 92 | 93 |
| makadamske ceste (pesek) | | 76 | 85 | 89 | 91 |
| neobdelane poti (zemlja) | | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Urbana območja | | | | | |
| komercialna in poslovna območja (85 % neprepustnih površin) | | 89 | 92 | 94 | 95 |
| industrijska območja (72 % neprepustnih površin) | | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Stanovanjske površine | | | | | |
| povprečna velikost parcele do 500 m ² (65 % n.p.) | | 77 | 85 | 90 | 92 |
| povprečna velikost parcele 1000 m ² (38 % n.p.) | | 61 | 75 | 83 | 87 |
| povprečna velikost parcele do 1300 m ² (30 % n.p.) | | 57 | 72 | 81 | 86 |
| povprečna velikost parcele do 2000 m ² (25 % n.p.) | | 54 | 70 | 80 | 85 |
| povprečna velikost parcele do 4000 m ² (20 % n.p.) | | 51 | 68 | 79 | 84 |

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 17

| | | | | | |
|--|--------------------|----|----|----|----|
| Ledina, neobdelan svet | | | | | |
| gola zemljina | - | 77 | 86 | 91 | 94 |
| delno poraščena zemljina (ostanki posevkov) | slabi ¹ | 76 | 85 | 90 | 93 |
| | dobri ² | 74 | 83 | 88 | 90 |
| Pašnik, prerija | slabi | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | povprečni | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | dobri | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Travnik, košen | - | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Grmičevje | slabi | 48 | 67 | 77 | 83 |
| | povprečni | 35 | 56 | 70 | 77 |
| | dobri | 30 | 48 | 65 | 73 |
| Gozd v kombinaciji s travo (sadovnjaki) | slabi | 57 | 73 | 82 | 86 |
| | povprečni | 43 | 65 | 76 | 82 |
| | dobri | 32 | 58 | 72 | 79 |
| Gozd | slabi | 45 | 66 | 77 | 83 |
| | povprečni | 36 | 60 | 73 | 79 |
| | dobri | 30 | 55 | 70 | 77 |

¹ Slabi hidrološki pogoji – določeni faktorji zmanjšujejo infiltracijo in s tem povečujejo površinski odtok,

² Dobri hidrološki pogoji – določeni faktorji povečujejo infiltracijo nad povprečno in s tem zmanjšujejo površinski odtok.

8 HIDROLOŠKA SLIKA POREČJA

8.1 Podnebje in padavine

Celotno območje spada v alpski podnebni pas, za katerega so značilne dolge in snežne zime ter kratka, zmerno topla poletja, pogosti vzhodni vetrovi in obilne padavine. Zima traja navadno od štiri do pet mesecev, povprečno število snežnih dni je dobre štiri mesece. Prav tako so pozimi opazne velike razlike med osojnimi in prisojnimi pobočji (Mikoš, 2010). Za Savo Dolinko je značilno hribovito zaledje in snežno-dežni režim.

Skope osnove za kmetijstvo niso v Rateški pokrajini le posledica njene goratosti, temveč tudi manj ugodnih klimatskih lastnosti, ki pa so z njo, kakor kažejo orografske padavine in temperaturni pasovi, tudi neposredno povezane. Rateška pokrajina, čeprav ni velika, dobiva zelo različno količino padavin, od dobrih 1600 mm do več kot 2800 mm. Ne smemo pa prezreti, da je meteorološka postaja v Ratečah reprezentativna zgolj za dno glavne doline. To pa je s 1600 do 1700 mm padavin najmanj namočeno. Toliko so jih deležna tudi obdelovalna tla, ki so v celoti omejena na dno doline. Senožeti na višjih karavanških pobočjih dobivajo že od 1800 do 1900 mm padavin, medtem ko jih je Sovška planina na slemenu (1458 m.n.v.) deležna že okoli 2000 mm. Nasprotno pa jih planine na julijski strani prejmejo letno že več kot 2200 mm. Na julijski strani se padavine z višino hitro stopnjujejo, saj znašajo horizontalni gradienti okoli 100 mm/km in vertikalni tudi do 200 mm/100 m, če sklepamo po izohietah, ki so rekonstruirane glede na orografijo in ustrezne gradiente (Radinja, 1997). Mrzle zime in kratka, sveža poletja niso le posledica višje nadmorske lege območja, temveč tudi lege znotraj alpskega sveta, obdanega od visokogorskega obrobja.

Zgornje območje Save Dolinke je znano po dolgih, mrzlih in tudi snežnih zimah. Srednja letna temperatura zraka je npr. v Ratečah razmeroma zelo nizka, komaj 5,7 °C, medtem ko je povprečna julijska temperatura 15 °C, in januarska -4,7 °C (Radinja, 1997).

V obravnavanem porečju sta dve meteorološki postaji. Prva, ki je v Kranjski Gori (800 m.n.v.) (slika 49), je od aprila 1961 padavinska, zato meri le višino padavin in višino skupne snežne odeje ter novozapadlega snega vsako jutro ob 7. uri. Ne meri pa najvišje in najnižje temperature zraka in temperature zraka ob treh terminih dnevno, torej zaradi pomanjkljivih podatkov ni primerna za vhodne podatke modela. Druga meteorološka postaja se nahaja v Ratečah (slika 49 in slika 44) na 864 m.n.v. S te postaje so v diplomski nalogi uporabljeni podatki za prikaz količine padavin (dežnih in snežnih) ter temperaturni podatki. Poleg teh

podatkov, pa postaja meri tudi podatke o vetru, zračnem pritisku, relativni vlagi in oblačnosti ob 7h, 14h in 21h.



Slika 44: Meteorološka postaja Rateče (Pavšek, 2008)

8.2 Hidrografija

Alpsko vodovje ima hudourniški značaj. Med deževjem zato vode rade narastejo, med sušo pa ponekod zginejo s površja in lahko opazujemo le njihove suhe struge. Potoki so majhni in kratki, vode narastejo predvsem marca in aprila, ko se topi sneg (Mikoš, 2010).

Glavni vodotok v porečju je Sava Dolinka, njen prvi izvir predstavlja poniknjen potok imenovan Nadiža. Nadiža izvira blizu planinske kočje v Tamarju, na nadmorski višini 1232 m, ter takoj nato pade v 12 m visokem slapu in ponikne. Ta nato skupaj z drugimi občasnimi hudourniškimi pritoki v dolini Planica teče pod prepustnim prodatim in gruščnatim površjem. Ko priteče v najnižji del doline in pride v stik z morenskimi gradivom, pride spet na površje, nakar teče proti vzhodu in napaja mokrišče Zelenci (slika 45), ki predstavljajo prvi stalni izvir najdaljše, 219 km dolge, slovenske reke Save. Rečna struga Save Dolinke nastane pri kraju Podkoren, ob pobočju gore Vitranc (Jamnik, 2007).

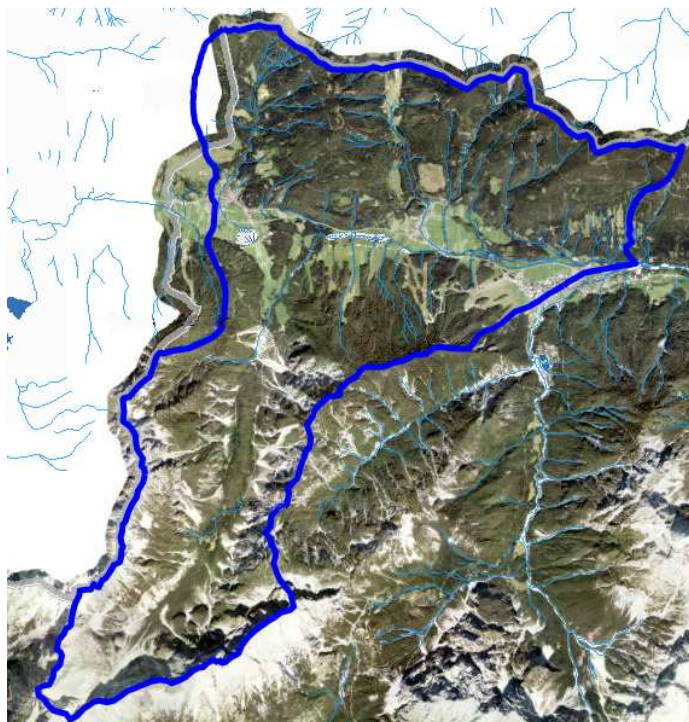
Zelenci so naravni rezervat, ki obsega izvir Save Dolinke ter mokrišče Drni. Najdemo ga pri Podkorenu, v dolini, ki je naravna meja med Karavankami na severu in Julijskimi Alpami na jugu. Območje rezervata na nadmorski višini med 832 in 853 m je dolgo okrog 1300 m in v povprečju široko 150 m. Jezero Zelenci in okoliško močvirje sta ostanka nekdanje poledenitve oziroma Korenškega jezera. Iz rezervata Zelenci je lep razgled tudi na okoliške

vrhove: Špik (2473 m), Vitranc (1637 m), Ciprnik (1747 m), Jalovec (2645 m) in Visoka Ponca (2275 m) (Jamnik, 2007).



Slika 45: Naravni rezervat Zelenci, stalni izvir reke Save (Wikipedija, 2013)

V Savo Dolinko, ki teče proti JV, se do vodomerne postaje v Kranjski Gori izlivajo tudi manjši potoki (slika 46). Večji levi pritoki Save Dolinke so Trebiža, Beli potok, Žakelj, Kotnjek in Suhelj, ter desna pritoka Nadiža in Klemucov graben (slika 49). Sava Dolinka se z Savo Bohinjko združi v reko Savo pri Radovljici.



Slika 46: Hidrografija in prispevno območje porečja (Atlas okolja, 2013)

Za merjenje pretokov Save Dolinke je postavljena ena vodomerna postaja, ki se nahaja v Kranjski Gori (GKY: 407580 in GKX: 150120), na nadmorski višini 790,5 m (slika 47 in slika 48), od razvodnice pa je oddaljena 600 m. Na vodomerna postaji, ki deluje od leta 1990, opazovalec ob 7h dnevno beleži pretoke, kateri so bili za obdobje marec in april 2009 v diplomski nalogi tudi uporabljeni. Ker je vodomerna postaja opremljena samo z vodomerno letvijo in ker se meritve vodostaja izvajajo enkrat dnevno, opazovalec večinoma ne ujame absolutnih konic, torej so zabeležene maksimalne vrednosti pretokov odvisne tudi od vestnosti opazovalca.



