

**Agrovoc descriptors:** meteorology, climatic change, air temperature, environmental temperature, environmental factors, precipitation, models, regional planning, weather forecasting

**Agris category code:** P40

COBISS code 1.01

## Nekatere metode za pripravo regionalnih scenarijev podnebnih sprememb

Klemen BERGANT<sup>1</sup> in Lučka KAJFEŽ BOGATAJ<sup>2</sup>

Prispelo 20. septembra 2004, sprejeto 10. oktobra 2004  
Received September 20, 2004, accepted October 10, 2004

### IZVLEČEK

Za oblikovanje strategij prilagoditev predvidenim podnebnim spremembam potrebujemo scenarije bodočega podnebja v regionalni skali. Lokalne podnebne razmere so običajno v veliki meri odvisne od procesov, ki potekajo v manjši skali, kot je prostorska ločljivost globalnih modelov splošne cirkulacije (MSC), ki so orodje za proučevanje odziva podnebnega sistema na spremembe sestave ozračja. V delu so zato prikazani načini, kako premostimo prepad med obsežno prostorsko in regionalno skalo, kar imenujemo tudi empirično zmanjševanje skale. Pri tem smo za povezavo podnebnih spremenljivk v regionalni oziroma lokalni skali s podnebnimi spremenljivkami v obsežni skali uporabili različne matematične modele. Modele, ki temeljijo na izmerjenih vrednostih v preteklosti, smo uporabili za projiciranje rezultatov simulacij štirih MSC. Pri tem predpostavimo, da bo v spremenjenih podnebnih razmerah matematični opis odvisnosti med lokalno podnebno spremenljivko in podnebno spremenljivko v globalni skali še vedno veljaven. V obdobju 2001 do 2030 se bodo v Sloveniji temperature zraka povečale za 0.5°C do 2.5°C, v obdobju 2031 do 2060 za 1°C do 3.5°C in v obdobju 2061 do 2090 za 1.5°C do 6,5°C. Več težav je z empiričnimi modeli za ocenjevanje letne količine padavin, saj je kakovost modelov zadovoljiva le za mesece hladne polovice leta.

**Ključne besede:** podnebje, podnebne spremembe, scenariji, temperatura, padavine, Slovenija

### ABSTRACT

#### EMPIRICAL DOWNSCALING METHOD AS A TOOL FOR DEVELOPMENT OF REGIONAL CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Results of simulations with general circulation models (GCM) are the basis for the future climate change and impact studies. In our case, results of simulations with four GCM (CSIRO/Mk2, UKMO/HadCM3, DOE-NCAR/PCM and MPI-DMI/ECHAM4-OPYC3), based on SRES A2 and B2 marker emission scenarios, were used. The mean monthly values of near

<sup>1</sup> Dr., Politehnika Nova Gorica, p.p. 301, 5000 Nova Gorica, e-pošta: klemen.bergant@p-ng.si

<sup>2</sup> Prof., dr., Biotehniška fakulteta, p.p. 2995, 1001 Ljubljana, e-pošta: lucka.kajfez.bogataj@bf.uni-lj.si

ground air temperature and sea level pressure were selected for the period 1951-2100 and used as predictor values. The results of GCM were projected to near ground air temperature and precipitation amount at five locations in Slovenia (Ljubljana, Novo mesto, Murska Sobota, Rateče, and Bilje) by using empirical downscaling. Different regression techniques were used for the development of empirical downscaling models (EM) that relate selected large-scale predictors with local-scale predictands. The EM were developed by means of data from ARSO archive and NCEP/NCAR reanalysis data for the period 1951-2002. Derived EM explained a great part of variability of local air temperature at all five locations. This was not the case for the local precipitation, where the quality of EM is acceptable only for the months of the cold half of the year. Local projections of GCM results by EM were additionally scaled to other (A1FI, A1B, A1T, and B1) marker SRES scenarios and used as a base for the development of regional climate change scenarios.

**Key words:** climate change, scenarios, air temperature, precipitation, Slovenia, downscaling methods

## 1 UVOD

Številne gospodarske dejavnosti so odvisne od vremenskih oziroma podnebnih razmer. Poznavanje teh odvisnosti nam omogoča, da pri načrtovanju čimbolj izkoristimo podnebne danosti in odkrijemo gospodarsko ter okoljsko najprimernejše rešitve. V zadnjih desetletjih smo priča izraziti spremenljivosti podnebja, ki ji v veliki meri botruje človek. Različni družbeno-gospodarski kazalci tudi v prihodnje predvidevajo pomembno vlogo človeka pri spremenljivosti podnebja, zato se zdijo dokaj izrazite spremembe podnebja skoraj neizbežne. Da podnebnih sprememb ne bomo pričakali nepripravljeni, potrebujemo strategije prilagoditev predvidenim podnebnim spremembam oziroma strategije blažitve njihovega negativnega vpliva. Osnova takšnim strategijam so scenariji<sup>3</sup> podnebnih sprememb. Namen naše študije je bil izdelati okvirne scenarije podnebnih sprememb za območje podnebno raznolike Slovenije.

Vzroki za spremembe podnebja so lahko različni. Kadar se dejavniki podnebja spremenijo brez posredovanja človeka govorimo o naravni spremenljivosti podnebja. V zadnjem času se vse večjo vlogo spremembam podnebja pripisuje človeku. Pri tem govorimo o človeško pogojeni spremenljivosti podnebja.

Glavno vlogo pri človeško pogojeni spremenljivosti podnebja igrajo emisije toplogrednih plinov (TGP: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>x</sub>O, O<sub>3</sub>, ...) in aerosolov - mikroskopskih lebdečih delcev ali kapljic (najpomembnejši so sulfatni), ki spreminjajo sestavo ozračja. Glavni vir omenjenih tri in več-atomnih plinov in aerosolov je uporaba fosilnih goriv, ki narašča vse od začetka industrijske dobe do danes. Brez krivde pri emisijah toplogrednih plinov ni niti kmetijstvo, predvsem kar se tiče CH<sub>4</sub> (pridelava riža, živinoreja, gnojenje) in NO<sub>2</sub> (obdelovanje zemlje, gnojenje) (Freibauer, 2002). Čeprav naštetih TGP predstavljajo manj kot 0,1 vol.% suhega zraka, igrajo pomembno vlogo v energijski bilanci površja. Povzročajo učinek tople grede, po katerem imajo tudi ime. Najpomembnejši toplogredni plin je vodna para. Njen delež v zraku se zelo spreminja, v povprečju pa znaša približno 1 vol.%. Vzrok, da je med toplogrednimi

<sup>3</sup> SCENARIJ: Verjeten in pogosto poenostavljen opis morebitnega poteka prihodnosti, ki temelji na razumljivih in smiselni predpostavkah o ključnih povezavah in dejavnikih (Houghton in sod, 2001).

