

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



*PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GEODEZIJE*

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidatka:

TATJANA VELJANOVSKI, univ. dipl. inž. geod.

**ZAZNAVANJE SPREMEMB NA POVRŠJU
S PODATKI DALJINSKEGA ZAZNAVANJA**

Doktorska disertacija števil.: 174

**SURFACE CHANGE DETECTION FROM
REMOTE SENSING DATA**

Doktoral thesis No.: 174

Temo doktorske disertacije je odobril Senat Univerze v Ljubljani
na 19. seji dne 17. februarja 2004 in imenoval
mentorja izr.prof.dr. Krištofa Oštirja in
somentorja prof.dr. Zorana Stančiča.

Ljubljana, 5. oktober 2007

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi
izr.prof.dr. Krištof Oštir, ZRC SAZU in UL FGG
prof.dr. Zoran Stančič, ZRC SAZU
izr.prof.dr. Bojan Stopar, UL FGG
doc.dr. Marko Krevs, UL FF

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 4. redni seji dne
29. oktobra 2003.

Komisijo za oceno doktorske disertacije v sestavi
izr.prof.dr. Krištof Oštir, ZRC SAZU in UL FGG
prof.dr. Zoran Stančič, ZRC SAZU
doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, UL FGG
doc.dr. Marko Krevs, UL FF

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 9. redni seji dne
27. junija 2007.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi
prof.dr. Bojan Majes, dekan, predsednik
izr.prof.dr. Krištof Oštir, ZRC SAZU in UL FGG
doc. dr. Mojca Kosmatin Fras, UL FGG
doc.dr. Marko Krevs, UL FF

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 10. redni seji dne
26. septembra 2007

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **TATJANA VELJANOVSKI, univ. dipl. inž. geod.**, izjavljam, da sem avtorica doktorske disertacije z naslovom: **»ZAZNAVANJE SPREMEMB NA POVRŠJU S PODATKI DALJINSKEGA ZAZNAVANJA«**.

Ljubljana, 5. oktober 2007

.....
(podpis)

Errata

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

Bibliografsko-dokumentacijska stran in izvleček

UDK	528.8:551.4(043.3)
Avtor	Tatjana Veljanovski
Mentor	izr. prof. dr. Krištof Oštir
Somentor	prof. dr. Zoran Stančič
Naslov	Zaznavanje sprememb na površju s podatki daljinskega zaznavanja.
Obseg in oprema	191 str., 12 pregl., 53 sl., 39 en., 4 pril.
Ključne besede	analiza sprememb, satelitski posnetek, Landsat, predobdelava, atmosferski popravki, topografski popravki, časovne analize, daljinsko zaznavanje, spremembe površja

Izvleček

Doktorska disertacija obravnava celoten metodološki postopek za časovne analize satelitskih posnetkov srednje prostorske in časovne ločljivosti. Določanje sprememb na površju s podatki daljinskega zaznavanja temelji na primerjalni analizi. Značilnost obstoječih tehnik določitve sprememb je, da temeljijo na aritmetičnih operatorjih neposrednega razlikovanja posnetkov. Zato je ključnega pomena, da podatke (satelitske posnetke) medsebojno vsestransko uskladimo. To zahteva geometrične in radiometrične popravke ter standardizacijo podatkov. Ker so študije sprememb največkrat naravnane na opazovanje enega pojava, se disertacija osredotoča na to, kako se uveljavljena metodologija obnese pri opazovanju več pojavov hkrati oziroma pri opazovanju vsestranskih sprememb. Zategadelj je bilo izhodišče raziskav usmerjeno v pregled in analizo vseh splošno uveljavljenih faz priprave podatkov in tehnik določitve sprememb z namenom kritično ovrednotiti njihovo učinkovitost in odpreti slabe strani, ki jih lahko prenašajo v končen rezultat.

Raziskava je pokazala, da je za zanesljivo določitev sprememb na časovnem zaporedju satelitskih posnetkov Landsat optimalno primerljivost podatkov v praksi zelo težko doseči. Glavni razlog so inherentne razlike v okoliščinah zajema podatkov ter s časom spremenljivih lastnosti senzorjev ter ne vselej zadostna učinkovitost postopkov poprave in priprave podatkov. Posledica je, da je med identificiranimi spremembami prisotnega veliko šuma oziroma navideznih ali nepravih sprememb, ki jih ni mogoče enostavno izločiti. Delež teh je lahko tudi tako velik, da onemogočajo kvantitativno ovrednotenje nastalih sprememb.

Disertacija podaja vpogled v kritične točke obstoječe metodologije ter ponuja nekatere izboljšave uveljavljenih postopkov. Pomemben rezultat disertacije je razvita t. i. večločljivostna metoda določanja sprememb, ki izhaja iz analize sosledstva ter učinkovito nadzira velik del navideznih ali nepravih sprememb. Uporabna je za opazovanje različnih večjih in intenzivnejših pojavov na površju. Metoda omogoča tudi kvantitativne ocene vsestranskih sprememb, tj. sočasnega opisovanja trendov več procesov.

Bibliographic-documental information and abstract

UDC	528.8:551.4(043.3)
Author	Tatjana Veljanovski
Supervisor	assist. prof. dr. Krištof Oštir
Co-supervisor	dr. Zoran Stančič
Title	Surface change detection from remote sensing data.
Notes	191 p., 12 tab., 53 fig., 39 eq., 4 app.
Key words	change detection, multi-temporal analysis, preprocessing, Landsat, atmospheric correction, topographic correction, remote sensing

Abstract

The doctoral dissertation deals with the complete methodology for spatio-temporal analysis on the Landsat medium spatial resolution satellite imagery. Change detection on remotely sensed data is primarily based on comparison analysis. The main characteristic of the existing change detection techniques is to root on the direct image differentiation based on arithmetic operators. Thus it is of key importance to harmonise and standardise the data in all aspects. This requires geometric and radiometric pre-processing as well as the standardisation of the time series imagery. Since change detection studies are more often than not focused on the observation of a specific process or event, the main research subject herein was aimed at the evaluation of the asserted methodology in view of monitoring the surface changes as a whole. For this reason the research is focused onto the analysis of behaviour of all asserted steps in the data pre-processing phase and change detection techniques, with the main focus on the evaluation of its efficiency and the derogatory effects they may have and that might propagate the final results.

The research showed that it is barely possible to achieve optimally comparable time series of Landsat imagery that could be followed with reliable change detection. The main reasons are due to the inherent differences in the imagery acquisition conditions, sensor sensibility variation, and data correction techniques that are not always able to fulfil the requirements. Consequently, the identified changes are biased with noise or seeming (false) changes that are not easily separated. Their contribution can reach such dimensions that an appropriate quantitative evaluation of the identified changes becomes unachievable.

The dissertation presents an insight into the critical points of the existing methodology and offers several ways for improving the procedure. One of the important results is the developed contextual multi-level change detection method that incorporates spatial neighbourhood dependence and is able to efficiently control the majority of false changes. This method is suitable for monitoring various greater and intensive processes on the surface of the Earth. It has also proved to be fit for performing a quantitative estimation of changes related to various processes and/or of the coincident description of their trends.

Zahvala

Vsem tistim okoliščinam, ki so me že med študijem pripeljale vse tja do obronkov geodezije. Dr. Zoranu Stančiču se iskreno zahvaljujem, ker me je vzel pod okrilje interdisciplinarnih pogledov, mi nudil krasen začetek podiplomskega dela na inštitutu in brez katerega do disertacije ne bi prišlo. Zoran, hvala za delovne iskre, vsestranske napotke in vedno dobrodošlo podporo ob pravem trenutku.

Posebej se želim zahvaliti mentorju, izr. prof. dr. Krištofu Oštirju, ki je prevzel začeto delo in me s svojo veliko raziskovano energijo navdušil za daljinsko zaznavanje. Krištof, hvala za zaupanje in vselej konstruktivne napotke pri delu s satelitskimi posnetki.

Hvala vsem mojim sodelavcem na Inštitutu za antropološke in prostorske študije za prijetno in spodbudno delovno vzdušje v uradnem delu dneva in za vso tisto barvitost v neuradnih uricah. Izrecno hvala mojim cimrom: Klemenu Zakšku za nesebično strokovno pomoč, Petru Pehaniju za vse odtenke razpoloženj in borbe z njimi ter Alešu Marsetiču za duhovito rahljanje strogosti dni.

Hvala Ministrstvu za visoko šolstvo, znanost in šport, ki je finančno podprlo moje delo. Hvala Znanstvenoraziskovalnemu centru SAZU za organizacijo, odprtost in lepo lokacijo delovnih mest.

Lepa hvala tudi vsem inštitucijam in posameznikom, ki so mi za raziskave omogočili uporabo svojih podatkov. To so: Gozdarski inštitut Slovenije, Statistični urad Republike Slovenije, Geodetska uprava Republike Slovenije, Založba Modrijan in ZRC SAZU.

Hvala članom komisije za pregled disertacije in za trud pri branju osnutkov ter za vse komentarje, kako izboljšati nalogo.

Očetu za tiho energijo, mami in sestri za družbo na tem svetu od nekdaj.

Tomaž, tebi res hvala za potrpljenje v vsem tem času, za krotenje slabih razpoloženj, za bitke z vejicami, podredji in zaporedji, za neustavljivo vnemo v borbi z banalnostmi zdajšnjega časa ter za prevzemanje vseh tistih manj ljubih vsakodnevnih reči. Oprosti za ves odtekel čas in prostore, ko »ject u službo šua«...