Slika 47: Lokacija merilnega mesta na reki Sava Dolinka (ARSO, 2012)

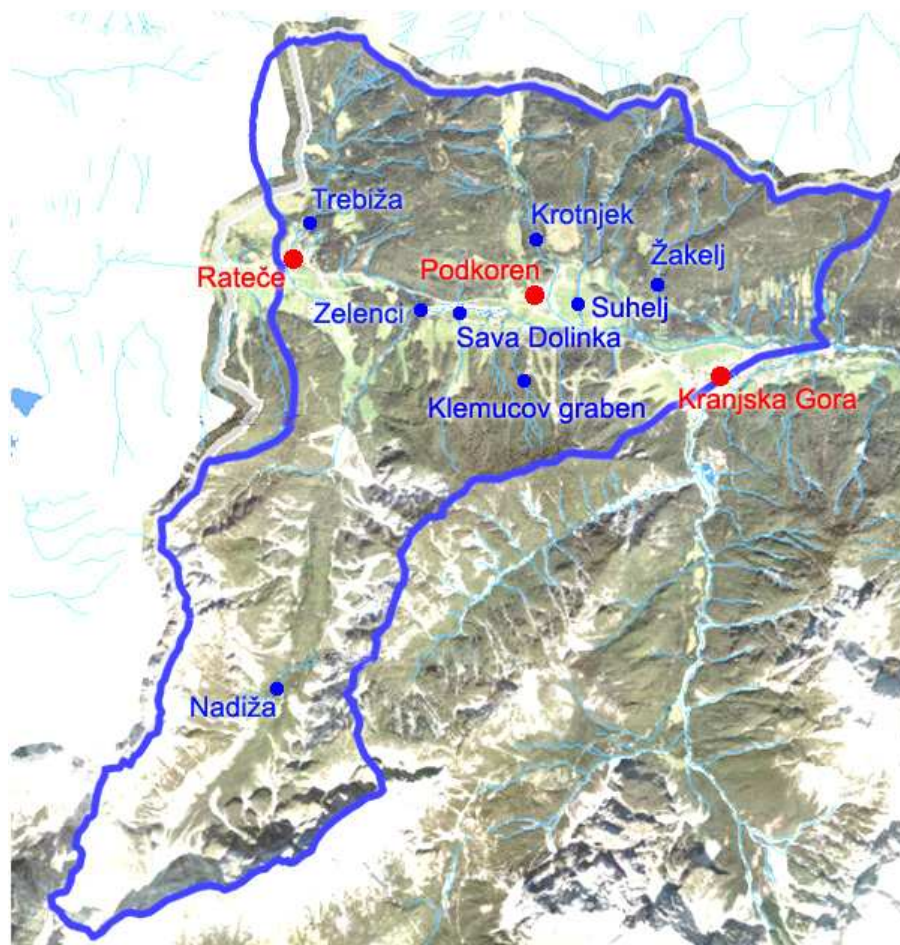


Slika 48: Vodomerna postaja Kranjska Gora, opremljena z vodomerno letvijo (ARSO, 2012)

8.3 Hidrografske lastnosti porečja

Hidrografske lastnosti porečja so: površina porečja v km², povprečni padec terena v %, dolžina vodotoka v km ter povprečni padec vodotoka v %. Površina povodja predstavlja površino, ki jo obdaja orografska razvodnica do hidrološkega profila. Povprečni padec terena predstavlja padec terena merjen pravokotno na vodotok, medtem ko povprečni padec vodotoka predstavlja padec premice, ki veže začetek in konec odseka vodotoka tako, da je površina trikotnika, ki ga tvorita premica in horizontala enaka površini med podolžnim profilom in horizontalo. Dolžina vodotoka pa pomeni dolžino vodotoka od razvodnice do hidrološkega profila (Sovre, 2009).

Velikost prispevnega območja porečja Sava-Kranjska Gora (slika 49) smo določili s pomočjo spletnega atlasa (Atlas okolja, 2013). Velikost je določena na osnovi mreže hidrografskih razvodnic, ki je osnovana na izohipsah. Celotno obravnavano porečje smo vzeli kot en hidrološki profil. Velikost prispevne površine porečja znaša 45,42 km².



Slika 49: Pregledna karta porečja (Atlas okolja, 2013)

Celotno prispevno območje porečja je prikazano na sliki 49, kjer so označeni večji kraji in vodotoki. S pomočjo spletne aplikacije Atlas okolja smo določili tudi dolžino osi vodotoka Save Dolinke od izvira do razvodnice in znaša 5,65 km. Talni izvir struge Save Dolinke so Zelencih (833 m) pri Podkorenu, reka pa obravnavano porečje zapusti v Kranjski Gori na 790 m.n.v. S pomočjo teh podatkov smo izračunali padeč struge od izvira do razvodnice, ki znaša 0,44 %.

9 MODELIRANJE TALJENJA SNEŽNE ODEJE S PROGRAMOM HEC-HMS

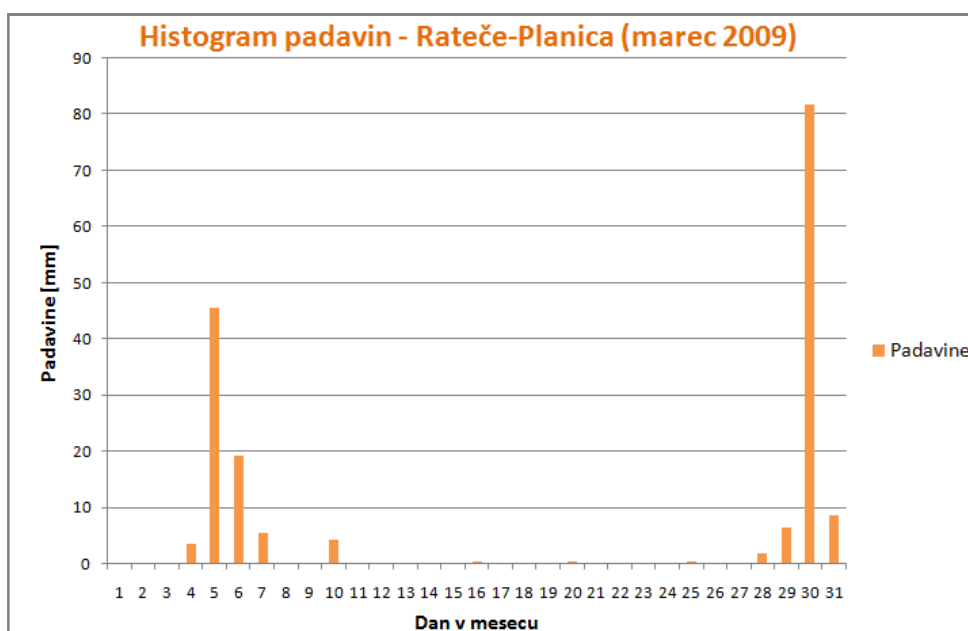
9.1 Padavine in pretoki

Na reki Savi Dolinki imamo od izvira do razvodnice eno vodomerno postajo v Kranjski Gori, kjer se dnevno beleži gladino (pretok) vode in eno meteorološko postajo Rateče-Planica, s katere so bili vzeti uporabljeni padavinski podatki za hidrološki model (dežne in snežne padavine). Merjeni podatki so nam služili za umerjanje modela ter za primerjavo izračunanega in merjenega pretoka.

Za umerjanje modela (v obdobju taljenja snega) smo uporabili dnevne vrednosti dežnih padavin v milimetrih za mesec marec (slika 50) in april v letu 2009 (slika 51) (ARSO, 2014). V preglednici 18 so prikazane dnevne vrednosti padavin izmerjenih na padavinski postaji Rateče-Planica v mesecu marcu 2009, v preglednici 19 pa za mesec april 2009. V izbranem obdobju so se pretoki gibali od 0,98 do 3,74 m³/s.

Preglednica 18: Dnevne vrednosti padavin na meteorološki postaji Rateče-Planica za mesec marec 2009 (ARSO, 2014).

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----|----|----|-----|------|------|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|------|-----|-----|
| Dan | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Padavine [mm] | 0 | 0 | 0 | 3.6 | 45.5 | 19.2 | 5.5 | 0 | 0 | 4.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 |
| Dan | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | |
| Padavine [mm] | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 1.8 | 6.5 | 81.7 | 8.5 | |



Slika 50: Histogram dnevni vrednosti padavin na meteorološki postaji Rateče-Planica za mesec marec (ARSO, 2014)

Preglednica 21: Dnevne vrednosti povprečnih temperatur in višin snežne odeje na meteorološki postaji Rateče-Planica za mesec april 2009 (ARSO, 2014).

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Dan | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| T [°C] | 3.5 | 2.9 | 5.2 | 6.9 | 6.3 | 4.8 | 6.5 | 6.3 | 7.6 | 6.7 | 6.2 | 7 | 7.1 | 9 | 9.4 |
| Višina SO [cm] | 70 | 60 | 53 | 50 | 50 | 48 | 38 | 36 | 34 | 30 | 25 | 18 | 10 | 7 | 0 |
| Novozapadli sneg [cm] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dan | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| T [°C] | 10.2 | 7.2 | 5 | 5.4 | 7.3 | 7.5 | 10.4 | 5.9 | 3.5 | 8 | 9.2 | 7.5 | 8.2 | 6.7 | 4.8 |
| Višina SO [cm] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Novozapadli sneg [cm] | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 |

Minimalna temperatura zraka v obdobju od marca 2009 do aprila 2009 je bila $-10,6$ °C, maksimalna pa $18,5$ °C. Najvišja izmerjena debelina snežne odeje je bila 103 cm, največja vrednost novozapadlega snega pa je bila izmerjena 30. marca in je znašala 30 cm.

9.3 Padavinske izgube

V preglednici 22 so prikazani izbrani koeficienti *CN*, ki so bili določeni na podlagi preglednice 17, odtočni potencial (preglednica 16) ter velikost prispevne površine za posamezno rabo tal.