plini največja pozornost posvečena CO<sub>2</sub>, je v stalnem naraščanju njegove vsebnosti v ozračju v preteklem in tekočem stoletju ter relativno visoki vsebnosti v primerjavi z ostalimi toplogrednimi plini z izjemo H<sub>2</sub>O. Pomemben je tudi zaradi neposrednega vpliva na vegetacijo predvsem preko fotosinteze kot tudi preko uravnavanja delovanja listnih rež ter dihanja rastlin (Olesen in Bindi, 2002). Za razliko od prevladujočih plinov v ozračju: N<sub>2</sub> (78,1 vol.%), O<sub>2</sub> (20,9 vol.%) in Ar (0,9 vol.%), ki so večinoma propustni tako za kratkovalovno sončno sevanje, kot tudi za dolgovalovno sevanje površja, TGP absorbirajo del dolgovalovnega sevanja površja. Prav tako TGP tudi sevajo v dolgovalovnem spektru, pri čemer se del energije izseva nazaj proti površju. Tako površje preko sevanja prejme več energije, kot bi jo le zaradi sevanja Sonca. Učinek tople grede dejansko omogoča življenje na Zemlji, saj je zaradi njega povprečna temperatura površja višja kar za 33°C (v povprečju znaša +14°C), kot bi bila brez prisotnosti omenjenih plinov (predvidoma -19°C) (Houghton in sod, 2001). Z emisijami TGP povečujemo njihovo vsebnost v ozračju ter s tem zmanjšujemo prepustnost ozračja za sevanje površja. Učinek tople grede postaja bolj izrazit, kar povzroča dvig temperature površja. Razliko energije, ki jo zaradi učinka tople grede površje prejme od posameznih TGP, imenujemo sevalni prispevek. Na sončno sevanje in sevanje površja učinkuje tudi prisotnost aerosola. Kadar delci v ozračju spreminjajo prepustnost ozračja za sončno sevanje in sevanje površja, govorimo o neposrednem vplivu aerosola. Aerosol pa posredno vpliva tudi na sevalne lastnosti in količino oblakov, kar dodatno vpliva na sevalno prepustnost ozračja. Ker je z vidika energijske bilance učinek aerosola na zmanjšanje prepustnosti ozračja za sončno sevanje večji od učinka na zmanjšanje prepustnosti za sevanje površja, mu za razliko od TGP pripisujejo hladilni učinek (Houghton in sod, 2001).

Navkljub nekaterim skeptičnim pogledom o njihovi zanesljivosti (Schackley in sod, 1998; Idso, 1998) so modeli splošne cirkulacije (MSC) najpogosteje uporabljeno orodje za proučevanje odziva podnebne sistema na spremembe sestave ozračja (Storch s sod, 1993; Zorita in Storch, 1997; Rummukainen, 1997; Schubert, 1998; Zorita in Storch, 1999; Houghton in sod., 2001). Gre za tridimenzionalne numerične modele, v katerih so z diferenčnimi enačbami zajeti glavni fizikalni, kemijski in biološki procesi v ozračju, oceanih, ledu in na zemeljskem površju ter njihova medsebojna odvisnost (McGuffie in Handerson-Sellers, 1997). Primerjave rezultatov simulacij z MSC ter izmerjenih vrednosti kažejo, da MSC dobro opišejo procese v globalni oziroma obsežni prostorski skali (Houghton in sod, 2001). Zanesljivost njihovih rezultatov je žal manjša v regionalni oziroma lokalni skali. Na prvi pogled gre za kontradiktorno trditev. Vendar je globalna klima predvsem posledica porazdelitve sončnega obsevanja na Zemlji, vrtenja Zemlje ter vpliva velikih struktur zemeljskega površja (npr. porazdelitve kopnega in morja, topografije, ...), ki so zajeti v MSC. Regionalno oziroma lokalno podnebje je odziv globalnega podnebja na lastnosti površja (npr. razgibanost, vegetacija, ...) na regionalnem oziroma lokalnem nivoju (Zorita in Storch, 1999). Idealen MSC bi tako vseboval numerične opise vseh procesov in dejavnikov, ki vplivajo na podnebni sistem, v tako natančni prostorski mreži, da bi lahko razločili regionalne oziroma lokalne podnebne dejavnike. Zaradi omejenih računalniških zmogljivosti žal to ni mogoče, saj je omejena tako prostorska kot časovna ločljivost modelov. Trenutno razpoložljivi MSC v svojih izračunih upoštevajo horizontalno ločljivost 2×2°ali več (Crane in sod., 2002). Tako MSC ne vključujejo regionalnih površinskih podrobnosti, temveč le povprečno topografijo in vegetacijo za posamezno mrežno celico. Lokalne podnebne razmere so običajno v veliki meri odvisne od procesov, ki potekajo v manjši skali, kot je prostorska

ločljivost MSC, in so v MSC zajeti z različnimi parametrizacijami. Še posebno to velja za opis vpliva vegetacije. Opis pod mrežnih procesov s parametrizacijo nam da zadovoljive rezultate v skali večji od računske ločljivosti MSC, za interpretacijo v natančnejši prostorski skali pa so ti rezultati običajno neuporabni (Storch in sod., 1993; Schubert, 1998; Shackley in sod., 1998).

Ključni vhodni podatek za MSC pri proučevanju odziva podnebnega sistema na spremenjeno sestavo ozračja so scenariji emisij in posledična vsebnost TGP in aerosolov v ozračju v prihodnosti. Mednarodni forum za podnebne spremembe (IPCC) predlaga uporabo različnih scenarijev emisij združenih pod kratico SRES (Nakićenović in sod., 2000), katerih uresničitev v prihodnosti je enako verjetna. Scenariji emisij, ki jih v grobem lahko razdelimo v štiri skupine (A1, A2, B1 in B2) temeljijo na različnih predpostavkah od družbeno-gospodarskem razvoju v prihodnosti (za natančnejši opis glej Nakićenović in sod., 2000 ter Houghton in sod., 2001). Zaradi računske zahtevnosti simulacij z MSC, se običajno upošteva le nekaj predstavnikov iz množice možnih scenarijev, ter ustrezno uteži njihove rezultate glede na ostale scenarije. IPCC je v svojih študijah (Houghton in sod., 2001) upoštevalo SRES scenarije emisij, uporabil devet različnih MSC ter predstavnika dveh skupin SRES scenarijev - A2 in B2. Različni MSC se na spremembe sestave atmosfere odzovejo različno, kar je eden izmed glavnih pokazateljev negotovosti projekcij podnebnih sprememb za prihodnost na osnovi rezultatov simulacij z MSC (Giorgi in Francisco, 2000).

## 2 METODE DELA IN UPORABLJENI PODATKI

Neposredno nam simulacije z MSC nudijo dober vir informacije o predvideni spremenljivosti podnebnih razmer v prihodnosti v globalni skali. Zaradi slabe prostorske ločljivosti pa neposredna uporaba rezultatov simulacij z MSC v lokalnih in regionalnih študijah vpliva podnebnih sprememb na podnebno pogojene dejavnosti (npr. kmetijstvo, gozdarstvo, energetika, vodno gospodarstvo, turizem, zdravstvo, ...) običajno ni primerna (Dubrovsky, 1997; Benestad 2001a; Houghton in sod., 2001). Pretekla bodo najbrž še desetletja, preden bo dosežena zadostna prostorska ločljivost MSC, da bodo rezultati simulacij z njimi neposredno uporabni v študijah vpliva podnebnih sprememb na lokalnem nivoju. Interpretacija rezultatov simulacij z MSC v lokalni skali, predstavlja tako eno največjih težav pri študijah vpliva podnebnih sprememb (Crane in sod., 2002).

Eden izmed načinov premostitve prepada med obsežno in regionalno skalo je empirično zmanjševanje skale (Rummukainen, 1997; Wilby in Wigley, 1997; Zorita in Storch, 1997; Wilby s sod., 1998; Zorita in Storch, 1999; Storch in sod., 2000), ki smo ga uporabili v naši študiji. Pri tem se za povezavo podnebnih spremenljivk v regionalni oziroma lokalni skali s podnebnimi spremenljivkami v obsežni skali uporabljajo različni matematični modeli. Modele, ki temeljijo na izmerjenih vrednostih v preteklosti, nato uporabimo za projiciranje rezultatov simulacij z MSC. Pri tem predpostavimo, da bo v spremenjenih podnebnih razmerah matematični opis odvisnosti med lokalno podnebno spremenljivko in podnebno spremenljivko v globalni skali še vedno veljaven. Na tej predpostavki temelji celotna metoda empiričnega zmanjševanja skale (Giorgi in Mearns, 1991; Storch in sod., 1993; Schubert, 1998), čeprav za njeno veljavnost nimamo nikakršnega zagotovila (Zorita in Storch, 1999). Vendar je ob uporabi dolgih časovnih vrst podatkov pri izdelavi modela smiselno predpostaviti, da le-te vsebujejo številne različne vremenske oz. podnebne situacije, vključno s tistimi, ki bodo pogostejše ali izrazitejše v spremenjenih podnebnih razmerah. Predpostavka velja le, kadar so predvidene spremembe povprečnih podnebnih razmer v okviru variabilnosti podnebnih razmer, na katerih temelji izdelan model.