Tatjana Veljanovski

30. september 2007

V Ljubljani, Novi trg 2

Kazalo vsebine

1	UVOD	1
1.1	Ozadje problema	1
1.1.1	Prednosti in omejitve daljinskega zaznavanja	3
1.2	Raziskovalna hipoteza, metoda dela in cilji disertacije	4
1.2.1	Raziskovalna hipoteza in utemeljitev	4
1.2.2	Metoda dela	6
1.2.3	Cilji	7
1.3	Zgradba doktorske disertacije	8
2	ANALIZA SATELITSKIH POSNETKOV ZAJETIH V RAZLIČNEM ČASU	11
2.1	Opredelitev ključnih pojmov in konceptov	11
2.2	Vloga in oris obstoječih raziskav	16
2.2.1	Dosedanje aplikacije	16
2.2.2	Obstoječe metode in pristopi	18
2.2.3	Primeri uporabe posnetkov Landsat za opazovanje sprememb na površju	19
2.3	Oblikovanje časovne vrste podatkov za analizo sprememb na površju	21
2.3.1	Izbira časovne enote	21
2.3.2	Izbira satelitskih posnetkov	22
2.3.3	Izbira in vloga predobdelave posnetkov	23
2.3.4	Določitev metodologije za določanje, analizo in interpretacijo sprememb	24
3	PREDOBDELAVA SATELITSKIH POSNETKOV	25
3.1	Lastnosti podatkov daljinskega zaznavanja v luči nuje po postopkih predobdelave	26
3.2	Kalibracija senzorja in točnost zaznave daljinsko zaznanih podatkov	27
3.3	Odpravljanje geometričnih odstopanj	28
3.3.1	Modeliranje geometrije snemanja	29
3.3.2	Georeferenciranje podob	30
3.3.3	Registracija podob	31
3.4	Odpravljanje radiometričnih odstopanj	32
3.5	Atmosferski popravki	33
3.5.1	Modeliranje atmosferskih pogojev in prenosa energije	37
3.5.2	Izračuni na osnovi podatkov v podobi	38
3.5.2.1	Metoda nespremenljivega predmeta	40
3.5.2.2	Metoda ujemanja histograma	41
3.5.2.3	Metoda temnega predmeta	42
3.5.2.4	Metoda zmanjšanja kontrasta	43
3.5.2.5	Metoda ujemanja gruč	44
3.6	Topografski popravki	44
3.6.1	Algoritmi razmerij	45
3.6.2	Algoritmi kosinusnih popravkov	45
3.6.2.1	Kosinusna metoda	46
3.6.2.2	Minnaertova metoda	47
3.6.2.3	Metoda c-faktor	47
3.6.2.4	Statistična metoda	48
3.6.2.5	SCS metoda	49

3.6.3	Dozierjeva metoda ali metoda IPW	49
3.7	Radiometrična standardizacija	49
3.7.1	Z uporabo regresije nadzorovanega diagrama razpršenosti	50
3.7.2	Glede na identifikacijo nespremenljivih predmetov	50
3.7.3	Z enostavno linearno regresijo	51
3.8	Spektralne pretvorbe	51
3.8.1	Določitev radiance, odboja in temperature	52
3.8.2	Spektralni indeksi	54
3.8.2.1	Vegetacijski indeksi	55
3.8.2.2	Mineralni indeksi	56
3.8.3	Klasifikacija	56
3.8.4	Pretvorbe spektralnih prostorov	57
3.8.4.1	Analiza glavnih komponent	58
3.8.4.2	Kauth-Thomasova transformacija	58
3.9	Sklep	60
4	PREGLED METOD ZA ČASOVNE ANALIZE SATELITSKIH POSNETKOV	65
4.1	Splošno	65
4.2	Metodologija in tehnike za določanje sprememb na satelitskih posnetkih	66
4.2.1	Tehnike za primerjavo para podob	66
4.2.1.1	Razlikovanje podob	67
4.2.1.2	Deljenje podob	68
4.2.1.3	Regresijsko razlikovanje	69
4.2.1.4	Vektor sprememb	69
4.2.1.5	Dvočasovne linearne transformacije podatkov	70
4.2.1.6	Analiza prostora časovno večrazsežnih predmetov	71
4.2.1.7	Hibridne metode	72
4.2.1.8	Križni preizkus pripadnosti	72
4.2.2	Tehnike za primerjavo več podob	72
4.2.2.1	Analiza časovnih vrst	74
4.2.2.2	Korelacija časovnih vrst	75
4.2.2.3	Časovni profili	75
4.2.2.4	Odkloni podob	76
4.2.2.5	Vektor sprememb	76
4.2.3	Napovedno modeliranje sprememb in simulacije	76
4.2.3.1	Markovske verige	76
4.2.3.2	Princip celičnega avtomata	77
4.3	Sklep	78
5	ANALIZA SPREMEMB NA POVRŠJU S SATELITSKIMI POSNETKI LANDSAT	79
5.1	Namen in cilji raziskave	79
5.2	Izbira in predstavitev podatkov	81
5.2.1	Posnetki Landsat	81
5.2.2	Oblikovanje časovnih vrst in izbira testnih območij	84
5.3	Predobdelava posnetkov: priprava podatkov	85
5.3.1	Georeferenciranje in poravnava v skupno koordinatno mrežo	86
5.3.2	Pridobivanje metapodatkov za radiometrične pretvorbe	88
5.3.3	Pretvorba v radiance	89
5.3.4	Atmosferski popravki in pretvorba v odboj površja	89
5.3.5	Popravki osvetlitve scene - topografska normalizacija	91

5.3.6	Radiometrična standardizacija	95
5.3.7	Pretvorba spektralnih vrednosti v poudarjene lastnosti površja	98
5.4	Analiza učinkov predobdelave na lastnosti posnetkov	98
5.4.1	Učinki in vplivi atmosferskih popravkov z modelom COST	99
5.4.2	Učinki topografske normalizacije (Minnaertov model) na spektralne lastnosti podob	107
5.4.3	Učinki radiometrične standardizacije	112
5.5	Analiza sprememb	115
5.5.1	Izbira operatorja za določanje sprememb in kriterija za ločevanje sprememb	115
5.5.2	Digitalne vrednosti, radiance in odbojne vrednosti površja	122
5.5.3	Spektralni indeksi	123
5.5.4	Glavne komponente in komponente KTT	126
5.6	Rezultati analize sprememb	127
5.6.1	Glede na uporabljene podatke	127
5.6.2	Glede na naravne okoliščine	132
5.6.2.1	Glede na letni čas	132
5.6.2.2	Glede na območje	136
5.7	Obravnava navideznih sprememb – odmik od pikselskega pristopa določanja sprememb	139
5.7.1	Izločanje navideznih sprememb	139
5.7.2	Določanje sprememb na osnovi analize sosedstva	140
5.7.2.1	Večstopenjski ali večločljivostni pristop določanja sprememb	140
5.7.2.1.1	Učinkovitost odpravljanja šuma	144
5.7.2.1.2	Vizualna ocena ter interpretacija identificiranih sprememb	145
5.7.2.1.3	Kvantitativno ovrednotenje sprememb	145
5.7.2.2	Določanje sprememb na osnovi korelacije sosedstev	152
5.8	Diskusija	154
6	OVREDNOTENJE METODOLOGIJE NA PODLAGI REZULTATOV	161
6.1	Splošne ugotovitve	161
6.2	Analiza površja Slovenije	165
7	POVZETEK	167
7.1	Splošne ugotovitve	168
7.2	Predlagane rešitve in njihova učinkovitost	170
7.3	Zaključki	172
8	SUMMARY	175
8.1	Background	175
8.2	Research hypothesis, aims and working approach	176
8.3	Results	177
8.3.1	About data pre-processing and preparation	178
8.3.2	About change detection analysis	180
8.3.3	Proposed solution: A contextual multi-level change detection model	181
8.4	Conclusions	182
LITERATURA IN VIRI		185
PRILOGE		191

Seznam preglednic

Preglednica 1: Regresijske spremenljivke za ne-Lambertove površine v postopku topografske normalizacije.....	48
Preglednica 2: Razpon (obseg) spektralnih radianc (kalibracijski parametri) za senzor Landsat ETM+.....	53
Preglednica 3: Vrednosti srednje Sončeve izven-atmosferska osvetlitve po spektralnih kanalih za Landsat TM in ETM+.....	54
Preglednica 4: Mineralni indeksi.....	56
Preglednica 5: Koeficienti Kauth-Thomasove transformacije v primeru senzorja Landsat TM.	60
Preglednica 6: Značilnosti spektralnih kanalov senzorjev Landsat MSS, TM in ETM+.....	82
Preglednica 7: Oblikovanje časovnih vrst glede na prostorsko pokritost Slovenije in letni čas zajema.	84
Preglednica 8: Pregled rezultatov kakovosti samodejne registracije posameznih posnetkov. .	88
Preglednica 9: Vpliv topografskih in spektralnih lastnosti reprezentativnih območij na rezultat topografske normalizacije (Minnaertov model).....	111
Preglednica 10: Primerjava sredin parov spektralnih kanalov (med referenčno in prilagojeno podobo) pred in po radiometrični standardizaciji, za območje Ljubljana–Kranj z okolico, poletni letni čas.	113
Preglednica 11: Primer statistične analize pretvorb štirih predmetov (pozitivna pretvorba kmetijske površine, negativna pretvorba kmetijske površine, pretvorba iz pozidanega v zeleno ter pretvorba iz zelenega v pozidano), določenih z različnimi operatorji, na NDVI podatkih za pomladni letni čas med posnetkoma 1996-1993 na območju Ljubljana–Kranj z okolico.	119
Preglednica 12: Opredelitev spodnje in zgornje meje za posamezne razrede ali kategorije sprememb. Zgoraj: vrednosti za analize transformacij ter spodaj: vrednosti za analize tranzicij.....	121