Preglednica 22: Izbrani koeficienti *CN* za različne tipe pokrovnosti tal, ki se nahajajo na porečju Sava-Kranjska Gora ter odtočni potencial zemljine.

| Pokrovnost tal | Prispeva površina [km ²] | Odtočni potencial | Izbrani CN |
|--|--------------------------------------|-------------------|------------|
| Gozd (povprečni pogoji) | 28,06 | A | 36 |
| Grmičevje (povprečni pogoji) | 5,27 | A | 35 |
| Pašnik (povprečni pogoji) | 4,82 | A | 49 |
| Travniki (povprečni pogoji) | 1,07 | A | 30 |
| Golo skalovje | 4,96 | D | 87 |
| Površine za šport in prosti čas (povprečni pogoji) | 0,36 | A | 49 |
| Nesklenjene urbane površine | 0,86 | B | 70 |
| Skupaj (enoten CN) | 45,42 | | 44 |

S pomočjo enačbe (42), lahko za porečja z različnimi vrstami zemljin in različno rabo tal določimo enoten koeficient *CN*. Tako smo za obravnavano porečje določili enotno vrednost *CN* 44. Raba tal je bila določena na podlagi tematske karte pokrovnosti tal, ki je dostopna na spletni strani ARSO-ta (Atlas okolja, 2013). Analiza posamezne rabe tal je bila narejena na tej isti strani, z orodjem »nariši in izmeri«. Začetne izgube I_a , smo določili po enačbi (43), in znašajo $64,65$ mm. Predhodno pa je bilo treba izračunati še maksimalno potencialno

zadrževanje (retenzija) po enačbi (44), ki znaša 323,27 mm. Obe izračunani vrednosti smo uporabili kot vhodna podatka v hidrološki model.

$$CN_{skupen} = \frac{\sum A_i * CN_i}{\sum A_i} \quad (42)$$

CN_{skupen} enoten CN za račun odtoka,

CN_i CN posameznega dela povodja,

A_i površina pripadajočega povodja.

$$S = \frac{(25400 - 254 * CN)}{CN} \quad (43)$$

S maksimalno potencialno zadrževanje (retenzija) [mm].

$$I_a = 0,2 * S \quad (44)$$

I_a začetne izgube [mm].

Vhodni podatek, ki ga potrebujemo za določitev izgub je tudi delež neprepustne površine porečja, ki smo ga določili na podlagi karte pokrovnosti tal in znaša 8 %.

9.4 Transformacija padavin v odtok

Čas zakasnitve, ki je parameter SCS hidrograma enote, smo določili po enačbah (45) in (46) ter dobili vrednost 13 h.

$$T_p = L^{0.8} \cdot \frac{(S_r + 25.4)^{0.7}}{28.14 \cdot \sqrt{Y}} \quad (45)$$

$$S_r = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (46)$$

T_p čas od težišča histograma efektivnih padavin do vrha enotnega hidrograma [h],

L hidravlična dolžina povodja [km],

S_r maksimalna retenzija povodja [mm],

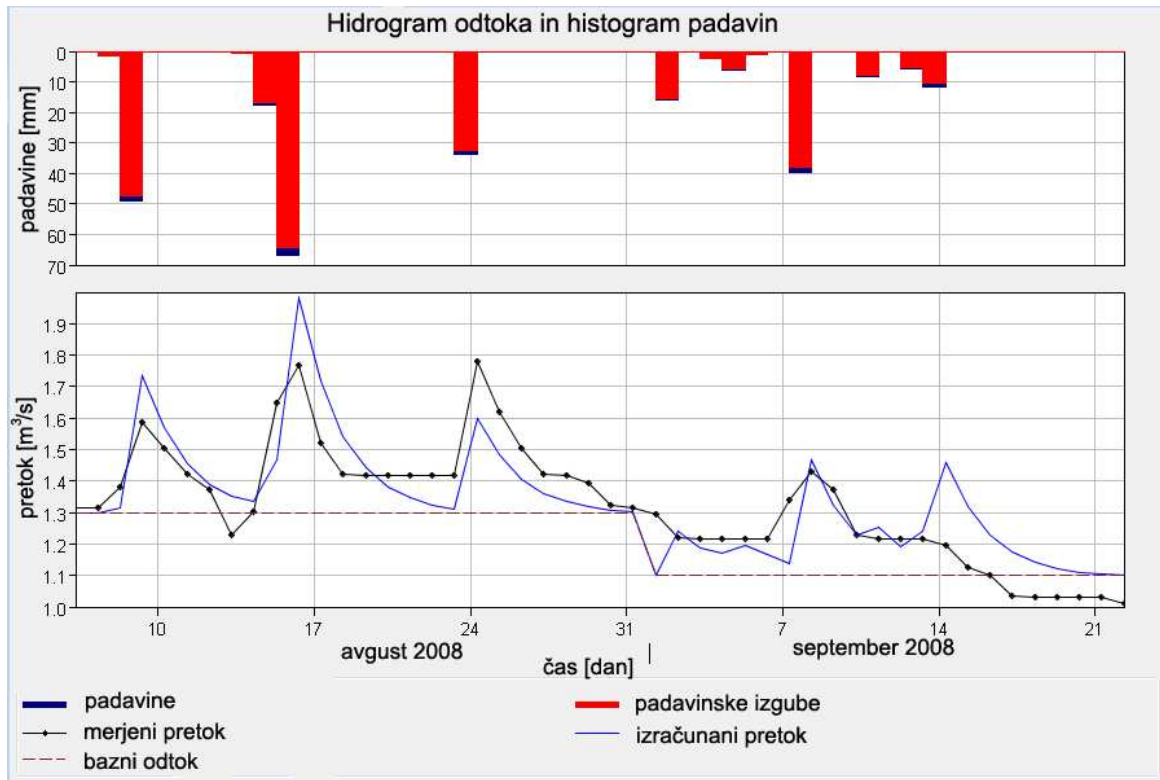
Y naklon povodja [%].

9.5 Umerjanje in verifikacija modela v obdobju brez snega

Vsak hidrološki model porečja, za katerega postavljamo model, je treba predhodno umeriti. Umerjanje modela je najpomembnejša in najzahtevnejša faza dela. Pri tem uporabljamo izmerjene hidrometeorološke podatke – podatke o padavinah in pretokih, ki nam služijo za umerjanje in verifikacijo modela. Parametre modela določimo s prilagajanjem tako, da dosežemo zadovoljivo ujemanje izračunanega in opazovanega pretoka. Rezultate izračuna primerjamo z meritvami in analiziramo razlike. Spreminjamo privzete vrednosti parametrov in ugotavljamo občutljivost modela na spremembo posameznih parametrov (Sovre, 2009).

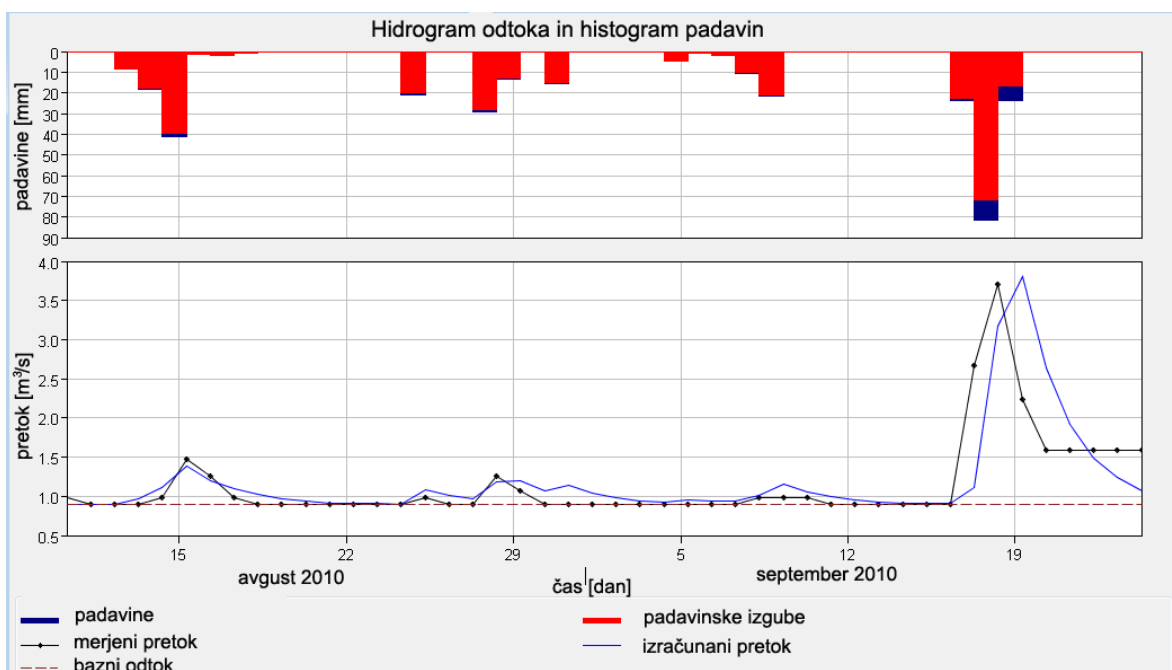
Model smo najprej umerili s podatki iz obdobja brez snežnih padavin z namenom, da bi čim natančneje določili lastnosti oziroma parametre porečja. Za umerjanje (slika 52) in verifikacije (slike 53, 54 in 55) modela smo izbrali obdobja do dveh mesecev v poznopoletnem in jesenskem času. Da bi se z izračunanim pretokom čim natančneje približali izmerjenemu, smo zbirali obdobja v katerih je bilo več nalivov. Za umerjanje modela je bilo izbrano obdobje 6. 8. Do 22. 9. 2008, za verifikacijo pa obdobja: 13. 8. Do 8. 9. 2003, 13. 9. Do 11. 10. 2007 in 10. 8. Do 24. 9. 2010. Ker so vrednosti pretokov merjene enkrat dnevno, je bil časovni korak omejen na dnevne vrednosti.