Postopek empiričnega zmanjševanja skale zapišemo z naslednjimi koraki (Zorita in Storch, 1997):



## IZDELAVA MODELA

- Izbira lokalne podnebne spremenljivke ( $y$ ), ki nas zanima;
- Izbira ene ali več podnebnih spremenljivk v obsežni skali ( $\mathbf{x}$ ), ki vplivajo na  $y$  v smislu  $y = F(\mathbf{x}, \mathbf{a}) + \varepsilon$ , kjer  $\mathbf{a}$  predstavlja parametre modela,  $\varepsilon$  pa del  $y$ -a, ki ga z modelom ne pojasnimo. Pogoj je, da izbran model dobro simulira spremenljivko  $y$ .
- Uporaba izmerjenih parov spremenljivk ( $y, \mathbf{x}$ ) za oceno parametrov modela  $\hat{\mathbf{a}} = \arg \min \|y - F(\mathbf{x}, y)\|$ .
- Preverba modela  $\hat{y} = F(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{a}})$  na neodvisnih historičnih podatkih.

## UPORABA MODELA

- Pridobitev vrednosti podnebnih spremenljivk  $\mathbf{x}$  preko izhodnih podatkov simulacij z izbranim podnebnim modelom.
- Preverba, če podnebni model dobro opiše sedanje podnebne razmere in s tem povezavo med  $\mathbf{x}$  in  $y$ .
- Ocena vrednosti  $\hat{y}$  z izdelanim modelom  $\hat{y} = F(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{a}})$  za obdobje v prihodnosti.
- Uporaba ocenjenih vrednosti spremenljivke  $\hat{y}$  v modelih vpliva podnebnih sprememb na različne dejavnike in procese na lokalnem nivoju.

Najtežji korak pri empiričnem zmanjševanju skale predstavlja izdelava empiričnega modela. Na razpolago je številna literatura o pregledu in primerjavi različnih pristopov k empiričnemu zmanjševanju skale (Hewitson in Crane, 1996; Wilby in Wigley, 1997; Zorita in Storch, 1997; Rummukainen, 1997; Weichert in Bürger, 1998; Zorita in Storch, 1999; Storch in sod., 2000; Crane in sod., 2002). V našem primeru smo za izdelavo empiričnih modelov uporabili regresijo na glavnih oseh (angl. *Principal Component Regression - PCR*) (Schubert, 1998; Benestad in sod., 2002; Bergant in sod., 2002) ter dve različici regresije delnih najmanjših kvadratov (angl. *Partial Least Square Regression - PLS*) (de Jong 1993; Bro, 1998; Helland 2001; Abdi, 2003; Wentzell in Montoto 2003). Modeli so bili izdelani za vsak mesec posebej, s čemer upoštevamo dejstvo, da v različnih obdobjih leta na podnebne razmere v Sloveniji vplivajo različni temperaturni in cirkulacijski vzorci. Prav tako s tem zajamemo letni hod spremenljivk, ki jih ocenjujemo. Podroben opis metod PCR in PLS presega obseg poročila in je podan v Bergant (2003) ter Bergant in Kajfež-Bogataj (2004).

Empirični modeli temeljijo na izmerjenih oziroma rekonstruiranih vrednostih podnebnih spremenljivk v obsežni skali (prediktorjih) in podnebnih spremenljivk v lokalni skali (prediktandih). V vlogi prediktorjev smo uporabili temperaturo zraka ob površju ter zračni tlak na nivoju morja, pri čemer smo podatke za preteklo obdobje 1951-2002 v mesečni časovni skali črpali iz baze podatkov ponovne analize NCEP/NCAR (Kalnay in sod., 1996; Kistler in sod., 2001), ki je prosto dostopna na URL naslovu <http://ingrid.lidgo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/>. Ob uporabi različnih prediktorskih območij se je kot najprimernejše izkazalo območje, ki se razteza med 10° zahodne in 30° vzhodne geografske dolžine ter 35° severne in 65° severne geografske širine. Polja prediktorjev na tem območju smo z empiričnimi modeli povezali z vrednostmi temperature zraka in količine padavin, ki temeljijo na meritvah z meteoroloških postaj Ljubljana-Bežigrad, Novo mesto, Murska Sobota, Rateče, in Bilje. Postaje so bile izbrane kot predstavnice različnih podnebnih pasov (Ogrin, 1998), ki se prepletajo na območju Slovenije (Preglednica 1). Vir podatkov o meritvah na izbranih lokacijah je bil **arhiv Agencije RS za okolje**. Za postaje Ljubljana-Bežigrad, Novo mesto, Maribor, Murska Sobota, in Rateče smo razpolagali s srednjimi mesečnimi vrednostmi temperature zraka in količine padavin za obdobje 1951-2002, za postajo Bilje pa za obdobje 1962-2002.

Preglednica 1: Izbrane meteorološke postaje skupaj z njihovimi geografskimi podatki ( $\lambda$  – geografska dolžina,  $\varphi$  – geografska širina,  $z$  – nadmorska višina) in tipom podnebja, ki ga predstavljajo

Meteorološke postaje	Geografski podatki			Tip podnebja
	$\lambda$ [°V]	$\varphi$ [°S]	$z$ [m]	
Ljubljana - Bežigrad	14,52	46,07	299	zmerno celinsko
Novo mesto	15,18	45,80	220	zmerno celinsko
Murska Sobota	16,18	46,65	188	zmerno celinsko
Rateče	13,72	46,50	864	nižinsko gorsko
Bilje	13,63	45,90	55	zaledno submediteransko

Za ocenjevanje podnebnih sprememb v prihodnosti smo uporabili rezultate simulacij s 4 MSC (Preglednica 2), v katerih sta bila upoštevana SRES A2 in B2 scenarija emisij. Uporabljeni podatki so javno dostopni na straneh podatkovnega centra IPCC [http://ipcc-dcc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz\\_indeks.html](http://ipcc-dcc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz_indeks.html). Izbrani modeli so v času naših izračunov predstavljali modele z največjo prostorsko ločljivostjo. Z vidika simulacij regionalnih podnebnih razmer je kakovost modelov v veliki meri odvisna od zmogljivosti računalnikov, kar govori v prid novejšim MSC. Zmogljivejši računalniki omogočajo izračune z natančnejšo prostorsko ločljivostjo in uporabo realnejših, a računsko zahtevnejših parametrizacijskih shem za fizikalne procese v ozračju, na kopnem in v oceanih. Ob boljši prostorski ločljivosti sta v modelih natančneje predstavljena orografija ter razporeditev kopnega in morja, ki igrata pomembno vlogo pri regionalnih podnebnih razmerah. Zaradi tega je prostorska ločljivost eden izmed osnovnih kriterijev izbire rezultatov MSC za uporabo v študijah vpliva podnebnih sprememb na regionalnem nivoju. Vseeno je težko z gotovostjo trditi, kateri izmed modelov je bolj zanesljiv od drugih (Giorgi in Mearns, 2002). Zato je smiselna uporaba ansambla rezultatov simulacij z več različnimi MSC. Lambert in Boer (2001) sta prišla do zaključkov, da klimatološka polja pridobljena s povprečenjem rezultatov simulacij s številnimi različnimi MSC bolje ustrezajo meritvam kot klimatološka polja iz posameznih simulacij. To lahko razumemo kot namig, da skupna informacija ansambla različnih modelskih simulacij privede do zanesljivejših rezultatov. Allen in sod. (2000) sicer opozarja na pomanjkljivosti uporabe razpona rezultatov različnih MSC kot merila negotovosti, saj nimamo zagotovila, da različni modeli res obsegajo celoten obseg odzivov podnebnega sistema na spremenjeno sestavo ozračja. To še posebej velja, kadar uporabljen ansambel MSC vključuje le majhno število različnih modelov. Navkljub dvomom Allena in sod. (2000), smo po zgledu Lamberta in Boera (2000), Giorgija in Mearns (2002) ter Benestada (2002a, 2002b) obravnavali rezultate posameznih MSC kot del ansambla različnih možnih odzivov podnebnega sistema na spremenjeno sestavo ozračja. Rezultate njihovih simulacij smo v naših izračunih upoštevali enakovredno, čeprav Giorgi in Mearns (2002) predlagata zanimiv način uteževanja rezultatov različnih MSC glede na njihov opis preteklih podnebnih razmer. Ker je prostorska ločljivost rezultatov različnih modelov oziroma njihova mreža točk v smeri geografske dolžine in širine različna (Preglednica 2), smo vse podatke o prediktorjih pred izdelavo empiričnih modelov in projekcijami rezultatov MSC na lokalni nivo interpolirali z bilinearno metodo (Press in sod, 2001) v horizontalno mrežo  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ .

Lokalne projekcije sprememb temperature zraka in količine padavin, ki temeljijo na MSC simulacijah z uporabo SRES A2 in B2 scenarijev emisij, smo dodatno utežili na ostale predstavnike glavnih skupin SRES scenarijev (A1T, A1FI, A1B). Pri tem smo uporabili metodo prirejanja vzorcev (Mitchell, 2003).

Preglednica 2: Povzetek lastnosti izbranih podatkovnih nizov prediktorjev: izbran model, država razvoja modela, obdobje za katerega smo uporabili razpoložljive podatke, horizontalna ločljivost podatkov ter število modelskih točk v horizontalni podatkovni mreži.

Model	Država razvoja	Obdobje	Hor. loč.	Mreža
NCEP/NCAR	ZDA	1951-2002	1,9×1,9 <sup>4</sup>	192×96
CSIRO/Mk2	Avstralija	1961-2100	5,6×3,2°	64×56
UKMO/HadCM3	Velika Britanija	1951-2099	3,8×2,5°	96×73
DOE-NCAR/PCM	ZDA	1961-2099	2,8×2,8°	128×84
ECHAM4-OPYC3 <sup>5</sup>	Nemčija	1951-2100	2,8×2,8°	128×84

### 3 REZULTATI

Delež variabilnosti temperature zraka na izbranih lokacijah v Sloveniji, ki ga pojasnimo s PLS in PCR modeli, v večini primerov presega 75%. To potrjuje primernost uporabe izdelanih modelov za ocenjevanje temperature zraka v Sloveniji. Rezultati projekcij sprememb temperature zraka v 21. stoletju so za izbranih pet lokacij prikazani na slikah 1 do 5. Spremembe so prikazane glede na primerjalno obdobje 1961-1990 kot 30-letna povprečja s korakom 10 let. Različne prekinjene črte z znaki predstavljajo projekcije, ki ustrezajo enemu izmed predstavnikov SRES scenarijev, a so povprečene preko štirih MSC. Sivo območje ustreza razponu preko vseh SRES scenarijev in vseh uporabljenih MSC, polna črta pa povprečju vseh projekcij. Izbrane lokacije predstavljajo različna območja Slovenije – osrednjo, JV, SV, SZ in JZ Slovenijo.

O predznaku sprememb temperature zraka v 21. stoletju glede na rezultate projekcij rezultatov MSC ni dvoma. Ob predvidenem povečanju vsebnosti toplogrednih plinov in sulfatnih aerosolov se bo dvignila temperatura zraka na celotnem območju Slovenije. Pri tem ni opaziti izrazitih razlik med posameznimi območji Slovenije. Velikost predvidenih temperaturnih sprememb je v veliki meri odvisna od izbranega scenarija emisij. V obdobju 2001 do 2030 se bodo v Sloveniji temperature zraka predvidoma povečale za 0,5°C do 2,5°C, v obdobju 2031 do 2060 za 1°C do 3,5°C in v obdobju 2061 do 2090 za 1,5°C do 6,5°C.

Več težav je z empiričnimi modeli za ocenjevanje količine padavin, saj je kakovost modelov zadovoljiva pri večini meteoroloških postaj le za mesece hladne polovice leta. Za postaje z zmernim celinskim podnebjem in podnebjem nižjega gorskega sveta JZ od Dinarsko-Alpske gorske pregrade (Ljubljana, Novo mesto, Rateče) delež pojasnjene variabilnosti z empiričnimi modeli večinoma presega 50%. Učinek Dinarsko-Alpske gorske pregrade je opazen na slabši kakovosti modelov za Mursko Soboto. Učinkovitost modelov za postajo Bilje je nekoliko manjša od učinkovitosti za celinske postaje JZ od Dinarsko-Alpske gorske pregrade in večja od učinkovitosti za celinske postaje SV od pregrade. V vseh primerih je delež pojasnjene variabilnosti izrazito majhen v topli polovici leta, še posebej v poletnih mesecih. Delež pojasnjene variabilnosti za poletne mesece le z redkimi izjemami preseže 40%. Pogosto se zgodi, da z izbrano metodologijo v poletnih mesecih ne najdemo nikakršne povezave med

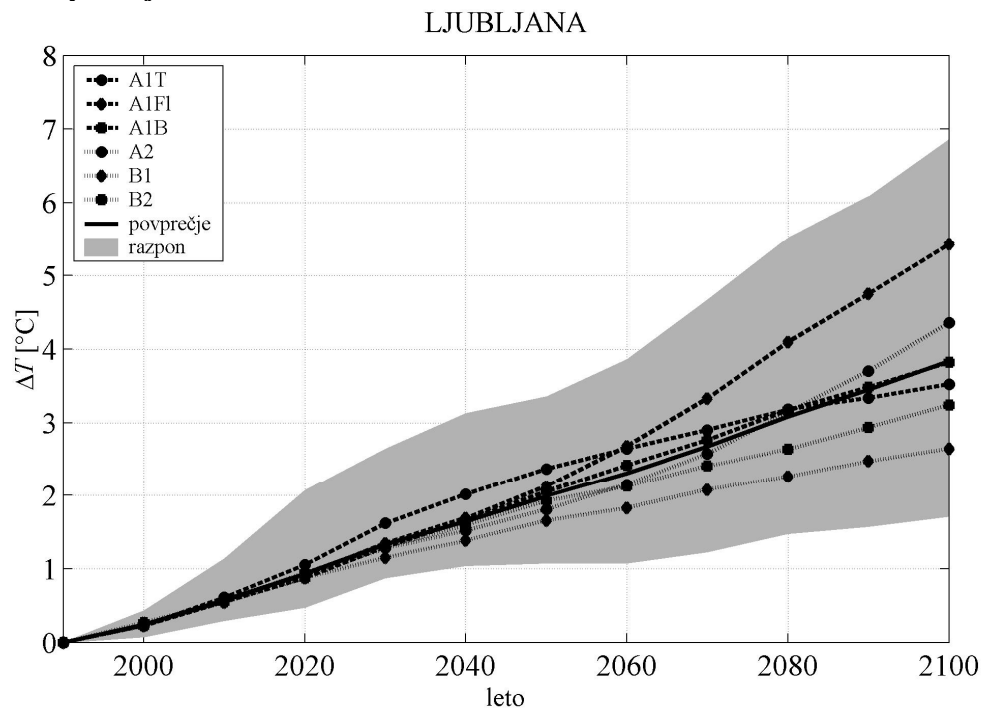
<sup>4</sup> V primeru podatkov za SLP je horizontalna ločljivost 2,5°×2,5° ter mreža točk 144×72.