Seznam slik

Slika 1: Shema celostne metodologije za analizo sprememb s podatki daljinskega zaznavanja srednje prostorske in časovne ločljivosti.....	9
Slika 2: Paralaksa – geometrična napaka, do katere pride zaradi razgibanosti terena in kota opazovanja.....	30
Slika 3: Primer poravnave podob – odpravljanje razlik v translaciji ($\Delta x, \Delta y$) in rotaciji ($\Delta \varphi$).	31
Slika 4: Prepustnost atmosfere v odvisnosti od valovne dolžine. Vidimo območja z visoko (atmosferska okna) in nizko prepustnostjo ter valovne dolžine in molekule odgovorne za absorpcijo (po: NASA, 2006).....	34
Slika 5: Poenostavljena shema komponent signala, ki ga prejme senzor nad atmosfero (vir: Mather, 2004).	35
Slika 6: Princip uporabe linerane regresije za potrebe atmosferskih popravkov.....	39
Slika 7: Princip normalizacije posnetka z uporabo linearne regresije na nespremenljivih predmetih.....	40
Slika 8: Skica geometrijskih odnosov med položajem Sonca, površjem oziroma terenom in položajem senzorja, poznana kot geometrija STS.....	46
Slika 9: Primer rabe tal ter satelitskega posnetka 1992-08-18 (TM 321) na območju Ljubljana–Kranj z okolico.....	57
Slika 10: Spektralni podpis različnih tipov tal (vode, prsti in vegetacije). Označeni so tudi kanali senzorja Landsat TM (povzeto po: Sabins, 1996; Oštir, 2006).....	57
Slika 11: S Kauth-Thomasovo transformacijo preoblikovan prostor kanalov. Transformacija se zaradi oblike, ki spominja na kapo v angleščini imenuje tudi tasseled cap (vir: Kauth in Thomas, 1976).....	59
Slika 12: Rezultat Kauth-Thomasove transformacije posnetka 1992-08-18 na območju Ljubljana–Kranj z okolico za senzor Landsat TM. V rdeči, zeleni in modri barvi so prikazane svetlost, zelenost in vlažnost.....	59
Slika 13: Ilustracija določitve smeri in jakosti sprememb z metodo vektorja sprememb.....	70
Slika 14: Testna območja za analizo sprememb na mozaiku posnetkov Landsat v kombinaciji kanalov TM 321.	80
Slika 15: Shema poti snemanja satelita Landsat E/TM z označbo poti in vrstice tirnice ter prikaz pokritosti Slovenije.....	81
Slika 16: Časovna in prostorska pokritost Slovenije s posnetki razpoložljivimi v času raziskave.....	83
Slika 17: Primeri rezultatov štirih modelov topografske normalizacije (COS, MINN, C in STAT) v kombinaciji kanalov 321 v barvnem prostoru RGB na izseku posnetka 1992-08-18-L5-191-28 ter enak izsek posnetka še pred topografsko normalizacijo, a po atmosferski korekciji z modelom COST.	93
Slika 18: Zgoraj: Učinki topografskih popravkov na sredino spektralnih kanalov. Primerjava med uporabljenimi modeli topografske normalizacije, na primeru posnetka 1992-08-18-L5_191-28 po atmosferski korekciji COST. Spodaj: relativni prirastek v spektralnih kanalih uporabljenih modelov topografske normalizacije glede na vhodne podatke.....	94

Slika 19: Časovna vrsta izrezov posnetkov za testno območje Ljubljana–Kranj z okolico, v poletnem letnem času, po opravljeni predpripravi podatkov. Predpriprava podatkov je zajela atmosfersko in topografsko korekcijo ter radiometrično standardizacijo.....	98
Slika 20: Primerjava spremenjenih razmerij med spektralnimi kanali v podobah odboja po opravljeni atmosferski korekciji COST.	100
Slika 21: Simulacija vpliva položaja Sonca (višinskega kota) na odbojne vrednosti površja kot jih zazna senzor nad atmosfero (odboj TOA).	101
Slika 22: Simulacija vpliva izbire najnižje vrednosti temnega predmeta (DNmin) na ocenjen delež atmosferskega odboja izražen v radiancah vidljivosti (Lhaze) v modelu COST.	103
Slika 23: Primerjava razlik v vrednostih odboja glede na različne letne čase: pomlad (zgoraj), poletje (na sredini) jesen (spodaj).	104
Slika 24: Variabilnost med Landsat posnetki na enakem območju (191 ali 190 ali 189) in med senzorjema TM oziroma ETM+ po COST korekciji.	106
Slika 25: Spektralne lastnosti posnetkov Landsat MSS po atmosferski korekciji z modelom COST.	107
Slika 26: Učinek »izravnave« naklona površja po TN z Minnaertovim modelom po izbranih naklonskih razredih, na posnetku 1992-08-18-L5-191-28.....	108
Slika 27: Učinek »izravnave« usmerjenosti površja po topografski normalizaciji z Minnaertovim modelom glede na prisojne in osojne lege ter ravno, na istem posnetku.	109
Slika 28: Učinek topografske normalizacije (relativni prirastek) v različnih razredih rabe tal / pokrovnosti.....	109
Slika 29: Vpliv radiometrične standardizacije z linearno regresijo na prilagajane podobe (lastnosti porazdelitve vrednosti). Levo zgoraj je histogram kanala 1 izseka podobe 2005 pred prilagajanjem, na sredini po prilagoditvi, na desni pa je histogram referenčne podobe 1992. Spodaj je identičen primer za izsek podobe 1993.	114
Slika 30: Odziv štirih operatorjev za določanje sprememb na simuliranih situacijah (odziv izračuna operatorjev na majhnih in velikih številih ter v ekstremnih situacijah).	116
Slika 31: Analiza sprememb stanja 2005-2002, ODB, pomlad, Ljubljana–Kranj z okolico. Zgoraj: izsek posnetkov 2005 in 2002 v kombinaciji kanalov 321. Na sredini je izsek iz podob razlik za vidne kanale (TM 1-3) in spodaj je izsek za IR kanale (TM 4-5, 7), ki prikazujejo različne opredelitve kategorije sprememb v vidnem delu spektra in IR delu spektra za primer prirastka v urbanizaciji zelenih površin.....	118
Slika 32: Princip uporabe standardnega odklona za določitev pragov jakosti sprememb.....	120
Slika 33: Identifikacija sprememb v kanalu TM 3 za neobdelane digitalne vrednosti (DN), radiance (RAD) in odboj (ODB). Zgoraj so primeri določitve razlik brez relativne uskladitve kanalov, spodaj so primeri na podatkih, ki so bili predhodno relativno standardizirani.	123
Slika 34: Primeri uporabe različnih spektralnih indeksov za opazovanje sprememb na posnetkih med letoma 1992 in 1999, poletni letni čas, izsek mesta Ljubljane in Ljubljanskega barja.	125
Slika 35: Primerjava dveh načinov uporabe glavnih komponent: (slika levo) kot tehnika za določanje sprememb ter (slika desno) kot analiza sprememb na glavnih komponentah 1 posnetkov 1992-08-18 in 1999-08-07.....	126
Slika 36: Rezultati analize sprememb za časovno vrsto spektralnega indeksa NDVI, poletni letni čas, območje Ljubljana–Kranj z okolico.	128

Slika 37: Primerjava rezultatov analize časovne vrste v dveh načinih obravnave zaporedja sekvenc. Zgoraj kumulativna primerjava stanja na izhodiščno stanje (posnetek 1992), spodaj relativna primerjava zaporednih parov posnetkov.	129
Slika 38: Rezultati analize sprememb na časovni vrsti podatkov odbojnih vrednosti (ODB), poletni letni čas, območje Ljubljana–Kranj, po spektralnih kanalih.	130
Slika 39: Rezultati analize sprememb na časovni vrsti podatkov glavnih komponent (PC), poletni letni čas, območje Ljubljana–Kranj, po glavnih komponentah 1-3.	131
Slika 40: Primerjava zaznave in določitve sprememb med tremi vrstami podatkov: indeks NDVI, glavna komponenta PC 1 ter odbojne vrednosti v kanalu vidnega spektra E/TM 1, na izseku mesta Ljubljana.	132
Slika 41: Primerjava zaznave in določitve sprememb med različnimi letnimi časi (pomlad, poletje in jesen) na podatkih indeksa NDVI, na območju Ljubljana–Kranj z okolico.	133
Slika 42: Primerjava zaznave in določitve sprememb med različnimi letnimi časi (pomlad, poletje in jesen) na podatkih odbojnih vrednosti E/TM 1, na območju Ljubljana–Kranj z okolico.	134
Slika 43: Primerjava zaznave in določitve sprememb med različnimi letnimi časi (pomlad, poletje in jesen) na podatkih glavne komponente 1 (PC 1), na območju Ljubljana–Kranj z okolico.	135
Slika 44: Rezultati analize sprememb na območju Kras, na odbojnih vrednosti spektr. kanala E/TM 1.	137
Slika 45: Izbrani rezultati analize sprememb na območju Ljubljana–Kranj z okolico na odbojnih vrednosti spektralnega kanala E/TM 1.	138
Slika 46: Rezultati analize sprememb na območju Celjske kotline, na odbojnih vrednosti spektralnega kanala E/TM 1.	138
Slika 47: Analiza sprememb v različnih prostorskih merilih ter stopnja prisotnega šuma. Levo: v izvorni 30 m ločljivosti, na sredini: v 90 m metrski ločljivosti in na desni: v 150 m ločljivosti.	141
Slika 48: Rezultati analize sprememb časovne vrste z večstopenjskim ali večločljivostnim pristopom določanja sprememb na izseku Ljubljane z okolico.	144
Slika 49: Prikaz rezultatov določanja sprememb z uporabo večločljivostnega pristopa v dveh načinih oblikovanja časovnega zaporedja primerjav sekvenc (na izseku Ljubljane, podatki o odbojnih vrednostih E/TM 1, poletni letni čas).	146
Slika 50: Statistika površin (v ha) prehodov sprememb v obravnavani časovni vrsti izsekov posnetkov (na izseku Ljubljane, podatki o odbojnih vrednostih, poletni letni čas).	148
Slika 51: Časovne vrste: Delež identificiranih pozitivnih in negativnih sprememb v spektralnem kanalu E/TM 1 glede na razrede rabe tal. Zgoraj: kot odstotek glede na posamezno rabo tal, spodaj: kot površina (v ha).	149
Slika 52: Zaznavanje prehodov sprememb na območju gozdnih in z grmičevjem poraslih površin, po spektralnih kanalih (na izseku Ljubljane, odbojne vrednosti, poletni letni čas).	151
Slika 53: Določanje sprememb na osnovi korelacije sosedstev 3 x 3. Zgoraj levo podoba korelacij sosedstev za kanale 321, na sredini podoba naklonov 321 in desno podoba premikov 321. Spodaj podoba korelacij sosedstev za kanal 1, na sredini podoba naklonov 1 in desno podoba premikov 1, na izseku območja Ljubljana.	153