9.5.1 Umerjanje modela za padavinsko situacijo od 6. 8. do 22. 9. 2008



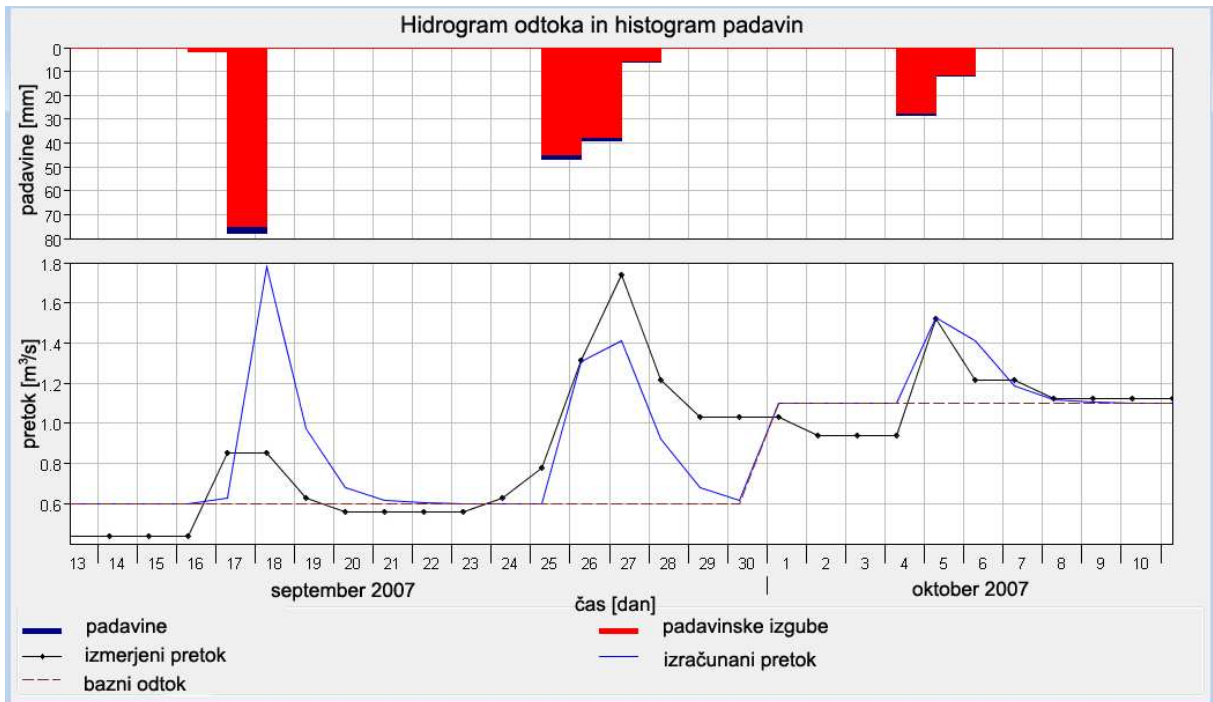
Slika 52: Histogram padavin in hidrogram odtoka za obdobje od 6. 8. do 22. 9. 2008

9.5.2 Verifikacija modela za padavinsko situacijo od 10. 8. do 24. 9. 2010



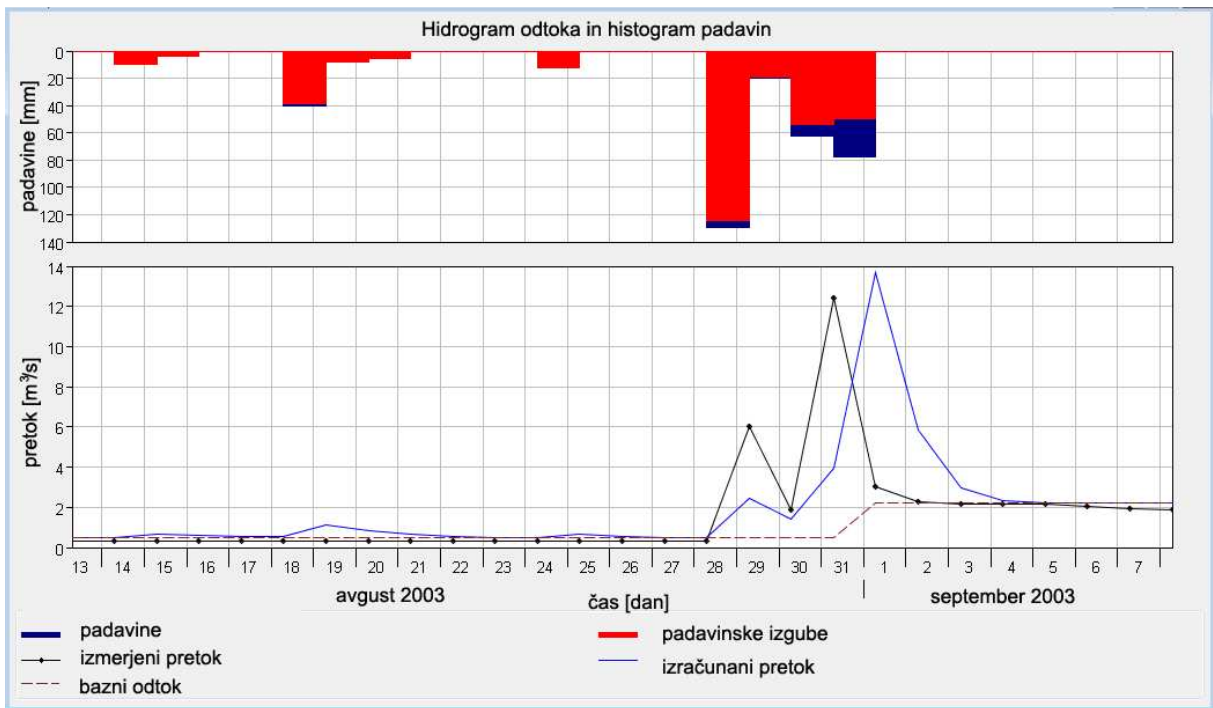
Slika 53: Histogram padavin in hidrogram odtoka za obdobje od 10. 8. do 24. 9. 2010

9.5.3. Verifikacija modela za padavinsko situacijo od 13. 9. do 11. 10. 2007



Slika 54: Histogram padavin in hidrogram odtoka in za obdobje od 13. 9. do 11. 10. 2007

9.5.4 Verifikacija modela za padavinsko situacijo od 13. 8. do 8. 9. 2003



Slika 55: Histogram padavin in hidrogram odtoka in za obdobje od 13. 8. do 8. 9. 2003

Na zgornjih grafih na slikah od 52 do 55 rdeči del stolpcev predstavlja padavine, izmerjene na padavinski postaji Rateče, modri del pa so padavinske izgube, ki ne prispevajo k površinskemu odtoku saj so prestrežene, infiltrirane ali akumulirane na površini. Na spodnjih grafih slik od 52 do 55 modra krivulja prikazuje modeliran pretok, črna krivulja predstavlja izmerjeni pretok na vodomerni postaji Kranjska Gora, črtkana črta pa označuje bazni odtok.

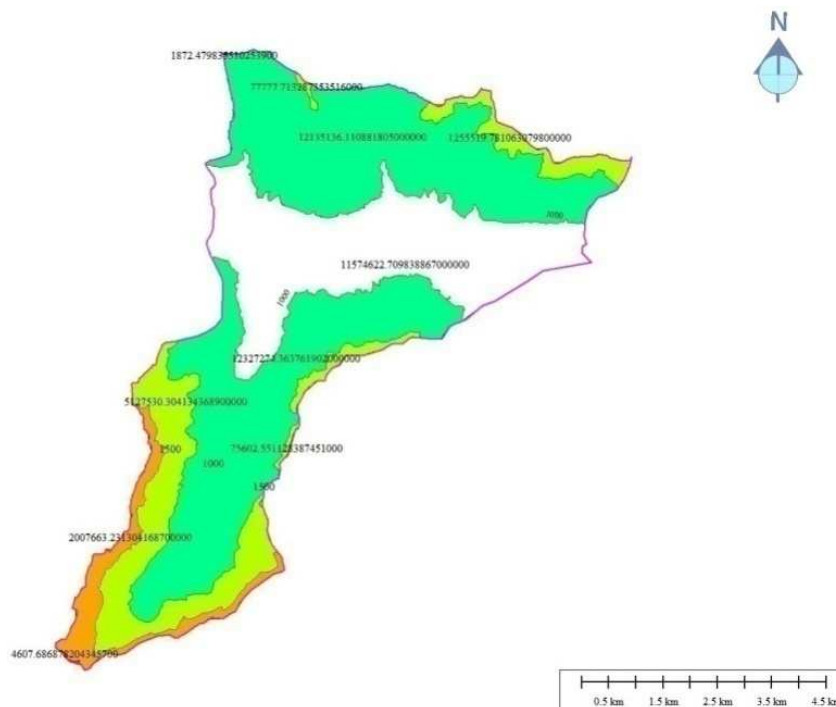
9.6 Umerjanje modela v obdobju taljenja snega

Ko smo za porečje Sava-Kranjska Gora, na podlagi umerjanja brez prisotnosti snežne odeje, določili parametre, smo v program HEC-HMS za obdobje marec in april 2007 dodali še parametre, ki upoštevajo taljenje snega. Vhodni podatki o padavinah, povprečni temperaturi in višini snežne odeje so opisani v poglavjih 9.1. in 9.2

Porečje smo razdelili na štiri višinske pasove (preglednica 23), ki smo jih določili na podlagi slike 56, kjer si višinski pasovi sledijo na 500 m višine in imajo izračunano površino. Vsakemu višinskemu pasu smo na podlagi ocene, da je 10 enot višine snega enako 1 enoti vode, določili začetni snežni vodni ekvivalent. Pri določitvi vrednosti pa smo bili pozorni tudi na čim boljše ujemanje izmerjenega in simuliranega pretoka.

Preglednica 23: Vhodni podatki za izbrane višinske pasove v programu HEC-HMS.