<sup>5</sup> Polno ime modela skupaj z oznakami razvojnih centrov je MPI-DMI/ECHAM4-OPYC3.



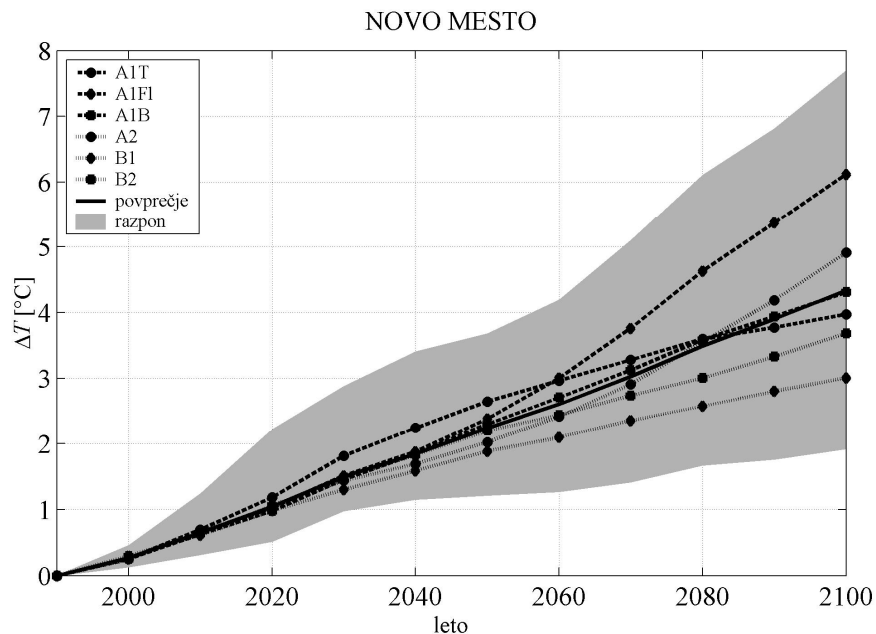
količino padavin na izbrani lokaciji in cirkulacijskimi ter temperaturnimi vzorci nad zahodno in osrednjo Evropo. V takšnih primerih dolgoletno povprečje za primerjalno obdobje predstavlja najboljšo možno oceno vrednosti v prihodnosti. Slovenija leži na razgibanem prepletu alpskega, sredozemskega in panonskega vpliva, kjer je raznolikost podnebnih razmer na majhnem območju izredna. Lokalni vplivi, še posebej na padavinske spremenljivke, pogosto prevladajo nad situacijo v obsežni skali, kar onemogoča izdelavo kakovostnih empiričnih modelov za ocenjevanje padavinskih spremenljivk še posebej v topli polovici leta. Kakovost empiričnih modelov je v veliki meri odvisna tudi od kakovosti podatkov, na katerih so bili modeli izdelani. Ob tako majhnem deležu pojasnjene variabilnosti za količino padavin, tvegamo da z modelom nismo zajeli pomembnega dela dinamike spremenljivke, ki bi lahko spremenil tako predznak kot velikost predvidenih sprememb. Zato je potrebna velika previdnost pri interpretaciji projekcij z izdelanimi empiričnimi modeli za količino padavin.

Da bo zanesljivost projekcij bolj vprašljiva v primeru količine padavin, so nakazali že rezultati kakovosti empiričnih modelov. V projekcijah, kjer sta bila kot prediktor uporabljena zračni tlak na nivoju morja kot temperatura zraka (sliki 6 in 7), lahko zasledimo trend zmanjševanja količine padavin. Vendar se moramo zavedati, da rezultati MSC za temperaturo zraka ob površju v 21. stoletju vključujejo izrazit pozitiven trend, kot posledico predvidenega povečanja vsebnosti toplogrednih plinov v ozračju. Če z empiričnim modelom za količino padavin zajamemo del spremenljivosti temperature zraka vezane na trend, se bo to izražalo v enotni usmerjenosti projekcij rezultatov MSC za prihodnost. Pri tem lahko kaj hitro zaidemo iz območja vrednosti, ki so služile za izdelavo modela, in naletimo na **problem ekstrapolacije**.

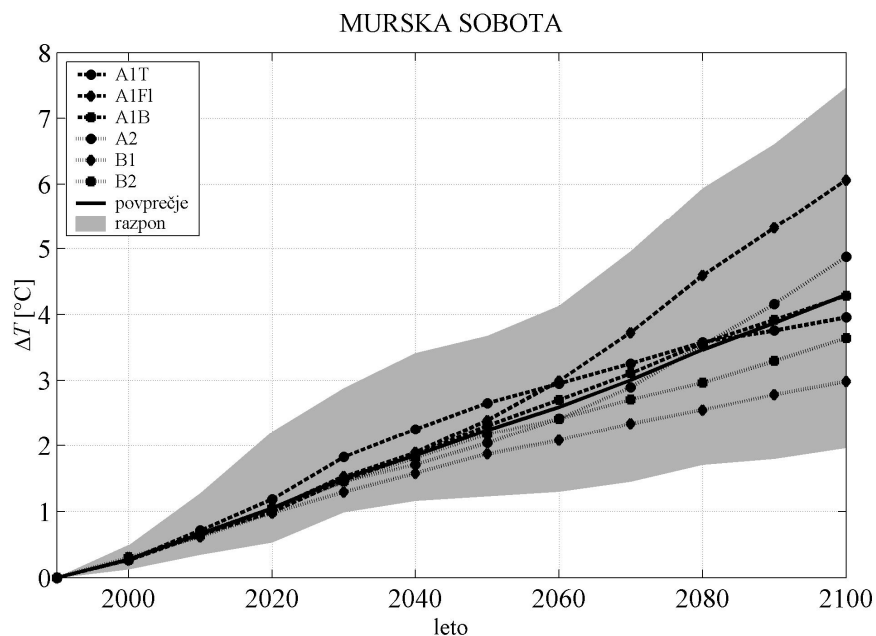


Slika 1: Predviden dvig temperature zraka ( $\Delta T$  v  $^{\circ}\text{C}$ ) v Ljubljani.