Okrajšave in simboli

(E)TM	(Enhanced) Thematic Mapper
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BI	Bilinear interpolation (bilinearna interpolacija)
COST	COST model ali Chavezova metoda vidljivosti
DN	digital number (digitalna vrednost, tudi svetlostna vrednost)
DOF	digitalni ortofoto
DOS	Dark Object Saturation (metoda temnega predmeta)
EM	elektromagnetno
GIS	geografski informacijski sistem
IR	infrardeči spekter
KTT	Kauth-Thomasova transformacija
MISR	Multangle Imaging SpectroRadiometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSS	Multi Spectral Scanner
NASA	National Aeronautic and Space Administration
NDVI	Normalised Differential Vegetation Index
NN	Nearest Neighbor (najbližji sosed)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ODB	odbojne vrednosti
PC	Principal Components (glavne komponente)
RAD	radiance
SeaWIFS	Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
TOA	Top Of the Atmosphere (na vrhu atmosfere)

1 UVOD

Uvodno poglavje predstavi utemeljitev raziskave ob sočasni predstavitvi problematike analize sprememb s podatki satelitskega daljinskega zaznavanja. Oriše vlogo in pomen časovnih analiz, opredeli ključne probleme na tem področju ter poda prednosti in omejitve tehnologije, na katero se časovne analize oziroma analiza sprememb nanaša. Temu sledi predstavitev hipoteze in ciljev doktorske disertacije ter struktura disertacije s kratko vsebino poglavij.

1.1 Ozadje problema

Področje, ki ga obravnava doktorska disertacija, je aktualna tema aplikativnih vidikov satelitskega daljinskega zaznavanja. V ožjem pogledu se disertacija ukvarja s temeljnimi postopki obdelave daljinsko zaznanih podatkov srednje prostorske ločljivosti za potrebe določanja sprememb. V širšem kontekstu nadgrajuje obstoječe pristope, raziskuje načine za izboljšanje metodoloških postopkov ter jih povezuje s statističnimi prijemi kot kvantitativno mero za opazovanje kakovosti rezultata in učinkovitosti postopka.

Analiza sprememb s podatki daljinskega zaznavanja je blizu tistim segmentom iz področja prostorskega modeliranja, ki proučujejo in modelirajo dinamiko pojavov in procesov. To z drugimi besedami pomeni, ki vključujejo časovno komponento. Ker pa je narava daljinsko zaznanih podatkov tolikanj posebna – gre namreč za zaznane elektromagnetno energijo, ki je shranjena v več spektralnih območjih (kanalih) in zajeta v različnih naravnih okoliščinah – so potrebni številni postopki predobdelave in priprave podatkov. Obdelava sama, s tem pa tudi večji del reševanja problema sta zato vezana na uporabo profesionalnih programov za daljinsko zaznavanje.

Z vidika lastnosti podatkov daljinskega zaznavanja je pomembna ustrezna interpretacija vsebine. Interpretacija satelitskih posnetkov po definiciji (Oštir, 2006; Jensen, 1996; Lillesand in Keifer, 1994) označuje postopek celostne klasifikacije zaznane vsebine, tj. informacije o položaju, velikosti in medsebojnih razmerjih predmetov (vsebine), po ustreznih merilih, ki jih praviloma določa namen uporabe posnetka. Z daljinskim zaznavanjem označujemo tehnologijo, ki omogoča zajem daljinsko zaznanih podatkov (tj. brez neposrednega stika s predmetom) ter vso metodologijo za ustrezno obravnavanje teh podatkov (Jensen, 1996). Da bi lahko pravilno interpretirali vsebino, moramo posnetke ustrezno pripraviti. To storimo s postopki poprave in predobdelave satelitskih posnetkov (prostorska in radiometrična rektifikacija) ter postopki obnove in izboljšave posnetkov. Ko je satelitski posnetek transformiran v enotno in znano merilo ter radiometrično pripravljen, pridobi lastnosti ustreznega nosilca (medija) za merjenje in zajemanje merske in semantične vsebine, v

stvarnih merskih enotah, s tem pa omogoča tudi poljubne kvantitativne in kvalitativne analize. Če opravljamo primerjave vsebine med posnetki, ki so bili zajeti ob različnih časih, govorimo o časovnih analizah oziroma analizah sprememb satelitskih posnetkov.

Analiza sprememb v prostoru skozi čas je v zadnjih dveh desetletjih postala ena pomembnejših praktičnih aplikacij na področju uporabe podatkov daljinskega zaznavanja. Razlog za to je vsesplošno zavedanje družbe o prekomerno škodljivih, negativnih spremembah v okolju ter dejstvo, da se s sateliti površje Zemlje spremlja redno. Podatki daljinskega zaznavanja se od klasičnih meritev na zemeljskem površju bistveno razlikujejo v tem, da se kontinuirano in sistematično zbirajo že več desetletij. Redno osveženi arhivi posnetkov površja zagotavljajo zadosten delež podatkov, da lahko opravljamo časovne primerjave. Na podlagi časovnih primerjav daljšega obdobja pa je mogoče spremljati in analizirati neposredne in posredne učinke dejavnikov v okolju, jih predvidevati ter navsezadnje pametneje načrtovati posege v naravi in v urbanem prostoru.

Pri tovrstnih pristopih, ko skušamo uokviriti razmeroma zapleten naravno-družbeni sistem v učinkovit in relevanten model, gre v prvi vrsti za dopolnjujoče ustvarjanje ravnotežja med teorijo in izvedbo. Dialektični presežek je mogoče doseči le z izmeničnim soočanjem teorije, ki črpa načela in koncepte obravnave naravno-družbenega sistema ter metodologije obdelave prostorskega podatka kot temeljnega gradnika v modelu, ki pa jo na svoj način zamejuje sodobna računalniška tehnologija. Prav ta omejitev se mi je zdela največji razlog za vsestransko preverjanje in ovrednotenje teoretično uveljavljene metodologije za časovne analize satelitskih posnetkov.

Analize sprememb na prostorskih podatkih so izrazito vezane in zato občutljive na *pogoje primerljivosti*. Kakovostno bomo spremembo v prostoru lahko določili le, če bomo uspeli zagotoviti *položajno* primerljivost prostorskih podatkov, v primeru daljinsko zaznanih podatkov pa tudi primerljivost *spektralne (intenzitetne oziroma radiometrične) vsebine posnetkov*. Če zagotovimo primerljivo stanje podatkov po obeh pogojih se lahko lotimo analize in ovrednotenja sprememb nastalih v času. Pomemben del postopka je tudi opredelitev konceptualnega modela, ki bo za dani namen analize določal *kaj* in *kdaj* je sprememba stanja. Pri konstrukciji modela za zaznavo sprememb je v tem pogledu pomembno upoštevati informacijo o *dinamiki*, ki je pripeljala do nekega stanja. Na ta način lahko interpretiramo stanje zemeljskega površja glede na neko drugo (prejšnje) stanje in ob tem upoštevamo normo lastne spremenljivosti (variabilnosti) pojava. Bistveni determinanti tako postaneta zaznava spremembe ter obseg spremembe (jakosti in položaja) v danih pogojih. Različne možnosti obravnave teh dveh pojmov konstituirajo tudi sporočilnost in uporabnost modela. Kako spremembo v določenem kontekstu zaznati, izmeriti ter jo ovrednotiti, je razmeroma odprto polje raziskav, še posebej na področju implementacije podatkov daljinskega zaznavanja v fizične modele prostora.

Možnosti, kako se lotimo raziskav, se zdi veliko. Področje raziskav za obravnavano navezo – ovrednotenje sprememb v določenem časovnem in prostorskem merilu satelitskih posnetkov – je še razmeroma mlado. Zato raziskave metodološko še niso povsem dorečene. Obstoječe metode za obravnavo in domet podatkov daljinskega zaznavanja v študijah zaznavanja sprememb na površju Zemlje so večinoma naravnane specifično aplikativno (torej za dani namen). Največ je raziskav, ki pokrivajo opazovanja razsežnosti in posledic pustošenja požarov, razlitja škodljivih snovi, opazovanje premikov večjih zemeljskih mas, opazovanje zaraščanja gozdov ali obratno izginjanja gozdnih površin in podobno. Dodaten izziv za delo

na področju časovnih analiz satelitskih posnetkov je torej tudi v tem, da bi pojmu spremembe lahko pridali širše konceptualno ozadje – opazovanje več pojavov hkrati. S tem bi lahko postal tudi postopek zaznave in določitve spremembe bolj splošen in vsestranski.

Bistvo doktorske disertacije zato osredotočam v raziskave, sistematizacijo in analizo zaznavanja *vsestranskih sprememb v prostoru*. Omenjene vsebine obdelam z vidika (satelitskega) daljinskega zaznavanja površja Zemlje s prostorsko in časovno srednje ločljivostnimi posnetki ter v kontekstu razvijanja učinkovitih, konceptualno podprtih metodologij za ustvarjanje relevantnih časovno-fizičnih modelov prostora.

Z vidika vsebine in naslova disertacije je na tem mestu nujno poudariti še naslednje. V pričujoči disertaciji se navzlic razmeroma širokemu naslovu ukvarjam le z analizo sprememb posnetkov srednje prostorske in časovne ločljivosti – s posnetki Landsat. Razlog za to je preprosto to, da so mi bili posnetki Landsat za območje Slovenije v največjem številu razpoložljivi in cenovno dostopni. Ustrezno število posnetkov iz ustreznega obdobja pa je osnovni pogoj za izpeljavo časovnih analiz. Ker imajo različni satelitski sistemi tudi različne lastnosti in marsikateri od njih prinašajo drugačne probleme zaznavanja in določanja sprememb, so tudi v disertaciji opisani postopki priprave podatkov smiselno omejeni le na postopke, ki ustrezajo lastnostim sistemov kot je Landsat in njemu podobnih.