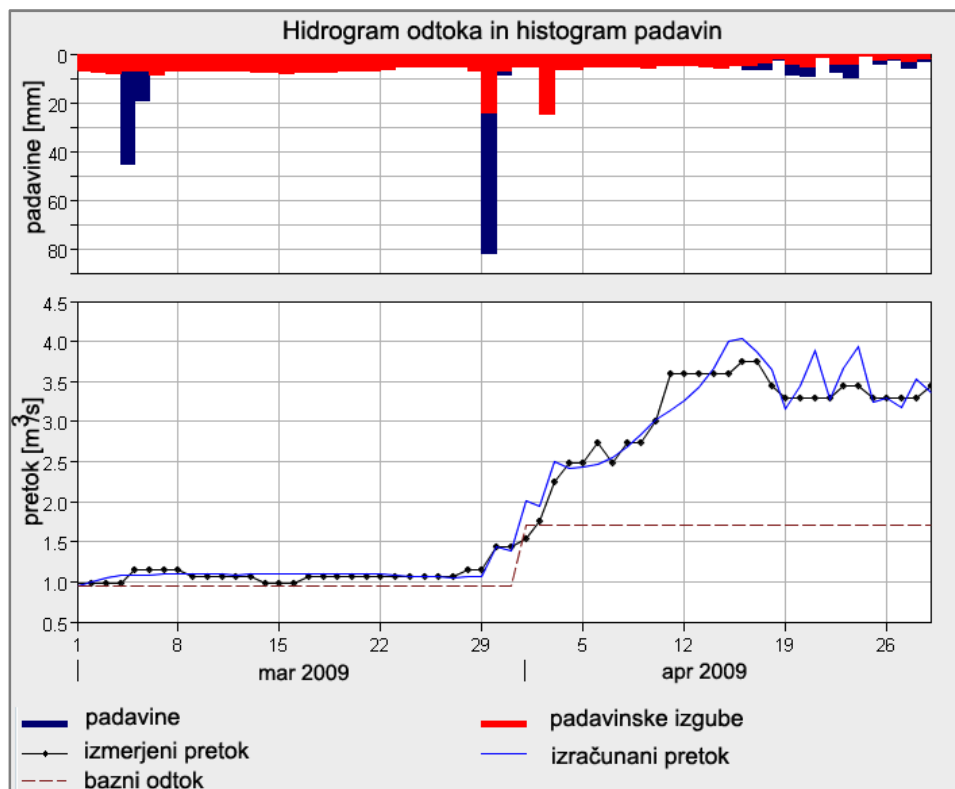
| Višinski pas | Velikost [km ²] | Delež [%] | Povprečna višina [m] | SVE [mm] |
|--------------|-----------------------------|-----------|----------------------|----------|
| Cona 1 | 11,57 | 25,47 | 860 | 110 |
| Cona 2 | 25,3 | 55,69 | 1245 | 230 |
| Cona 3 | 6,54 | 14,39 | 1570 | 250 |
| Cona 4 | 2,02 | 4,45 | 1800 | 280 |



Slika 56: Višinski pasovi porečja Sava-Kranjska Gora (Vidmar, 2013)

Model je bil izdelan in umirjen za obdobje 2 mesecev, od 1. marca do 30. aprila 2009. V obravnavanem obdobju je padlo 280,3 mm padavin, v štirih večjih in štirih manjših padavinskih dogodkih. Dnevne količine padavin so bile izmerjene na meteorološki postaji v Ratečah, največ jih je padlo 30. marca 2009 in sicer 81,7 mm. 1. marca je bila snežna odeja debela 100 cm, 5 cm je pridobila 7. marca in se nato tanjšala do 30. marca, ko je na 60 cm uležanega snega zapadlo 20 cm novega. Snežna odeja je na meteorološki postaji Rateče traja do 14. aprila. Vse opravljene simulacije smo primerjali s povprečnim dnevnim merjenim pretokom, merjenim na vodomerni postaji Kranjska Gora.

Rezultat umerjenega hidrološkega modela Sava-Kranjska Gora prikazuje slika 57. S črnimi točkami so prikazane vrednosti merjenega pretoka, modra črta prikazuje izračunani hidrogram odtoka, črtkana črta pa predstavlja bazni odtok porečja. Padavinska situacija od 1. 3. do 30. 4. 2009 prikazuje, da so bile padavine po intenziteti razporejene precej neenakomerno.



Slika 57: Rezultat umerjenega hidrološkega modela s programom HEC-HMS za obdobje od 1. 3. do 30. 4 2009

9.7 Analiza rezultatov

9.7.1 Analiza rezultatov za obdobje brez snega

Model je bil umerjen glede na podatke o izmerjenem vodostaju oziroma na podlagi merjenega pretoka na vodomerni postaji Kranjska Gora. Vrednosti vhodnih parametrov smo določili tako, da se je izračunani odtok čim bolj približal izmerjenim vrednostim. Rezultate, ki jih prikazujejo grafi (slike 50–53), smo statistično ovrednotili z metodo srednjega kvadratičnega pogreška RMSE (ang. *Root mean square error method*), ki opisuje prileganje izračunanega in izmerjenega hidrograma odtoka po enačbi (47):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2} \quad (47)$$

- $RMSE$ srednji kvadratični pogrešek,
 $Q_i - \hat{Q}_i$ razlika pretokov v določenem času,
 n število časovnih intervalov.

Manjši kot je RMSE boljše je ujemanje. Rezultate modeliranja prikazuje preglednica 24.

Preglednica 24: RMSE za primer umerjanja in verifikacij modela s programom HEC-HMS.

| Umerjanje | RMSE [m ³ /s] |
|--|--------------------------|
| Padavinska situacija od 6. 8. do 22. 9. 2008 | 0.11 |
| Verifikacije | |
| Padavinska situacija od 10. 8. do 24. 9. 2010 | 0.39 |
| Padavinska situacija od 13. 9. do 11. 10. 2007 | 0.25 |
| Padavinska situacija od 13. 8. do 8. 9. 2003 | 2.81 |

Statistična primerjava pretokov - izmerjenih in izračunanih vrednosti je pokazala, da je bilo umerjanje modela zadovoljivo. Slabši rezultat je le pri verifikacij s podatki iz leta 2003, kar pa lahko pojasnimo s tem, da se ob znatni količini dežnih padavin podtalnica polni, s tem pa se povečuje tudi bazni odtok (Brilly in Šraj, 2006). Tega pa v programu nismo mogli prikazati, saj se lahko glede na izbrano metodo baznega odtoka vrednosti le-tega v program vnaša le mesečno in ne dnevno, naliv pa se je v tem primeru pojavil proti koncu meseca in nadaljeval v začetek naslednjega. Opozoriti moramo tudi na to, da pri dnevni odčitki gladin opazovalec večinoma ne ujame absolutnih konic, ki so torej zelo verjetno višje in možno tudi časovno zamaknjene. V nekaterih primerih, ko je naliv zelo kratek, opazovalec vala niti ne ujame, saj pretok hitro naraste in se nato tudi hitro zmanjša.

Oblika visokovodnega vala je odvisna tudi od predhodnih pogojev (predhodnih padavin in vlažnosti zemljine, časa trajanja padavin, jakosti in razporeditve padavin, rabe tal in tipa zemljine, lokalnega naklona terena, itd.) oziroma samega dogodka, ki je v vsakem primeru edinstven. Vsi ti različni dejavniki delujejo istočasno v različnih kombinacijah (Sovre, 2009).

Padavinske izgube so na tem območju velike, saj ima povodje precej strm naklon (9 %), prisotnost gozdnih in zelenih površin je 87 % zato se velik del padavin zadrži v vegetaciji in krošnjah dreves. Velika pa je tudi stopnja infiltracije v zemljino, saj velik del povodja leži nad plastmi nesprijetih nanosov (prodnate ravnine), ki omogočajo podzemno pretakanje večjih količin vode.

9.7.2 Analiza rezultatov za obdobje taljenja snežne odeje

Statistična primerjava povprečnih dnevni pretokov - izmerjenih in izračunanih vrednosti na vodomerni postaji Kranjska Gora, je bila ovrednotena z metodo srednjega kvadratičnega pogreška RMSE. Koeficient RMSE za porečje Sava-Kranjska Gora znaša $0,186 \text{ m}^3/\text{s}$.

Izbrano porečje predstavlja izvir reke Save Dolinke in je razmeroma majhno, zato so tudi vrednosti pretokov precej nizke. Že ob manjših padavinah se pretok, sicer za majhno vrednost, hitro dvigne in po koncu padavin hitro upade. Vverjetnost, da je opazovalec merilne postaje zabeležil največji dnevni pretok, pa je precej majhna. Iz slike 55 razberemo, da je pri merjenem in simuliranem odtoku prišlo do manjših razhajanj, od $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ do $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Nekateri izmed razlogov za precenjen oziroma podcenjen pretok so že opisani v poglavju 9.7.1, v poglavju 10.2 pa so navedena dodatna pojasnila, ki se navezujejo na oba programa (HEC-HMS in SRM).

Pri umerjanju modela v obdobju brez snega, sta na rezultat najbolj vplivala koeficient *CN* in začetne izgube. Teh podatkov pri modeliranju v obdobju taljenja snega nismo več spreminjali. S številnimi simulacijami v obdobju taljenja snega smo ugotovili, da na rezultat najbolj vpliva začetni snežni vodni ekvivalent, ki ga določimo za vsako cono posebej. Meritve *SVE* se na obravnavanem območju ne izvajajo, zato smo pri določevanju upoštevali dejstvo, da z višino debelina snežne odeje narašča, s tem pa tudi vrednost *SVE*. Pomembna je tudi vrednost temperaturnega gradienta, ki ga določimo za celotno porečje in se ga po conah ne da spreminjati. *ATI* stopnja taljenja pri modeliranju upošteva, da se z zorenjem snežne odeje taljenje povečuje, torej ima določitev *ATI* funkcije velik pomen pri določevanju pretoka. Na obliko grafa nekoliko vpliva tudi vrednost taljenja snežne odeje zaradi toplih tal.