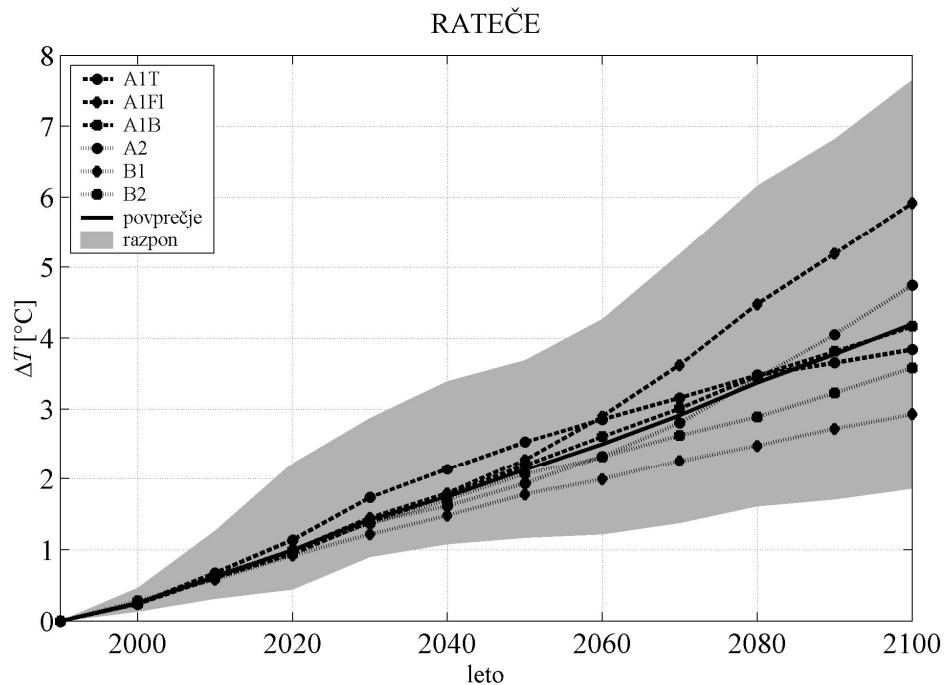
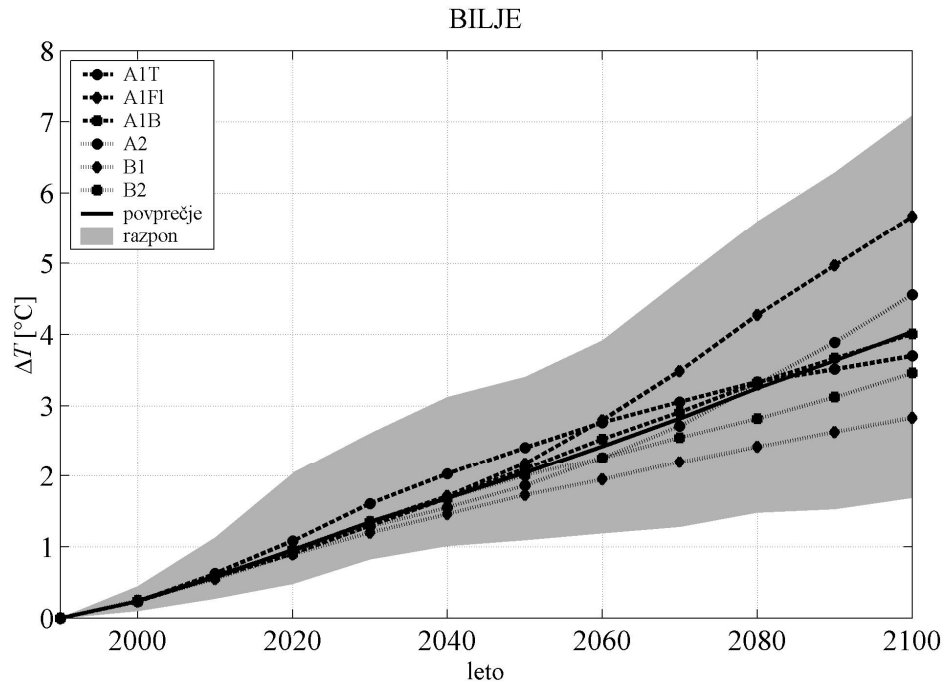
Uporaba takšnih modelov je s statističnega vidika vprašljiva, saj nimamo zagotovila, da bo na primer povezava med višjimi temperaturami zraka in manjšimi količinami padavin v topli polovici leta enolično držala tudi izven območja vrednosti, ki je služilo za izdelavo modela. Možno nestacionarnost povezav med količino padavin v lokalni skali in cirkulacijskimi indeksi v svoji študiji poudarja tudi Wilby (1997).



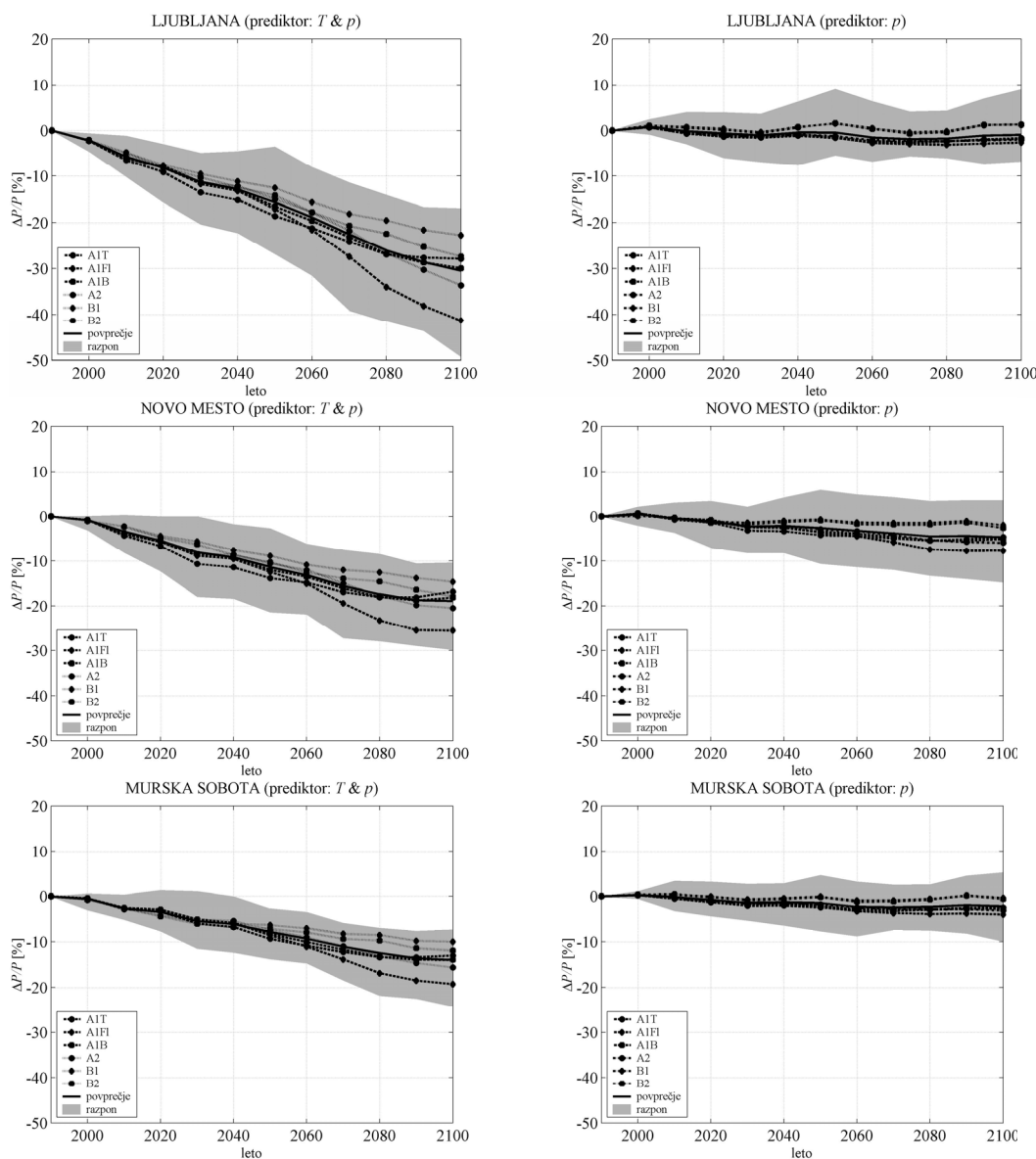
Slika 2: Predviden dvig temperature zraka ( $\Delta T$  v  $^{\circ}\text{C}$ ) v Novem mestu.



Slika 3: Predviden dvig temperature zraka ( $\Delta T$  v  $^{\circ}\text{C}$ ) v Murski Soboti.

Slika 4: Predviden dvig temperature zraka ( $\Delta T$  v  $^{\circ}\text{C}$ ) v Ratečah.Slika 5: Predviden dvig temperature zraka ( $\Delta T$  v  $^{\circ}\text{C}$ ) na postaji Bilje.