1.1.1 Prednosti in omejitve daljinskega zaznavanja

Najbolj pomembna prednost daljinskega zaznavanja je gotovo ta, da so danes na razpolago obsežni arhivi satelitskih posnetkov in tudi drugih daljinsko zaznanih posnetkov (na primer ciklično aero-snemanje, uveljavlja se tudi snemanje z lidarjem), kar nam omogoča edinstveno časovno in prostorsko pokritost s podatki za izbrano študijo sprememb. Posebna prednost v primerjavi s klasičnimi metodami zbiranja prostorskih podatkov je tudi v tem, da en posnetek pokriva razmeroma veliko območje, s pravilno obdelavo pa lahko izluščimo tudi takšne informacije, ki jih klasične tehnike opazovanja površja ne dajejo oziroma bi bile te povsem neekonomične za večja območja (npr. indeks NDVI, podatki o vlažnosti tal, temperaturi in podobno). Teh lastnosti drugi prostorski podatki, ki se zbirajo na površju Zemlje, večinoma nimajo.

Seveda pa ima tako posebna tehnologija, kot je daljinsko zaznavanje, tudi določene omejitve. Lahko rečem, da ob večino teh trčimo prav pri časovnih analizah na satelitskih posnetkih, saj te zahtevajo visoko uravnoteženost med podatki – absolutno primerljivost v vseh pogledih po celotni časovni vrsti posnetkov. Te pa ni mogoče doseči prav enostavno in hitro. Določen kompromis moramo nadalje skleniti tudi z vidika zmožnosti obdelave velike količine podatkov, torej merila posnetkov in s tem še mogočega zaznavanja najmanjšega detajla na površju.

Učinkovitost metodologije je v veliki meri odvisna od *kakovosti uporabljenih prostorskih podatkov*. Kakovost podatka opredeljujeta dva glavna kriterija (Šumrada, 2005): kakovost položajne umestitve v prostor ter kakovost vsebine podatka. Surovi satelitski posnetki praviloma niso registrirani (položajno poravnani), niti med seboj niti glede na ustrežajoče državne topografske karte. Potreba po posebni, pod-pikselski položajni natančnosti je značilna prav za študije sprememb. Položajna usklajenost namreč v prvi vrsti narekuje kakovost in relevantnost končnega rezultata modeliranja. Prav tako pomembna je tudi poravnava podobe

na topografsko karto, predvsem zato, da lahko izvajamo primerjave z drugimi viri prostorskih podatkov, v danem koordinatnem sistemu.

Zelo pomembno in bolj problematično je doseganje t. i. radiometrične primerljivosti. Ker so satelitski posnetki zajeti v različnih časih, so tudi okoljski ali meteorološki pogoji med snemanjem različni. Močan vpliv na zaznane energije (tj. na smer in jakost razširjanja elektromagnetnega valovanja) ima ozračje, natančneje, sestava in trenutne lastnosti ozračja (Richter, 2006; Oštir, 2006; Liang, 2004; Jensen, 1996). Ker gre za zelo zapleten proces, so postopki atmosferskih popravkov z vidika uspešnosti odpravljanja neželenih učinkov najbolj zahtevni, pa tudi rezultati so najbolj nepredvidljivi in mnogokrat ne dovolj učinkoviti. Glavni problem praktične izpeljave atmosferskih popravkov je predvsem v tem, da zapleteni algoritmi, ki numerično modelirajo prenos energije skozi ozračje zahtevajo številne fizikalne meritve in podatke o ozračju v trenutku snemanja, ki pa niso vselej na razpolago. Prav zaradi tega so bile razvite številne tehnike odpravljanja atmosferskih vplivov na osnovi podatkov v podobi sami (Liang, 2004). Vendar so tudi te omejene v učinkovitosti odpravljanja atmosferskih vplivov, predvsem pa niso absolutne (kar pa za analizo sprememb rabimo). V praktičnem delu disertacije sem zato testirala učinkovitost več tehnik ter analizirala vpliv opravljene atmosferske korekcije na lastnosti podatkov.

Poleg atmosferskih vplivov na radiometrične lastnosti posnetkov vplivajo še drugi dejavniki, katerih učinke je prav tako treba odpraviti, če želimo izboljšati primerljivost med podatki. Gre za popravke zaradi različne osvetlitve scene, na katere vpliva geometrija opazovanja v danem trenutku snemanja. Geometrijo opazovanja opisuje razmerje med položajem Sonca, površjem (razgibanost terena) ter položajem senzorja. Ti popravki se imenujejo tudi topografski popravki ali popravki osvetlitve. Tudi na tem področju ni samo ene tehnike, ki bi bila uporabna in učinkovita za vse situacije, zato je treba izbrati danemu območju najbolj primerno. Ker pa tudi odpravljanje teh napak ni enostavno in vsesplošno učinkovito, je za učinkovit rezultat pogosto treba pripraviti lastne, prilagojene rešitve.

Omeniti velja še pestrost oziroma spektralne lastnosti daljinsko zaznanih podatkov. Pestrost se na splošno kaže v luči razlik med lastnostmi sistemov in senzorjev za zajem podatkov, načinom gibanja satelitov okoli Zemlje ter razlik v časovni komponenti zajema. Poleg tega pa gre pestrost podatkov razumeti tudi znotraj enega, izbranega sistema. Za analize vsestranskih sprememb je vsekakor smiselno temeljito proučiti lastnosti in vsebino posnetkov, kot jo podajajo različni spektralni kanali (tj. definirati spektralne karakteristike podob) ter določiti prave (ali za dano aplikacijo najbolj primerne) kombinacije in načine za primerjanje vsebine. Raznovrstnost elektromagnetne energije, ki je »shranjena« v posnetkih Landsat, je vseskozi prisotna tema obravnavanih aplikacij uporabnosti podatkov daljinsko zaznanega površja, še toliko bolj pa njihova vloga v študijah zaznave in analize sprememb.

1.2 Raziskovalna hipoteza, metoda dela in cilji disertacije

1.2.1 Raziskovalna hipoteza in utemeljitev

Modeli prostora (modeli kot približki fizične/geografske stvarnosti) po naravi stvari združujejo naravne in družbene dejavnike, ki se povezujejo v povezano, neločljivo, dialektično celoto. Kompleksnost in posebnost tovrstnega modeliranja analitiku nalaga precej

širok, interdisciplinaren pristop. Iz tega razloga menim, da je treba prilagoditi način dela (lastnosti metodološkega postopka) v vseh stopnjah izdelave modela, pri tem slediti že uveljavljenim tehnikam prostorskega modeliranja ter se poglobljati v iskanje novih možnosti in pristopov, ki jih ponujajo in omogočajo sodobne tehnologije in sodobni zajem prostorskih podatkov. V tej luči razumem tudi analizo sprememb v prostoru skozi čas, zato sem se odločila, da v disertaciji izpeljem primer celovitega metodološkega postopka, ki upošteva posebne lastnosti daljinsko zaznanih podatkov, lastnosti opazovanih pojavov ter združuje ustrezne metode primerjave in merjenja opazovanih razlik (sprememb), ki so nastale v opazovanem času in prostoru.

Glede na opisana izhodišča sem postavila *osnovno hipotezo*, da se le z izpeljavo in analizo celovite metodologije lahko doseže zanesljivo interpretacijo časovne analize izbranega površja Zemlje. *Prva pod-hipoteza* disertacije je, da je koncept katerekoli ekosistemske spremembe (spremembe v okolju) mogoče prenesti v okolje raziskav z daljinsko zaznanimi podatki. *Druga pod-hipoteza* pa, da je ob tem pojem spremembe mogoče dosledno konceptualizirati (kamor nujno sodi tudi abstrahiranje) za izbran namen. Ker pa je smisel analize sprememb na površju opazovanje dinamike spremembe, postavljam še *tretjo pod-hipotezo*, da je na osnovi sledenja opazovanih skupin (kategorij) sprememb na posnetkih mogoče zapisati trajektorijo spremembe ob zahtevani zanesljivosti in relevantni interpretaciji. Preveriti in ovrednotiti torej želim vlogo izpeljave celovite metodologije (tj. izbira podatkov, ustrezna predobdelava, ustrezna analiza) z vidika kakovosti končnega rezultata.

V nadaljevanju podajam še preostale razloge za utemeljitev gornjih izhodišč. Posamični koncepti modeliranja časovno-fizičnih modelov prostora so že deloma razviti za tehnološko okolje geografskih informacijskih sistemov (GIS), vendar se pri t. i. štiri razsežnem GIS (tri prostorske in ena časovna komponenta) pojavljajo težave pri sami izvedbi, pa tudi značilnosti daljinsko zaznanih podatkov zahtevajo drugačno, bolj specifično obravnavo. Osnovno razliko med modeliranjem časovno-fizičnih modelov prostora v GIS okolju in modeliranjem sprememb na daljinsko zaznanih podatkih opazimo v tem, da je v model GIS praviloma vključenih več prostorskih dejavnikov, katerih medsebojne odnose nato proučujemo, časovno-fizični model na daljinsko zaznanih podatkih pa ponavadi vključuje samo en dejavnik – spektralno podobo površja, ki pa je zapisana v več spektralnih kanalih in ponuja različne poglede na lastnosti površja.