10 MODELIRANJE TALJENJA SNEŽNE ODEJE S PROGRAMOM SRM

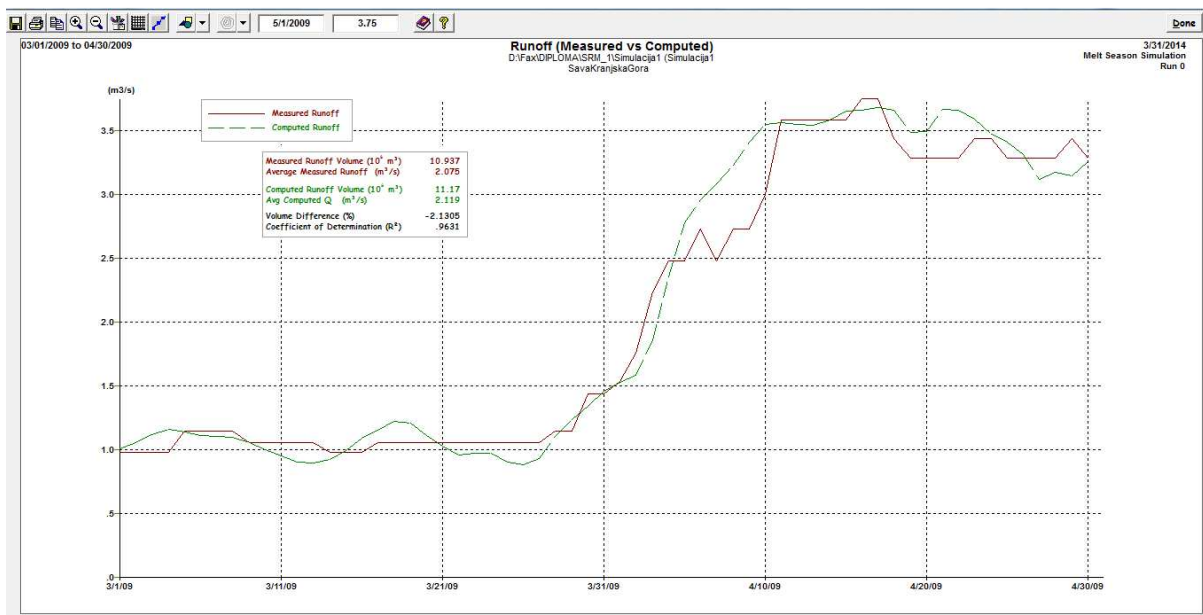
10.1 Umerjanje in rezultati modela SRM

Vhodne parametre programa SRM smo določili na podlagi razpoložljivih podatkov o lastnostih porečja in glede na predlagane vrednosti avtorjev priročnika za uporabnike (angl. *SRM Users' Manual*), ki upoštevajo različne velikosti porečja in različne nadmorske višine (preglednica 25).

Preglednica 25: Vneseni vhodni parametri v modelu SRM.

| | Višinski pas | | | |
|--|--------------|---------|---------|---------|
| | Cona 1 | Cona 2 | Cona 3 | Cona 4 |
| Velikost [km ²] | 11,57 | 25,3 | 6,548 | 2,02 |
| Povprečna višina [m] | 860 | 1245 | 1570 | 1800 |
| Parameter | | | | |
| Temperaturni gradient [°C/1000 m.n.v.] | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Kritična temperatura [°C] | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| Faktor stopinja dan [cm/°C/dan] | 0,5–0,8 | 0,5–0,8 | 0,5–0,8 | 0,5–0,8 |
| Čas zakasnitve [h] | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Koeficient odtoka za sneg | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.95 |
| Koeficient odtoka za dež | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| Prispevno območje dežnih padavin | 0 ali 1 | 0 ali 1 | 0 ali 1 | 0 ali 1 |
| Konstanta x | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 0.93 |
| Konstanta y | 0.042 | 0.042 | 0.042 | 0.042 |

Rezultat umerjenega hidrološkega modela Sava-Kranjska Gora prikazuje slika 58, ki je rezultat več kot 250-tih simulacij. Model je bil umerjen glede na podatke o dnevni izmerjeni pretoki iz vodomerne postaje Kranjska Gora in dnevne podatke o povprečni temperaturi in količini padavin izmerjene na meteorološki postaji v Ratečah. S črnimi točkami so prikazane vrednosti merjenega pretoka, modra črta pa prikazuje izračunani hidrogram odtoka.



Slika 58: Rezultat umerjenega hidrološkega modela s programom SRM za obdobje od 1. 3. do 30. 4 2009

10.2 Analiza rezultatov

Na podlagi izračunanega koeficienta determinacije $R^2 = 0,963$ in razlike v volumnu $D_V = -2,13\%$ sklepamo, da je bila simulacija uspešna (slika 59). Pri umerjanju modela se je izkazalo, da na obliko grafa najbolj vplivajo krivulje praznjenja snežne pokrovnosti, ki smo jih določili za vsako cono posebej. Te krivulje smo ocenili iz podatkov o višini snežne odeje, rezultat pa bi bili natančnejši, če bi te krivulje določili na podlagi satelitskih posnetkov.

| Basin Name: SavaKranjskaGora | |
|--|-------------|
| Simulation: Simulacija1 | |
| Run Date: 3/31/2014 | |
| Statistics | Run Results |
| Measured Runoff Volume (10 ⁶ m ³) | 10.937 |
| Average Measured Runoff (m ³ /s): | 2.075 |
| Computed Runoff Volume (10 ⁶ m ³) | 11.170 |
| Average Computed Runoff (m ³ /s): | 2.119 |
| Volume Difference (%): | -2.1305 |
| Coefficient of Determination (R ₁): | 0.9631 |
| Comments concerning the simulation go here | |

Slika 59: Statistični rezultat simulacije

V letu 2008 je bila na Katedri za splošno hidrotehniko izdelana diplomska naloga z naslovom Uporabnost satelitskih posnetkov za potrebe snežne hidrologije v slovenskem prostoru

(Stušek, 2008), v kateri so bili predstavljeni prvi izsledki na tem področju v Sloveniji. Metode daljinskega zaznavanja snežne odeje s sateliti in letali omogočajo vedno bolj zanesljivo spremljanje obsega in lastnosti snežne odeje. Za področje Slovenije je bil analiziran vpliv oblačnosti in pokrovnosti na natančnost zaznavanja snežne odeje, glede na podatke o višini snežne odeje na meteoroloških postajah in posnetke satelitskega sistema MODIS.

Uporabnost in zanesljivost satelitskih posnetkov je odvisna od prostorske in časovne resolucije, predvsem pa od lokalnih omejitev, kot sta pojav oblačnosti in zaznavanje snega na območjih različnih pokrovnosti. Izmed 12 razpoložljivih satelitskih posnetkov (za obdobje od oktobra 2002 do septembra 2003) se je le en posnetek izkazal za uporabnega. Torej se je že takoj izkazalo, da je uporaben posnetek redek, saj je bilo kar več kot 50 % posnetkov pokritih z oblaki, dobrih 20 % pa brez snežne odeje. Ker je avtor ocenil napako 52 % (ta rezultat ne predstavlja dejanske napake, nakazuje pa velik odstotek nezaznanih površin snežne odeje, predvsem na račun gozdnih površin), smo se odločili, da te metode določevanje krivulj praznjenja ne bomo obravnavali.

Kot pomembna parametra modela sta se izkazala tudi koeficienta x in y , ki smo ju za obravnavano porečje določili s pomočjo koeficienta upadanja po znani metodi (glej poglavje 6.4.2.3 (f)) in dobljene rezultate upoštevali v končni simulaciji.

Na obliko grafa vidno vplivata še koeficienta odtoka za sneg in dež. Izhodiščne vrednosti smo privzeli iz navodil za uporabo programa SRM, med simuliranjem pa smo vrednosti prilagodili za boljše ujemanje grafov. S spreminjanjem vrednosti temperaturnega gradienta nekoliko vplivamo na rezultate, vendar smo upoštevali vrednost, ki smo jo določili s programom HEC-HMS.

11 PRIMERJAVA PROGRAMOV HEC-HMS IN SRM

V preglednici 26 so združeni vhodni podatki, ki jih je v modela HEC-HMS in SRM potrebno vnesti za določitev odtoka zaradi taljenja snega, prikazane pa so tudi nekatere zmožnosti in omejitve enega in drugega programa. S temi podatki opišemo znane lastnosti porečja in določimo spremenljivke ter parametre, ki morajo biti za dobro izvedeno simulacijo natančno izbrani. V zadnjem delu preglednice je razvidno ali ima posamezen program možnost prikaza grafičnih in statističnih rezultatov posamezne simulacije.

Preglednica 26: Primerjava programov HEC-HMS in SRM.

| | Program | | | |
|--|---|----------|-----------------|----------|
| | SRM 1.12 | | HEC-HMS 3.5 | |
| Zmožnosti in omejitve | | | | |
| Število con | 1-16 | | neomejeno | |
| Velikost porečja | neomejeno (do sedaj 917,5 km ²) | | neomejeno | |
| Najdaljše časovno obdobje simulacije | 366 dni | | neomejeno | |
| | Možnost vnosa v program | | | |
| | Celotno porečje | Po conah | Celotno porečje | Po conah |
| Lastnosti porečja | | | | |
| Površina porečja | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Povprečna nadmorska višina | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Začetni odtok | ✓ | | ✗ | |
| Bazni odtok | ✗ | | ✓ | |
| Evapotranspiracija | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ |
| Spremenljivke | | | | |
| Dnevne padavine | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Dnevne povprečne temperature | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Začetni snežni vodni ekvivalent | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ |
| Delež pokritosti s snežno odejo | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Začetni »cold content« | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ |
| Začetna količina vode, ki se zadržuje v snežni odeji | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ |
| Parametri | | | | |
| Koeficient odtoka za sneg (padavinske izgube) | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |

... se nadaljuje

... nadaljevanje Preglednice 26

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Koeficient odtoka za dež (padavinske izgube) | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Faktor stopinja/dan | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Temperaturni gradient | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Kritična temperatura | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Temperaturna meja | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ |
| Prispevno območje dežnih padavin | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Koeficient upadanja | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Čas zakasnitve | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| Mokra vrednost taljenja | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ |
| Mejna vrednost dežja | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ |
| Predhodni temperaturni indeks stopnje taljenja | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ |
| Hladna meja | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ |
| Zadrževanje tekoče vode | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ |
| Taljenje zaradi toplih tal | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ |
| Rezultati | | | | |
| Grafični prikaz merjenega in izračunanega pretoka | ✓ | | ✓ | |
| Grafični prikaz deleža pokritosti s snežno odejo | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ |
| Statistična analiza rezultatov (ujemanje pretokov in volumna) | ✓ | | ✗ | |

Oba programa nam omogočata razdelitev porečja na višinske cone, s tem da jih v programu SRM lahko določimo največ 16, vsaki coni pa moramo v obeh programih določiti povprečno nadmorsko višino in velikost oziroma delež porečja, ki ga zastopa. Velikost simuliranega porečja je pri obeh programih neomejeno, prav tako je v programu HEC-HMS neomejeno časovno obdobje simulacije, v programu SRM pa lahko določimo pretok največ za obdobje enega leta.