Če kot prediktor uporabimo le zračni tlak na nivoju morja (slika 6 in 7 desno), izrazitega trenda k zmanjšanju količine padavin v projekcijah rezultatov MSC ni opaziti. V tem primeru je delež variabilnosti, ki ga pojasnijo empirični modeli, še nekoliko manjši kar dodatno omaja zaupanje v njihovo uporabnost. Zato nam projekcije spremembe količine padavin služijo le kot groba ocena pri izdelavi scenarijev podnebnih sprememb.

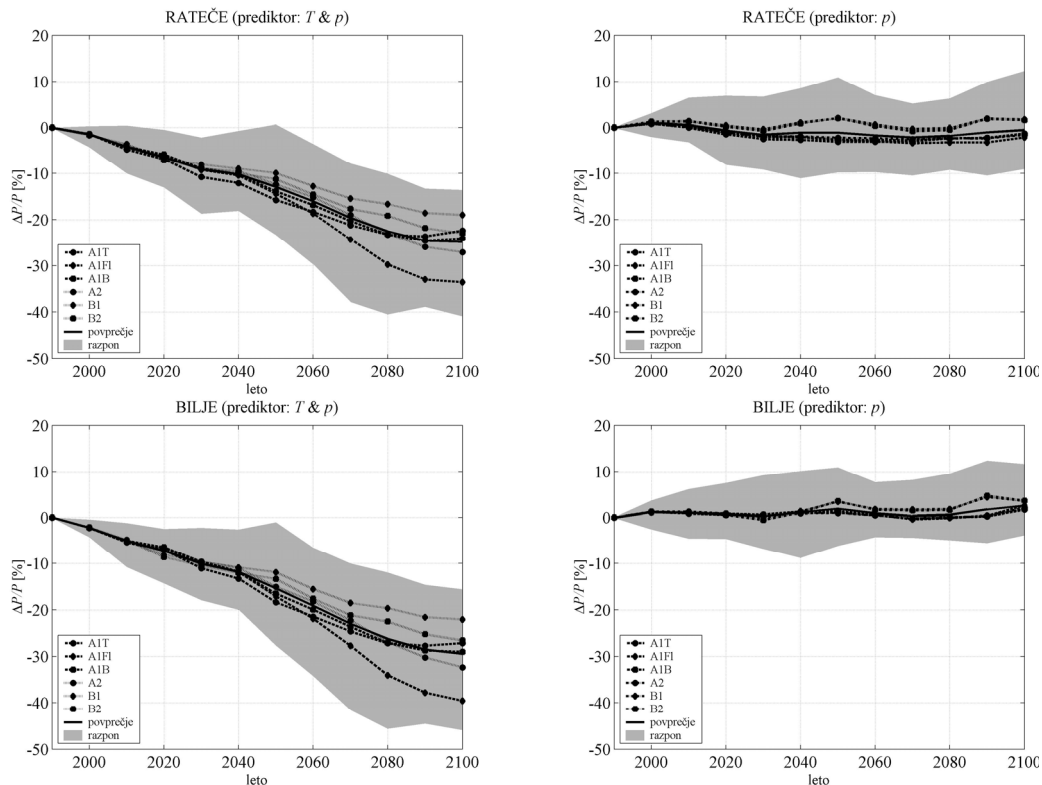


**Slika 6:** Predvidene spremembe količine padavin ( $\Delta P/P$  v %) v Ljubljani, Novem mestu, Murški Soboti. Leva stran prikazuje rezultate projekcij, pri katerih so bili empirični modeli izdelani z uporabo temperature zraka ( $T$ ) in zračnega tlaka na nivoju morja ( $p$ ), desna stran pa rezultate projekcij, pri katerih je bil kot prediktor uporabljen le  $p$

#### 4 DISKUSIJA IN SKLEPI

Prikazane projekcije rezultatov izbranih MSC so osnova za izdelavo scenarijev podnebnih sprememb za različna podnebna območja Slovenije. Zaradi kakovostnejših empiričnih modelov ter večje enotnosti v projekcijah med bližnjimi kraji ter ob uporabi različnih regresijskih metod so projekcije sprememb temperature zraka dokaj zanesljive. Manjša kakovost modelov ter večja razpršenost projekcij sprememb količine padavin ob uporabi različnih regresijskih metod ter nabora prediktorjev

zahteva večjo previdnost pri interpretaciji projekcij in njihovi uporabi pri izdelavi scenarijev podnebnih sprememb.



**Slika 7:** Predvidene spremembe količine padavin ( $\Delta P/P$  v %) v Ratečah in Biljah. Leva stran prikazuje rezultate projekcij, pri katerih so bili empirični modeli izdelani z uporabo temperature zraka ( $T$ ) in zračnega tlaka na nivoju morja ( $p$ ), desna stran pa rezultate projekcij, pri katerih je bil kot prediktor uporabljen le  $p$ .

Vrednosti prediktorjev, še posebej temperature zraka, bodo v spremenjenih podnebnih razmerah predvidoma presegle okvire vrednosti, ki so bile uporabljene pri izdelavi modelov. Zato je uporaba empiričnega zmanjševanja skale s statističnega vidika vprašljiva, saj predstavlja ekstrapolacijo. Pogosto se kot primernejši, a računsko zahtevnejši, pristop predlaga dinamično zmanjševanje skale z uporabo gnezdenih regionalnih podnebnih modelov. Vendar tudi številne parametrizacije v dinamičnih modelih temeljijo na meritvah v preteklosti in prav tako nimamo nikakršnega zagotovila, da bodo veljale v prihodnosti. Z neke vrste ekstrapolacijo so tako obremenjene kakršnekoli projekcije podnebnih sprememb za prihodnost. Še bolj vprašljiva od uporabe rezultatov empiričnega zmanjševanja skale je v primeru projekcij sprememb količine padavin neposredna uporaba rezultatov MSC. Velikost padavinsko zelo raznolike Slovenije je primerljiva z velikostjo ene same mrežne točke v MSC. Poleg tega je pojav in količina padavin največji problem modeliranja vremenskih procesov v ozračju, še posebej ko gre za konvektivne padavine, ki so pogosto lokalno pogojene. Ker prostorska ločljivost presega nivo lokalnega, so takšne padavine v MSC zajete z opisom tako imenovanih podmrežnih procesov. Ti skušajo dogajanje v skali, ki je natančnejša od modelske skale, kot nekakšno povprečne razmere prenesti na nivo prostorske ločljivosti MSC. Modelski rezultati za padavine z

vidika simulacij MSC sodijo med najmanj zanesljive. Navkljub uporabi sofisticiranih matematičnih pristopov k empiričnem zmanjševanju skale bodo projekcije količine padavin v topli polovici leta zaradi izrazitega lokalnega vpliva ostale nezanesljive.

Pri izdelavi scenarijev podnebnih sprememb se moramo zavedati številnih negotovosti. V prvi vrsti so negotovosti povezane že s samo izbiro socio-ekonomskih scenarijev o razvoju prebivalstva in gospodarstva na Zemlji v prihodnosti. Na teh scenarijih temeljijo scenariji emisij TGP in aerosolov, ki jih uporabimo za ocenjevanje njihove vsebnosti v ozračju. Za ocenjevanje podnebnih sprememb v prihodnosti uporabimo različne podnebne modele v katerih upoštevamo predvidene koncentracije TGP in aerosolov ter njihov vpliv na podnebje. Poleg negotovosti v povezavi s scenariji emisij se nam na tem mestu pridruži še negotovost v povezavi s kakovostjo izbranega modela. Kakovost modelov v splošnem lahko ocenimo le na podlagi njihovega opisa sedanjih podnebnih razmer. Ničesar ne moremo trditi o kakovosti njihovih simulacij z vidika opisa podnebnih razmer v prihodnosti. Prav tako scenariji emisij TGP in sulfatnih aerosolov temeljijo na sicer verjetnih predpostavkah, a vendar le predpostavkah o gospodarskem in družbenem razvoju ter rasti prebivalstva v prihodnosti. Kakovost modela in izbran scenarij lahko občutno vplivata na končne rezultate simulacije, kot tudi na izračune, ki temeljijo na njihovih vrednostih. Takšne rezultate in izračune nato uporabimo pri izdelavi scenarijev podnebnih sprememb in njihovega vpliva, kjer se še dodatno pojavi negotovost v povezavi s projekcijo rezultatov na regionalni nivo in njihovo interpretacijo. Zato moramo biti pri ocenjevanju sprememb podnebja in njihovega vpliva v prihodnosti previdni. Če je mogoče, moramo uporabiti rezultate simulacij z različnimi podnebnimi modeli upoštevajoč različne scenarije emisij TPG in aerosolov. S tem zajamemo širok spekter možnih razvojev podnebja v prihodnosti. Pridobljenih scenarijev spremembe podnebja ne smemo jemati strogo kot napovedi za prihodnost. Predstavljajo le možen razvoj v primeru uresničitve enega izmed uporabljenih scenarijev emisij v prihodnosti.