Četudi bi želeli v časovno-fizični model, ki temelji na daljinsko zaznanih podatkih, vpeljati druge prostorske dejavnike (npr. vpliv geomorfološke strukture površja ali razgibanosti reliefa, hidrološke strukture, pokrovnosti površja, osončenosti, razporeditve poselitvenega sistema in podobno na spremembe), se moramo zavedati, da so odnosi teh s podatki daljinskega zaznavanja razmeroma slabo in nesistematično raziskani, zaradi različnih pogojev površja in ozračja med snemanjem pa jih tudi težka opredelimo za (v prostorskem in časovnem smislu) splošne in stalne (referenčne). Predvsem z vidika pestrosti podatkov ali prostorske informacije pa velja izpostaviti, da so daljinsko zaznani podatki v študijah analize površja posebnega pomena, a žal redkeje in slabše implementirani v sicer GIS-ovsko usmerjenih časovno-fizičnih modelih prostora. Z ustrezno obdelavo posnetkov lahko poleg običajnih lastnosti površja, kot je na primer raba tal, zdravost vegetacije, razsežnost večje naravne nesreče, opazujemo tudi termične lastnosti površja ali pa npr. mineralno strukturo zgornje plasti površja. Kar pa je nemara pomembnejše, pa je, da zaradi časovne komponente zajema lahko opazujemo tudi spremembe in korelacije z drugimi dejavniki skozi čas.

Prihodnost celovitega modeliranja časovno-fizičnih modelov prostora verjetno bolj kot večvariantni modeli z GIS predstavljajo povezave z algoritmi umetne inteligence ter strojnega prepoznavanja vzorcev v podatkih. Te je trenutno treba uporabljati kot dodatna orodja, vendar gre v bližnji prihodnosti pričakovati, da bodo vključena v profesionalne programe. Zato velja v prihodnosti glede združevanja podatkov razmišljati predvsem v tej smeri.

1.2.2 Metoda dela

V disertaciji sem želela podrobno obdelati in ovrednotiti celoten postopek priprave in obdelave satelitskih posnetkov za potrebe analize sprememb, kot se po merilih povzetih iz strokovne literature s tega področja dosledno navaja. V teoretičnem delu sem pozornost namenila pregledu uveljavljenih postopkov predobdelave satelitskih posnetkov ter razumevanju modeliranja časovno-fizične razsežnosti prostora (tj. konceptov modeliranja statičnih in dinamičnih procesov). Združevanje obeh pogledov je bilo ključno za vzpostavitev konceptualnega ogrodja za analizo vsestranskih sprememb s podatki daljinskega zaznavanja srednje prostorske in časovne ločljivosti.

V praktičnem delu sem pozornost namenila izbiri posnetkov, tehnikam poravnave posnetkov, tehnikam atmosferskih korekcij, popravkom osvetlitve scene, standardizaciji časovne vrste posnetkov ter temeljiti analizi, ovrednotenju in interpretaciji sprememb. Kakovost določenih sprememb in učinkovitost metodologije sem ovrednotila glede na več testnih študij, ki so obravnavale različne naravne pogoje površja in okolice zajema, s čimer sem predvsem želela dobiti vpogled v robustnost metodologije oziroma prepoznati kritične točke v postopku določanja različnih sprememb na površju.

Analiza je potekala na dveh ravneh: analiza postopkov ter analiza in učinkovitost končnih rezultatov. Ovrednotenje postopkov sem opravila tako, da sem za opravljene tehnike predobdelave (priprave) podatkov vselej preverila, kakšen vpliv (oziroma učinek) imajo na lastnosti posnetkov, tako v spektralnem in če je bilo mogoče tudi v prostorskem pogledu. Pri tem sem uporabila standardne statistične teste in posamezni tehniki ustrezno upoštevala še druge dejavnike za katere sem menila, da najbolj zaznamujejo postopek (na primer: simulacija vpliva položaja Sonca pri odpravi atmosferskih vplivov, učinek topografske normalizacije na različne naklone reliefa, rabo tal, prisojne in osojne lege). Na ta način sem dosegla zmanjševanje prenosa grobih napak, ki jih je pri takšnem številu uporabljenih postopkov nujno upoštevati in obvladovati. Učinkovitost rezultatov sem ovrednotila glede na kakovost in skladnost določitve razredov sprememb v časovni vrsti primerjanih posnetkov, delež navideznih ali nepravilnih sprememb ter zmožnost kvantitativnih ocen sprememb (prostorski obseg sprememb, zaznavanje trendov sprememb).

Upoštevanje opisane izhodišča za zastavljene raziskovalne hipoteze, predstavitev časovnih analiz in vidika uporabnosti podatkov daljinskega zaznavanja, je metoda dela v disertaciji zaobjela naslednje raziskovalne sklope.

Konceptualizacija in sistematizacija pojma spremembe za naravne in antropogene procese, ki jih je mogoče opazovati na daljinsko zaznanih prostorskih podatkih. To predvsem pomeni razmislek o ključnih parametrih, ki lahko vplivajo na opazovani pojav ali pa konstituirajo opazovano spremembo v določenem kontekstu. Z drugimi besedami, to pomeni predvideti izvor spremembe, sovpiliv in vzročnost med tvorci in povodi za spremembo, definirati pomen

spremembe ter zamejiti stopnjo nedoločnosti, tj. opredeliti možen delež nepoznanih vzrokov ali pa lastne variabilnosti pojava. Takšen pristop se je pokazal za posebej pomembno izkušnjo pri opredeljevanju optimalnih spodnjih in zgornjih mej za razmejevanje stopnje sprememb. Nadalje pa tak razmislek olajšuje tudi vsako bolj obsežno in kompleksno interpretacijo identificiranih sprememb.

Implementacija konceptov ter raziskava tehnik za analizo spremembe na daljinsko zaznanih podatkih površja. Sklop je obsegal testiranje in ovrednotenje različnih tehnik za analizo sprememb na satelitskih posnetkih. Raziskavo sem izvedla na treh testnih območjih, za katere lahko pričakujemo prisotnost različnih procesov. S tem sem izkusila tudi kompleksnost interpretacije na različno velikih območjih in na območjih z različnimi naravnimi okoliščinami. Tak način omogoča, da podrobno proučimo in spoznamo obnašanje različnih tehnik za zaznavo sprememb ter pridobimo izkušnjo o uporabnosti posamezne tehnike za določen namen. V okviru ovrednotenja me je najbolj zanimal način za odkrivanje kritičnih točk dokazovanja spremembe ter zasledovanja spremembe preko vrste časovno razporejenih posnetkov. V tej fazi je bila posebna pozornost namenjena interpretaciji vsebine satelitskih posnetkov (lastnosti in razsežnost informacij večspektralnih posnetkov) ter dometu uporabnosti v modeliranju časovno-fizičnih informacij površja Zemlje.

Vzpostavitev optimalne metodologije za zaznavo sprememb na podatkih daljinskega zaznavanja. V tem sklopu je šlo za preverjanje izvedbene ravni postopkov predobdelave podatkov (tj. razumevanje obnašanja različnih tehnik priprave podatkov ter pričakovane kakovosti in učinkovitosti posameznih postopkov) ter povezovanje in iskanje optimalne kombinacije postopkov za analize sprememb satelitskih posnetkov Landsat. Menim namreč, da je dobro poznavanje metodoloških in teoretičnih podlag temeljnega pomena za učinkovito izvedbo in kakovostne rezultate določanja sprememb.

1.2.3 Cilji

V disertaciji se ukvarjam z več tematskimi področji raziskav. Ključne so: utemeljitev koncepta spremembe; analiza, izboljšava in razvoj tehnik za zaznavo in analizo sprememb na posnetkih Landsat; analiza učinkov postopkov popravljanja posnetkov ter pretvorba izvornih spektralnih lastnosti v nove spektralne kategorije, ki poudarijo izbrane lastnosti površja, skupaj z interpretacijo vsebine večspektralnih podob površja Zemlje.

Pri obilici razpoložljivih metod se vselej srečamo z vprašanjem, katero metodo uporabiti. Pri tem je bistvenega pomena najti ravnovesje med lastnostmi podatkov, ciljem modeliranja in pričakovano ravnijo rezultatov. S preverjanjem metodologije v danih tehnoloških, teoretičnih in namembnostnih okvirih želi disertacija prispevati k razširjanju znanja o optimalnih rešitvah z vidika uporabe in obdelave podatkov daljinskega zaznavanja za določanje sprememb na več nivojih in ob različnih izhodiščih pogojih. Zato je glavni cilj doktorske disertacije ovrednotiti celovito metodologijo za zaznavo sprememb na podatkih srednje prostorske in časovne ločljivosti za površje Slovenije. Pomen takšne metodološke sistematizacije je predvsem vpogled v izbiro ustreznih in potrebnih postopkov v fazi priprave podatkov, da bo analiza sprememb dala zelene in kakovostne rezultate.

Pomemben cilj je tudi sistematizirati koncept spremembe v prostorskih študijah površja ter vzpostaviti učinkovit metodološki okvir za prepoznavanje in ovrednotenje sprememb v

študijah interakcije človeka in okolja z vidika daljinskega zaznavanja. Tu gre za prispevek k sistematizaciji vsebin na področju analize sprememb s tehnikami in podatki daljinskega zaznavanja ter k razvoju tehnik za opazovanje sprememb v naravnem in urbanem prostoru.

Prispevek disertacije gre tudi združevanju več statističnih in prostorskih tehnik, vključenih v algoritme zaznave in kontrole spremembe ter v dosledni uporabi ustreznih tehnik za ovrednotenje vmesnih rezultatov, kar služi kot splošen mehanizem za oceno relevantnosti modeliranja in omejevanja prenosa grobih napak.

Ugotovitve in spoznanja naj bi v praksi pripomogli k lažji, predvsem pa z vidika časa bolj ekonomični izvedbi nalog pri delu z daljinsko zaznanimi podatki. V znanosti pa lahko prispevajo kot učinkovitejše rešitve znanih ali novih problemov v postopku časovnih analiz.

1.3 Zgradba doktorske disertacije

Doktorska disertacija najprej vpelje in predstavi teoretične podlage za časovne analize na podatkih daljinskega zaznavanja (poglavja 1–4). Sledi raziskava (poglavje 5), kjer v primežu med teoretičnimi izhodišči in splošnimi načeli ter analizo in rezultati na praktičnih primerih, proučujem in vrednotim celotno metodologijo zaznavanja in določanja sprememb na satelitskih posnetkih Landsat.