V program SRM moramo vnesti vrednost začetnega odtoka s povodja, program HEC-HMS nam te možnosti ne ponuja, lahko pa vnesemo vrednost baznega odtoka, ki ga v prvem programu ne moremo določiti. Na padavinske izgube precej vpliva evapotranspiracija, ki jo v programu HEC-HMS lahko določimo, v programu SRM pa je posredno upoštevana pri koeficientu odtoka za sneg in dež.

Dnevne podatke o padavinah in povprečnih temperaturah lahko v program SRM vnesemo za vsako cono posebej, HEC-HMS pa nam tega ne dopušča. V HEC-HMS vnašamo vrednost začetnega snežnega vodnega ekvivalenta za vsako cono posebej, program SRM pa namesto tega podatka zahteva podatek o deležu pokritosti s snežno odejo (za vsako cono posebej), ki ga s faktorjem stopinja/dan pretvori v *SVE*. Spremenljivki, ki jih zahteva HEC-HMS, SRM pa ne, sta tudi začetna količina vode, ki se zadržuje v snežni odeji in začetna energija, ki je potrebna za dvig temperature snežne odeje na 0 °C (*angl.* cold content), ki ju določimo za vsako cono posebej.

Temperaturni gradient je pomemben parameter v obeh programih, vendar njegove vrednosti v HEC-HMS-ju ne moremo vnašati za vsako cono posebej, ampak le za celotno porečje. Enako velja tudi za kritično temperaturo, ki loči med dežnimi in snežnimi padavinami. V HEC-HMS-ju lahko za celotno porečje določimo temperaturno mejo, ki pove pri kateri temperaturi nastopi taljenje snega, SRM pa te možnosti ne ponuja. Za razliko od programa HEC-HMS, v programu SRM lahko za vsako cono določimo koeficient upadanja in prispevno območje dežnih padavin. Pomemben parameter v obeh programih je tudi čas zakasnitve, ki pa ga v HEC-HMS-ju ne moremo vnesti za vsako cono posebej.

Mokra vrednost taljenja, mejna vrednost dežja, predhodni temperaturni indeks stopnje taljenja, hladna meja, zadrževanje tekoče vode in taljenje zaradi toplih tal so parametri, ki jih lahko določimo le v programu HEC-HMS in so enaki po vseh višinskih conah.

Oba programa vsebujeta grafični prikaz merjenega in izračunanega pretoka, SRM pa nam poleg tega omogoča tudi prikaz deleža pokritosti s snežno odejo po conah. Rezultate lažje ovrednotimo s programom SRM, saj nam poleg grafičnega prikaza ponuja tudi statistično analizo rezultatov, ki zajema ujemanje pretokov in volumna.

12 ZAKLJUČKI

Sneg in njegovo taljenje predstavljata pomemben del hidrološkega kroga. V nekaterih porečjih predstavlja zaloga vode, ki je shranjena v snežni odeji, edini vir vode za vsakdanje potrebe v gospodinjstvu, kmetijstvu in industriji v obdobju brez padavin. Da bi lahko ocenili količino vode, ki je na razpolago v snežni odeji, moramo le-to podrobno proučevati in šele nato lahko z modeli za računanje taljenja snega napovemo, koliko vode se bo iz snežne odeje sprostito.

Na višino in porazdelitev snežne odeje vpliva več dejavnikov: veter, vegetacija, sončno sevanje, padavine, temperatura zraka in kondukcija toplote iz zemljišča. Razumevanje prostorskih in časovnih razlik v nalaganju snega, ki jih ti dejavniki opišejo, pa je pomembno pri izdelavi hidroloških napovedi taljenja snega, zlasti v regijah, kjer so snežne meritve redke in satelitski posnetki, ki jih pridobimo s pomočjo daljinskega zaznavanja, niso uporabni.

Za modeliranje taljenja snega se uporabljata dva osnovna pristopa. Najbolj razširjena je metoda, pri kateri merimo ali ocenimo vsako spremenljivko v enačbi energijske bilance. Ta metoda je podatkovno obsežna in je včasih ni mogoče izvesti zaradi nezadostnih podatkov. Druga možnost, s pomočjo temperaturnega indeksa, ima svoje omejitve, ker se opira zgolj na temperaturo zraka, se pa zaradi svoje preprostosti uporablja bolj pogosto.

Na principu metode temperaturnega indeksa delujeta tudi oba modela HEC-HMS in SRM, ki smo ju v diplomski nalogi primerjali. Pri modeliranju smo že na začetku naloge naleteli na težave zaradi pomanjkanja podatkov, predvsem meritve snežnega vodnega ekvivalenta, ki bi nam dale dejansko vsebnost vode v snežni odeji, ki se tali in odteka. Tudi zastopanost merilnih mest za padavine, temperaturo in snežno odejo je po različnih nadmorskih višinah nezadostna, saj sta na obravnavanem porečju merilni postaji locirani na 864 m.n.v. (Rateče) in 800 m.n.v. (Kranjska Gora), vrhovi prispevnega območja pa segajo vse do 2500 m.n.v.

Z diplomsko nalogo smo želeli ugotoviti ustreznost oziroma primerjavo modelov HEC-HMS in SRM za napovedovanje pretokov zaradi taljenja snežne odeje, na izbranem porečju Sava-Kranjska Gora. Pri tem smo najprej predstavili značilnosti porečja, predvsem naravno-geografske, hidrološke in meteorološke. Potreba po vhodnih podatkih je pokazala, da je program SRM kompleksnejši. To je bilo tudi pričakovati, saj je program SRM namenjen modeliranju taljenja snega, program HEC-HMS pa je v osnovi namenjen modeliranju odtoka brez prisotnosti snežne odeje. Programa sta do uporabnika prijazna, samo umerjanje pa je s programom SRM zahtevnejše. Izbrano območje do sedaj še ni bilo predmet večjih

hidroloških raziskav, zato podrobnejše analize snežnega vodnega ekvivalenta, ki bi zagotovila natančnejše vhodne podatke, ni bilo mogoče izdelati. Za boljše delovanje in primerjavo modelov, bi morali pridobiti uporabne satelitske posnetke oziroma podatke o snežnem vodnem ekvivalentu na različnih nadmorskih višinah.

Glede na zelo majhne vrednosti pretokov, se oblika hidrograma pri obeh modelih dobro ujema z merjenim. Oba modela sta dala zadovoljive rezultate, da bi ugotovili, kateri model je natančnejši pa bi morali simulirati daljše obdobje (npr. eno leto) in opraviti vsaj dve verifikaciji. Pri modeliranju odtoka ima v obeh programih ključno vlogo pravilna izbira parametrov, kateri v empiričnih enačbah predstavljajo fizikalne procese v naravi. Torej je zelo pomembno poznavanje prispevnega območja, ne gre pa zanemariti izkušenosti uporabnika.

VIRI

ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje). 2012. Snežna odeja.

<http://www.arso.gov.si/vreme/podnebjekarte/padavine.html+&cd=5&hl=sl&ct=clnk&gl=si&client=firefox-a> (Pridobljeno 18. 5. 2012.)

ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje). 2010. Temperatura tal pod snežno odejo.

<http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/agromet/product/document/sl/novice/Temperaturatalpodsneznoodejo.pdf> (Pridobljeno 5. 5. 2012.)

ARSO (Agencija Republike Slovenije za okolje). 2013. Meteorološki letopisi. Rateče-Planica - dnevne vrednosti meteoroloških spremenljivk.

<http://www.arso.gov.si/vreme/podnebjemeteorolo%C5%A1ki%20letopis/2009ratece.pdf>

(Pridobljeno 2. 11. 2013)

Atlas okolja. 2013.

<http://gis.arso.gov.si/apigis/povrsinskevode/> (Pridobljeno dne 10. 12. 2013)

AWARE (Available water resource in mountain environment). 2005

http://www.aware-eu.info/shared_files/press/comunicatistampa/pressrelease_sl_2005.pdf

(Pridobljeno 20. 4. 2012.)

Brilly, M., Šraj, M. 2006. Modeliranje površinskega odtoka in navodila za program HEC-HMS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 180 str.

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 309 str.

Bronstein, I.N., Semendjajev, K.A., Musiol, G., Mühlig, H. 2009. Matematični priročnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 967 str.

Carroll, T., Cline, D., Olheiser, C., idr. 2006. NOAA'S national snow analyses. Chanhassen, Minnesota: National Operational Hydrologic Remote Sensing Center, National Weather Service, NOAA: 14 str.

http://www.westernsnowconference.org/proceedings/pdf_Proceedings/2006/Carroll-NationalSnowAnalysis.pdf (Pridobljeno 4. 12. 2012.)