## 5 LITERATURA

- Abdi H. 2003. Partial least squares (PLS) regression. (ur.) Lweis-Beck M., Bryman A., Futing T. , *Encyclopedia of social sciences research methods*, 7. str. Sage, Thousand OAKS (v tisku) URL= <http://www.utdallas.edu/herve>
- Allen M. R., Stott M. A., Mitchell J. F. B., Schnur R., Delworth T. L. 2000. Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change. *Nature*, **407**: 617-620.
- Benestad R. E. 2001. A comparison between two empirical downscaling strategies. *International Journal of Climatology*, **21**:371-387.
- Benestad R. E. 2002a. Empirically downscaled multimodel ensemble temperature and precipitation scenarios for Norway. *Journal of Climate*, **15**:3008-3027.
- Benestad R. E. 2002b. Empirically downscaled temperature scenarios for northern Europe based on multi-model ensemble. *Climate Research*, **21**: 105-125.
- Benestad R. E., Førland E., Hanssen-Bauer I. 2002. Empirically downscaled temperature scenarios for Svalbard. *Atmospheric Science Letters*, **3**(2-4):71-93.
- Bergant K, Kajfež-Bogataj L., Črepinšek Z. 2002. Statistical downscaling of general-circulation-model-simulated average monthly air temperature to the beginning of

- flowering of dandelion (*Taraxacum officinale*) in Slovenia. *International Journal of Biometeorology*, **46**:22-32.
- Bergant K. 2003. *Projekcije simulacij globalne klime na lokalni nivo in njihova uporaba v agrometeorologiji*. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo: 170 str.
- Bergant, K., Kajfež-Bogaraj, L. 2004. N-PLS regression as empirical downscaling tool in climate change studies. *Theoretical and Applied Climatology* (sprejeto v objavo).
- Bro R. 1998. *Multy-way analysis in the food industry*. Doktorska disertacija. Amsterdam, University of Amsterdam, The Netherlands (Cum Laude): 300 str. URL = <http://www.mli.kvl.dk/staff/foodtech/btrothesis.pdf>
- Crane R. G., Yarnal B., Barron E. J., Hewitson B. 2002. Scale interactions and regional climate: examples from Susquehanna river basin. *Human and Ecological Risk Assessment*, **8**(1):147-158.
- Dubrovsky M. 1997. Creating daily weather series with the use of weather generator. *Environmetrics*, **8**:409-424.
- Freibauer A. 2003. Regionalized inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture. *European Journal of Agriculture*, **19**(2):135-160.
- Giorgi F., Francisco R. 2000. Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate change. *Geophysical research Letters*, **27**:1295-1298.
- Giorgi F., Mearns L. O. 2002. Calculations of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via "reliability ensemble averaging" (REA) method. *Journal of Climate*, **15**:1141-1158.
- Helland I. S. 2001. Some theoretical aspects of partial least squares regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **58**:97-107.
- Hewitson B. C., Crane R. G. 1996. Climate downscaling: techniques and applications. *Climate Research*, **7**:85-95.
- Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K., Johnson C. A. 2001. *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge, Cambridge University Press: 752 str. URL = [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/index.htm](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm)
- Idso S. B. 1998. CO<sub>2</sub>-induced global warming: a sceptic's view of potential climate change. *Climate Research*, **10**:69-82.
- Jong de S. 1993. PLS fits closer than PCR. *Journal of Chemometrics*, **12**:77-81.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Wollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph DE. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of American Meteorological Society*, **77**(3):437-471.
- Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woolena J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V. Dool van den H., Jenne R., Fiorino M. 2001. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation. *Bulletin of American Meteorological Society*, **2**:247-267.
- Lambert S. J., Boer G. J. 2001. CMPI: Evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Climate Dynamics*, **17**:83-106.
- McGuffie K., Henderson -Sellers A. 1997. *A climate modeling primer*. Chichester, John Wiley and Sons: 253 str.

- Mitchell, T. D. 2003. Pattern scaling: An examination of the accuracy of the technique for describing future climates. *Climatic Change*, 60: 217-242.
- Nakićenović N., Davidson O, Davis G., Grübler A., Kram T., Rovere E. L. L., Metz B., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Sankovski A., Shukla P., Swart R., Watson R., Dadi Z. 2000. *Emissions scenarios – summary for policymakers*. A special report of WG III, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, Cambridge University Press: 21 str.
- Ogrin D. 1998. Podnebje. (ur.) Fridl J., Kladnik D., Adamič M., Perko D. V: *Geografski atlas*, Ljubljana, DZS: 110-111 s.
- Olesen J. E., Bindi M. 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 39:610-620.
- Press W. H., Teukolosky A. A., Vetterling W. T., Flannery B. F. 2001. *Numerical recipes in Fortran 77: The art of scientific computing*. Cambridge Univ. Press: 99-122 str. URL = <http://www.library.cornell.edu/nr/bookpdf.html>
- Rummukainen M. 1997. *Methods for statistical downscaling of GCM simulations*. Tehnično poročilo 80, Norrköping, Rossby Centrem SMHI: 33 str.
- Schubert S. 1998. Downscaling local extreme temperature changes in south-eastern Australia from CSIRO MARK2 GCM. *International Journal of Climatology*, 18:1419-1438.
- Shackley S., Young P., Parkinson S., Wynne B. 1998. Uncertainty, complexity and concepts of good science in climate change modeling: are GCMs the best tools? *Climatic Change*, 38: 159-205.
- Storch von H., Hewitson B., Mearns L. O. 2000. Review of empirical downscaling techniques. (ur.) Iversen T., Høiskar B. A. K. V: *Regional climate development under global warming. General technical report No. 4. Conference proceedings RegClim spring meeting, Jevnaker, Torbjørnrud, Norway, 8.-9. May 2000*, 29-46 str.
- Storch von H., Zorita E., Cubasch U. 1993. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. *Journal of Climate*, 6: 1161-1171.
- Wentzell P. D., Montoto L. V. 2003. Comparison of principal components regression and partial least squares regression through generic simulations of complex mixtures. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 65:257-279.
- Wilby R. L. 1997. Non-stationarity in daily precipitation series: implications for GCM downscaling using atmospheric circulation indices. *International Journal of Climatology*, 17:439-454.
- Wilby R. L., Wigley T. M. L. 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21(4):530-548.
- Wilby R. L., Wigley T. M. L., Conway D., Jones P. D., Hewitson B. C., Main J., Wilks D. S. 1998 Statistical downscaling of general circulation model output: a comparison of methods. *Water Resources Research*, 34(11):2995-3008.
- Zorita E., Storch von H. 1997. *A survey of statistical downscaling techniques*. Tehnično poročilo, Geesthacht, Institute of Hydrophysics, GKSS Forschungszentrum: 42 str.
- Zorita E., Storch von H. 1999. The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *Journal of Climate*, 12:2474-2489.