Prvo poglavje je uvod v disertacijo in predstavlja ozadje časovnih analiz satelitskih posnetkov ter disertacijo na splošno. Drugo poglavje opredeli ključne pojme in koncepte, na katere se nanašajo časovne analize s podatki daljinskega zaznavanja, oriše obstoječe aplikacije in raziskave na tem področju ter poda cilje, ki jih z analizo sprememb skušamo doseči.

Cilj postopkov predobdelave posnetkov ali priprave podatkov za časovne analize je pridobivanje, od pogojev zajema, čimbolj neodvisne in kvantitativno primerljive informacije o zemeljskem površju. Tretje poglavje zato obravnava vse ključne postopke predobdelave posnetkov, podaja razloge, kdaj izvajamo določene postopke priprave in zakaj. Ti postopki so: kalibracija senzorja, odpravljanje geometričnih neusklajenosti, atmosferski popravki, popravki vpliva osvetlitve in terena, radiometrična standardizacija ter različne spektralne pretvorbe podatkov.

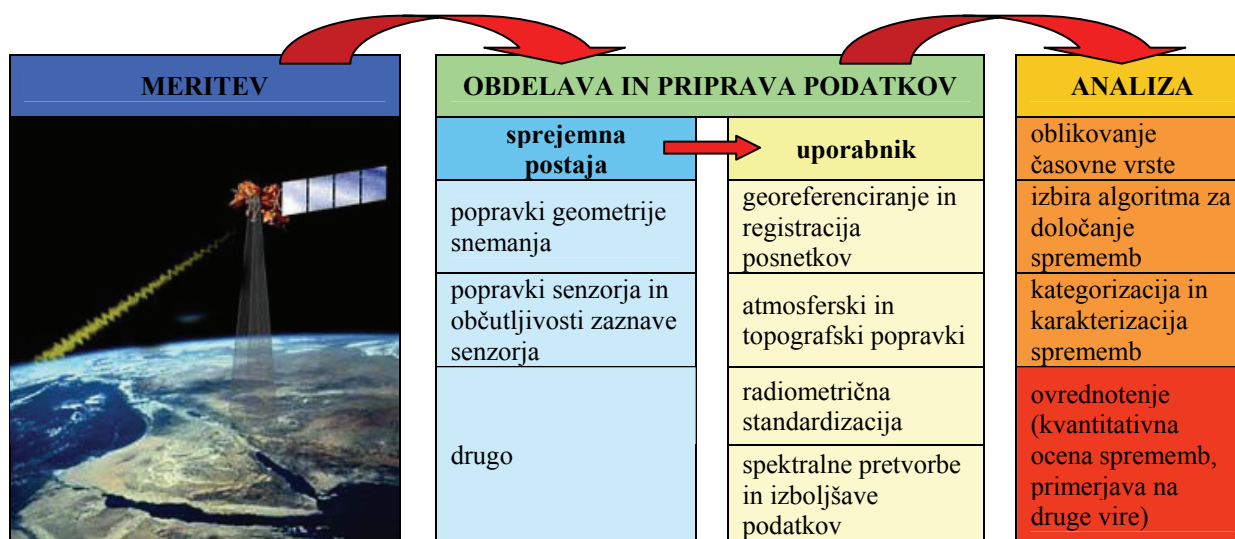
Četrto poglavje obravnava uveljavljeno metodologijo časovnih analiz satelitskih posnetkov ter podaja pregled tehnik, primernih za zaznavo sprememb na podatkih daljinskega zaznavanja. Tehnike so predstavljene strnjeno, podane so predvsem njihove slabosti oziroma znane omejitve in/ali prednosti.

Peto poglavje prikazuje raziskavo, ki je bila opravljena v okviru praktičnega dela disertacije. Opiše in ovrednoti pripravo podatkov (tj. satelitskih posnetkov Landsat) za analizo sprememb na površju Slovenije, opredeli cilje raziskave ter odločitve pri izbiri posnetkov in oblikovanju časovnih vrst. Sledi analiza učinkovanja uporabljenih postopkov popravkov satelitskih posnetkov na lastnosti posnetkov. Temu sledi raziskava analize sprememb z vidika uporabe različnih podatkov o lastnostih površja. Nato pa še raziskava analiz daljše časovne vrste (sekvence posnetkov) na različnih geografskih območjih, na različnih podatkih in za različne letne čase. Posebno podpoglavje obravnava težave povezane z zagotavljanjem optimalne primerljivosti podatkov (tj. prisotnosti navideznih ali nepravilnih sprememb) ter predlaga učinkovite rešitve. Poglavje se zaključuje z obširno diskusijo obravnavanih vsebin.

Šesto poglavje povzema ugotovitve raziskave z vidika implementacije posameznih faz v metodologiji za analizo sprememb in skupnega ovrednotenja metodologije ter poda splošne ugotovitve, ki se nanašajo na časovne analize lastnosti površja Slovenije.

Sedmo poglavje je zaključek disertacije, ki povezuje zastavljena izhodišča in cilje disertacije ter vmesne in končne rezultate raziskave na uporabljenih podatkih.

Na koncu disertacije so pripete Priloge. Priloga A je dodatek k teoretičnim osnovam in ozadju predobdelave podatkov (poglavjem 1–4). Združuje opis tistih algoritmov, ki jih v praktičnem delu ali nisem uporabljala, se mi pa zdijo zanimivi z metodološkega vidika postopkov ali pa predstavljajo temeljne vsebine daljinskega zaznavanja, ki so pomembne za razumevanje obravnavanih postopkov. Priloga B podaja pregled lastnosti podatkov vključenih v praktičen del raziskave. Priloga C vključuje modele, ki so bili razviti v okviru disertacije. Priloga D pa je dopolnitev vsebin končnih rezultatov.



Slika 1: Shema celostne metodologije za analizo sprememb s podatki daljinskega zaznavanja srednje prostorske in časovne ločljivosti.

Figure 1: Methodology for change detection on middle spatial and temporal resolution satellite imagery.

2 ANALIZA SATELITSKIH POSNETKOV ZAJETIH V RAZLIČNEM ČASU

Prostor je objektivna geografska danost, okolje, naša fizična stvarnost, kjer so pojavi, njihova namembnost, medsebojne zveze in razvojne težnje osnovni parametri preučevanja. Prostorske pojave in procese lahko razumemo le, če jih motrimo in preverjamo tudi v različnih časovnih obdobjih. To nam omogoča spoznati poteze razvojnih teženj v okolju, obenem pa ponudi določen vpogled v preteklo dogajanje in medsebojne odnose.

Poglavje opredeli ključne pojme in koncepte, na katere se nanašajo časovne analize sprememb s podatki daljinskega zaznavanja. Nato oriše obstoječe aplikacije in raziskave na tem področju, našteje pomembnejše pristope določanja sprememb ter poda cilje, ki jih z analizo sprememb skušamo doseči. Sledijo razdelki, ki orišejo vlogo in pomen posameznih faz metodologije za analizo sprememb s podatki daljinskega zaznavanja.

2.1 Opredelitev ključnih pojmov in konceptov

Kaj so časovne analize površja?

Časovne analize površja so tiste prostorske analize, ki v prvi vrsti podajajo informacije o spremembah, ki so se zgodile na površju Zemlje v izbranem času, obdobju. V daljinskem zaznavanju gre za uveljavljen izraz, angl. multitemporal analysis ali (surface) change detection, kjer se na podlagi digitalnih daljinsko zaznanih podatkov (satelitskih posnetkov), zajetih v različnem času, opravi kvantitativna primerjalna analiza stanja na izbranem površju Zemlje. Iz tega izhaja, da je predmet, ki ga proučujemo in poenostavljeno imenujemo površje, v najsplošnejšem pojmu trirazsežna fizična ali geografska stvarnost (prostor, zaznavni svet), ki pa je obravnavana z vidika zaznave površja, kot površje »vidijo« satelitski senzorji.

Opredelitev izraza površje

Različna strokovna področja (npr. geo-znanosti, biologija, krajinska arhitektura, arheologija, prostorsko planiranje) oziroma pogledi na fizično ali geografsko stvarnost (prostor) zanj uporabljajo različne opredelitve in poimenovanja. Izbira poimenovanja je praviloma vezana na predmet proučevanja, inštrument opazovanja in medij, v katerem opravljamo analize in raziskave – torej, kaj in kako opazujemo. Tako se v tistih primerih, ki se ukvarjajo bolj z naravo, npr. z varstvom in varovanjem narave, za izbrano fizično ali geografsko stvarnost pogosteje uporabljajo izrazi *okolje*, *ekosistem in/ali habitat*. Takrat, ko pa se s fizično ali geografsko stvarnostjo soočamo v bolj posredni obliki, npr. preko modelov geografske stvarnosti, kjer je le-ta predstavljena v obliki digitalnih podatkov dveh in več razsežnosti ali

pa v primerih ko gre tudi za prisotnost človeških vplivov v okolju, pa se pogosteje uporablja izraz *prostor*. Izraza *pokrajina* in *krajina* sta z vidika splošnosti (pa tudi prostorskega merila) že bolj nadroben nivo. Tu gre praviloma za neko celovito, pa vendar omejeno območje, ki ga družijo neke prepoznavne lastnosti in značilnosti. V geologiji je geografska stvarnost z vidika prostorske razsežnosti še bolj razdelana, saj proučuje tako površino kot notranjost Zemlje.

Večina pogledov bi se strinjala, da je prostor trirazsežen pojav (tri prostorske razsežnosti). Odvisno od usmeritve raziskave, bi torej izraz *geografska stvarnost* lahko nadomestili z izrazom *prostor*, *okolje*, *pokrajina*, *ekosistem*, *habitat* in podobno. Drugače je s *površjem*, ki se (predvsem v fizikalnem in matematičnem pogledu) lahko razume tudi kot dvorazsežen ploskovni pojav, torej kot površina predmeta (ploskev, ukrivljena ploskev). Površje Zemlje je z vidika geografske stvarnosti pojav treh prostorskih razsežnosti in številnih atributov. Satelitski posnetki ta pojav opišejo in zapišejo kot dvorazsežno položajno matriko slikovnih elementov (pikslov) s pripadajočim atributom. Ker gre nadalje pri opazovanju Zemlje s satelitskimi posnetki za vsestransko oziroma neselektivno opazovanje zgornje plasti Zemlje (lastnosti površja), osebno menim, da je izraz *površje* kot kratka sopomenka za *površje Zemlje* ustrežnejši izraz za obravnavana opazovanja (časovne analize izbranega površja Zemlje s satelitskimi posnetki) kot katerikoli od zgoraj naštetih, namensko usmerjenih izrazov.