- Cline, D. 1999. Snow hydrology. COMET Hydrometeorology 00-1 Course.
http://www.comet.ucar.edu/class/hydromet/09_Oct13_1999/docs/cline/comet_snowhydro/index.htm (Pridobljeno 3. 12. 2012.)
- Cochran, M. 2013. How to Accurately Measure Snowfall.
<http://www.accuweather.com/en/weather-news/how-to-accurately-measure-snow/4878639>
(Pridobljeno 24. 2. 2013.)
- Črepinšek, Z. 2005. Agroklimatologija - vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehnična fakulteta: 125 str.
<http://web.bf.uni-lj.si/agromet/vajeSKRIPTA.pdf> (Pridobljeno 24. 2. 2013.)
- DeWalle, D.R., Rango, A. 2008. Principles of snow hydrology. New York, Cambridge University Press: 410 str.
- Eagleson, P.S. 1970. Dynamic Hydrology. New York; St. Louis; San Francisco: McGraw-Hill Book Company: 462 str.
- Effect of solar radiation on snow cover. 2013.
http://weatheradvance.com/home/weather/weatheradvance.com/wp-content/uploads/2012/12/library_004_lg.jpg (Pridobljeno 22. 2. 2013.)
- Glacier meteorology. Surface energy balance. 2010. Spletni modul.
http://glaciers.gi.alaska.edu/material/mccarthy/Lecture_EnbalMeltmodeling_Hock.pdf
- Geopedija. 2013.
www.geopedia.si (Pridobljeno dne 11.12.2013.)
- Golob, A. 2012. Analiza časovnih parametrov hidrograma za izbrana področja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Golob): 105 f.
- Harr, R.D. 1981. Some characteristics and consequences of snowmelt during rainfall in western Oregon. Journal of Hydrology 53, 3–4: 227–304.
http://www.cof.orst.edu/cof/fe/watershd/fe538/SnowHydrologyModule/Harr_snowmelt_JoH1981.pdf (Pridobljeno 19. 3. 2013.)

Hellmann. 2012.

<http://wiki.wetterstationen.info/index.php?title=Datei:Hellmann.JPG> (Pridobljeno 25. 2. 2013.)

Horvat, A., Brilly, M., Vidmar, A., Kobold, M. 2009. The Impact Of Snow Melt On Surface Runoff Of Sava River In Slovenia. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic engineering: 1 str.

<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-2086.pdf>

(Pridobljeno 4. 12. 2012.)

Jamnik, T. 2007. Zelenci.

<http://www.gremoven.com/Vode/Zelenci/menu-id-9> (Pridobljeno 11. 12. 2013)

Kofol, T. 2013. Taljenje snežne odeje. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba T. Kofol): 86 f.

Kogovšek, P. 2008. Meritve vodnatosti snežen odeje na Voglu v zimi 2006/07, kot kazalec količine padavin. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geodezijo (samozaložba P. Kogovšek): 66 f.

Kržič, V. 2006. Uporaba sodobne tehnologije pri spremljanju stanja snežne odeje. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba V. Kržič): 109 f.

Libbrecht, K.G., 1999. A Snowflake Primer.

<http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/primer/primer.htm> (Pridobljeno 21. 2. 2013.)

Martinec, J., Rango, A., Roberts, R. 2008. Snowmelt runoff model (SRM) Users' Manual. Updated edition for Windows. New Mexico State University. New Mexico, USA: 180 str.

<http://www.mastergardeners.nmsu.edu/pubs/research/water/srmspecrep100.pdf>

(Pridobljeno 10. 10. 2013.)

Mikoš, K. 2010. Krajinsko urejanje športno – rekreacijskih območij v Zgornjesavski dolini (Planica – Kranjska gora). Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za krajinsko arhitekturo (samozaložba K. Mikoš): 115 f.

Mikoš, M., Krajnc, A., Matičič, B., Müller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2003. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Actahydrotechnica 20, 32.

http://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf (Pridobljeno 15. 12. 2012.)

Nakaya Diagram. 2010.

<http://ffky.edublogs.org/2010/11/27/nakaya-diagram/> (Pridobljeno 18. 2. 2013.)

Občinski praznik Tamar, 2009.

<http://www.planinskodrustvo-medvode.si/albumi/2009/TAMAR/slides/T%2017.html>

(Pridobljeno 12. 12. 2013)

Ogrin, M., Ortar, J. 2007. The importance of water accumulation of snow cover measurements in mountainous regions of Slovenia. = Pomen meritev vodnatosti snežne odeje v slovenskih gorskih pokrajinah. Acta geographica Slovenica 47, 1: 47–71.

<http://giam.zrc-sazu.si/zbornik/03-Ags-47-1-047-071-Ogrin-Ortar.pdf> (Pridobljeno 1. 5. 2012.)

Pavšek, M. 2008. Aprilska pomlad. Planinski vestnik.

<http://www.gore-ljudje.net/novosti/37456/>

Podgornik, R. H₂O. 2010. Univerza v Ljubljani. Ljubljana. Inštitut Jožef Štefan: 399 str.

Prestrud, P. 2013. Why are Ice and Snow Important to Us?. Center for International Climate and Environmental Research. Oslo, Norway: 10 str.

http://www.unep.org/geo/geo_ice/PDF/GEO_C2_LowRes.pdf (Pridobljeno 11. 2. 2013.)

Radinja, D. 1997. Kmetijsko obremenjevanje slovenskega alpskega sveta na izbranem primeru. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo: 15 str.

<http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-RK2HFWEG/> (Pridobljeno 15. 12. 2013)

Rakovec, J., Vrhovec, T. 2000. Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike. Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije: 329 str.

Schlatter, T. 2010. Weather Queries. Weatherwise. Philadelphia.

<http://www.weatherwise.org/Archives/Back%20Issues/2010/March-April%202010/weather-queries-full.html> (Pridobljeno 21. 2. 2013.)

Rockwood, D.M. 1972. New techniques in forecasting runoff from snow. Proceedings of the Banff Symposia. Geneva. Unesco: 1058–1061.

<http://iahs.info/redbooks/a107/107083.pdf> (Pridobljeno 24. 3. 2013.)

Scharffenberg, A. W., Fleming, M. J. 2010. Hydrologic modeling System HEC-HMS. United States Army Corps of Engineers. Washington, DC. User's manual: 306 str.

Singh, P., Singh, V.P. 2001. Snow and glacier hydrology. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers: 742 str.

Slovar slovenskega knjižnega jezika. 2000.

<http://bos.zrc-sazu.si/cgi/neva.exe?name=ssbsj&tch=14&expression=zs%3D31390>

(Pridobljeno 15. 5. 2012.)

Snežni plazovi. 2012.

http://plazovi.info/plazovi/snezna_odeja.html (Pridobljeno 20. 4. 2012.)

Sovre, K. 2009. Hidrološka študija visokih voda Bistrice v porečju Sotle. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba K. Sovre): 126 f.

Stušek, S. 2007. Sneg in taljenje snega v hidrološkem krogu – meritve. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Stušek): 62 f.

Stušek, S. 2008. Uporaba satelitskih posnetkov za potrebe snežne hidrologije v slovenskem prostoru. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Stušek): 92 f.

Šegula, P. 1986. Sneg, led, plazovi. Ljubljana, Planinska zveza Slovenije: 301 str.

The Snowflake Man. 2012. Jericho Historical Society. Jericho, Vermont.

<http://snowflakebentley.com/bio.htm> (Pridobljeno 20. 2. 2013.)

The snow melting process. 2003.

<http://www.shuswaplakewatch.com/research/snowmelt.html> (Pridobljeno 7. 2. 2013.)

Trobec, T. 2008. Hidrogeografske metode ocenjevanja nemerjenih obdobjnih pretokov v Sloveniji. Znanstveni članek. Dela 29, 119-130.

UCAR. 2004. Snowpack and snowmelt (Basic Hydrologic Science Course – Understanding the Hydrologic Cycle). Spletni modul. University Corporation for Atmospheric Research. Boulder, Colorado.

http://www.meted.ucar.edu/hydro/basic_int/hydrologic_cycle/navmenu.php?tab=1&page=6.0.0 (Pridobljeno 8. 12. 2012.)

UCAR. 2007. Snowmelt Processes. Spletni modul. University Corporation for Atmospheric Research. Boulder, Colorado.

https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=247 (Pridobljeno 5. 2. 2013.)

UCAR. 2010. Runoff Processes. Spletni modul. University Corporation for Atmospheric Research. Boulder, Colorado.

http://www.meted.ucar.edu/hydro/basic_int/runoff/print.htm#page_1.0.0

(Pridobljeno 24. 2. 2013.)

UCAR. 2011. Snowmelt Processes: International Edition. Spletni modul. University Corporation for Atmospheric Research. Boulder, Colorado.

https://www.meted.ucar.edu/training_module.php?id=804 (Pridobljeno 27. 11. 2012.)

USACE. 1998. Engineering and Design – Runoff from Snowmelt. Spletni modul. United States Army Corps of Engineers. Washington, DC. Engineering Manual 1110-2-1406: 142 str.

http://publications.usace.army.mil/publications/eng-manuals/EM_1110-2-1406_sec/toc.htm

(Pridobljeno 20. 5. 2012.)

USACE. 2011. Update on HEC Software (HEC-HMS, HEC-RAS, RAS Mapper). Institute for Water Resources – Hydrologic Engineering Center. Iowa City. Power Point predstavitev: 73 str.

http://www.ucs.iastate.edu/mnet/_repository/2011/waterresources/pdf/mapper-update.pdf

(Pridobljeno 20. 2. 2014.)

USDA. 2004. Snowmelt. V: National Engineering Handbook – Part 360 Hydrology. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service: 21 str.

<http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?&cid=stelprdb1043063>

(Pridobljeno 10. 5. 2012.)

Vertačnik, G., Sinjur, I., Ogrin, M. 2010. Nebo si delimo z oblaki. *Gea* 20, 3: 14–23.

Vidmar, A. 2013. Izdelava slike DMV. Osebna komunikacija. (11. 12. 2013)

Wallpaper. 2013.

<http://wallpaper.mob.org/cut/#src:http://images.mob.org/pic/gallery/real/peizazh-reka-sneg-voda-zima-13804.jpg;rmw:324;rmh:484;rw:425;rh:636;rc:000000;rl:580;rt:339;bp:99;tp:2493>

Wikipedija. 2013. Naravni rezervat Zelenci, stalni izvir Save Dolinke.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Zelenci> (Pridobljeno 12. 12. 2013)

WMO. 1994. Guide to hydrological practices. Peta izdaja. American Meteorological Society: 735 str.

Zakaj pada sneg?. 2013. MMC RTV Slovenija.

<http://bansi.rtvlo.si/novica/5555> (Pridobljeno 11. 2. 2013.)

Zupan, J. 2001. Naj sneži. *Kvarkadabra* – časopis za tolmačenje znanosti.

http://www.kvarkadabra.net/index.html?fizika/teksti/naj_snezi.htm (Pridobljeno 18. 2. 2013.)