Ker je izraz *površje*, kot ga uporablja ta disertacija in se uporablja v daljinskem zaznavanju nasploh, primer precej ozke in specifične opredelitve fizične ali geografske stvarnosti, ki je zelo povezana ne samo z opazovanim pojavom temveč tudi z načinom zbiranja oziroma z lastnostmi zapisa podatkov, si podrobneje pogledimo opredelitev izraza še v tej luči.

Daljinsko zaznavanje je posebna tehnologija zbiranja podatkov o dani stvarnosti – gre za zaznavanje fizikalnih količin elektromagnetnega valovanja v izbranih delih vidnega in infra rdečega spektra, lahko tudi radijskega. Zaradi tega ima posebne, to je na primer neselektivnost pri opazovanju, pa tudi omejene zmožnosti zbiranja podatkov o površju Zemlje. Omejuje nas lahko prostorska, časovna, radiometrična in deloma tudi spektralna ločljivost pri raznih sistemih satelitskega opazovanja ter naravne okoliščine med zajemom. Ker je z obdelavami satelitsko zajetih podatkov omogočeno pridobiti različne informacije o stanju na površju Zemlje (npr. vegetacijski pokrov, raba tal, temperatura površja), pa tudi o stanju nekoliko pod zunanjim pokrovom (npr. mineralna sestava tal, globina in sestava morja), se zdi dodatno utemeljeno, če pri analizah na področju daljinskega zaznavanja, ko Zemljo opazujemo »od daleč zgoraj«, govorimo o lastnostih površja (površja Zemlje) kot o lastnostih okolja ali prostora. Z interpretacijo informacij o površju, ki so v resnici zapisane v dvorazsežnem sistemu (tretja razsežnost je atribut in ne tretja prostorska komponenta), pa vselej lahko opišemo tudi lastnosti naše fizične ali geografske stvarnosti oziroma okolja, prostora, kot ga opazujemo in nas obdaja »tu spodaj«. Navsezadnje pri opredeljevanju ne gre pozabiti, da je površje Zemlje sestavni del našega okolja, našega prostora, torej vesolja... in prav zato naj se smiselno vzame opredelitve izrazov ter njihovo uporabo nasploh in v nadaljevanju tega dela.

Zakaj so časovne analize površja potrebne in pomembne?

Če nekaj analiziramo, si obetamo, da bomo na podlagi opravljenih kvantitativnih in/ali kvalitativnih meritev, določili lastnosti opazovanega predmeta in pridobili vpogled v lastnosti stanja predmeta, pojava ali medsebojnih odnosov. Če v osnovno raven analize vnesemo še časovno komponento, torej primerjavo analize stanja skozi različne točke/preseke v času, opravljamo časovno analizo. Pomemben rezultat časovne analize so: prepoznavanje vzorcev,

spremembe teh, njihove lastnosti in možni povodi za njihovo sprožitev, nastanek. Zato časovne analize imenujemo tudi analiza sprememb.

Sprememba

S spremembo pojmuje kakršnokoli spreminjanje lastnosti, oblike in/ali vsebine opazovanega predmeta, pojava (SSKJ, 1994). Predmeti se preoblikujejo (zmanjšujejo, povečujejo, dvigujejo, spuščajo, širijo, krčijo, spreminjajo barve, agregatno stanje in druge lastnosti), se premikajo, nastajajo, pojavljajo ali izginjajo; lahko ostajajo enaki. Prostorsko spremembo lahko opazujemo v časovnem, položajnem in/ali atributnem (vsebinskem) smislu, in sicer v kategorijah kot so širjenje-povečanje oziroma naraščanje, krčenje-zmanjšanje oziroma upadanje ter prehajanje v drugo, izginjanje, pojavljanje (Al-Taha in Barrera, 1997).

Glede na rezultat, *stopnjo spremembe*, in sam proces *preobrazbe predmeta* ločimo naslednje vzorce spreminjanja: nenadne spremembe ali preskoke, ki se zgodijo »na hitro«, ter mehkejše, postopnejše in običajno dolgotrajnejše procese, kot so prehajanje (tranzicija), pretvorba (transformacija) in podobno, do katerih pride skozi dano obdobje, interval ali periodo časa (Allen, 1983; Frank, 1997). Na primeru izbrane rabe tal pomeni transformacija (angl. land cover conversion) popolno nadomestitev ene rabe tal z drugo (npr. travnik se spremeni v pozidano površino), tranzicija (angl. land cover modification) pa bolj subtilno spremembo, ki sicer spremeni neko značilnost dane rabe tal, vendar pri tem ne pride tudi do transformacije oziroma spremembe razreda rabe tal (npr. mlad gozd preraste v zrel gozd). Nekatere spremembe stanja so človeškega izvora (npr. krčenje gozdov za potrebe gradnje ali kmetijstva), druge pa naravnega (npr. zamiranje gozdov zaradi bolezni dreves, požara).

Kategorizacija sprememb nikakor ni enostavna naloga. Številčno enaka sprememba stanja lahko za različne predmete/pojave pomeni različne kategorije prehoda ali pretvorbe. Za nekatere predmete (npr. rast vegetacije) so pomembnejše in primernejše sezonske primerjave nastopa določene faze (opazujemo dejanske dogodke, kot so pričetek zelenja, razbohotenje in razcvet, olistanje, mirovanje), za druge so spet primernejše analize sprememb glede na dolgoročno, morda večletno izražen trend pojava oziroma razvoja predmeta (opazujemo prehajanje kmetijskih površin v neobdelane in vse bolj zaraščene površine). Za določene pojave/predmete je lahko ključna tudi prostorska razsežnost spremembe. Nekateri pojavi/spremembe lahko prizadenejo celotno območje na enak način in istočasno (poplava, požar), drugi lahko polagoma napredujejo in zlagoma premikajo meje med različnimi kategorijami površja, spet nekateri pa lahko izražajo zelo zapletene, nehomogene, neenakomerne prostorske vzorce. S tega vidika Khorram et al. (1999) predlagajo štiri tipe sprememb, kjer prostorska entiteta (1) postane nov razred, nova kategorija, (2) spremeni (skrči, razširi, prekroji) obliko, (3) spremeni položaj in (4) se združuje ali razdrablja.

Pogosto se naštetih procesi vrstijo v določenem (časovnem) ritmu in so sestavni del (življenskega) cikla ali (življenske) periode predmeta. Za katerikoli prostorski pojav ali proces, ki ga želimo natančneje proučiti, potrebujemo vštete časovne komponente, saj le tako lahko predstavimo spremembo, sklepamo o vzrokih in učinkih medsebojnih zvez in odnosov ter navsezadnje napredujemo v razumevanju lastnosti in strukture pojava, ki je predmet proučevanja. Pomembna je torej »krivulja« časa, saj so dani pojavi lahko vezani na svojo lastno (t. i. življenjsko) periodičnost ali pa periodičnosti ni, na dolgotrajen in postopen razvoj ali nenadno transformacijo. Le izbira ustrezne časovne enote za opazovanje zagotavlja tudi pravilno interpretacijo poteka dogodkov in ovrednotenja nastalih sprememb.

Upodobitev prostora – model prostora

Upodobitev prostora je v najbolj splošnem pomenu mogoče razumeti kot ureditev ali organizacijo idej o obliki in delovanju zaznavnega sveta (kamor v prvi vrsti sodita prostor in čas kakor ju oči opazovalca vidijo in um razume), ki so definirane preko niza osnovnih elementov, njihovih lastnosti ter medsebojnih odnosov (Šumrada, 2005). Model prostora je vselej poenostavitev dejanskega stanja oziroma stvarnosti. Vendar na tak način, da se ohranijo vse pomembne lastnosti.

Upodobitev časa – časovni vzorci ali porazdelitve

Koncept časa je vezan na intuitivno zaznavo in spoznanje. Minevanje časa najbolj naravno dojemamo in razumemo preko zaznanih sprememb, ki se pripetijo predmetom v prostoru – njihovim preobrazbam skozi čas in premiki, ki se zgodijo med njimi. Časovne porazdelitve ločimo med seboj po tem, na kakšen način obravnavajo značilno težnjo poteka dogodkov (Peuquet, 1994; Langran in Chrisman, 1998; Frank et al., 1997). Pomembno dejstvo je torej ali lahko razberemo časovni vzorec pojavljanja nekega pojava, določimo trajanje, minevanje in podobno. Ter nadalje ali znamo lastnosti opažene v teku časa tudi matematično izraziti. Med glavne takšne skupine časovnih vzorcev ali lastnosti časovne porazdelitve pojavov prištevamo (Langran, 1989; 1992):

- statično stanje (stanje nespremenljivosti),
- oscilacije (periode in kar je ritmičnega pojavljanja/ponavljanja),
- kaos ali nered (neredno, nepredvidljivo, lahko tudi deterministično, nelinearno obnašanje v dinamičnih sistemih; za kaotično obnašanje je značilna dopustnost majhnih nezanesljivosti v času, vendar jih je v sistemu naključnih pojavljanj mogoče predvideti v času kratkotrajne napovedi) ter
- naključnost.

Kakšnega tipa je *časovna nezveznost* (diskontinuiteta) opazovanih pojavov, npr. razlikovanje oscilacij od kaosa ter kakšnega tipa je prostorski vzorec ali *prostorska nezveznost*, je pomembna opredelitev vseh prostorsko-časovnih analiz (Worboys, 1992; 1997; Vasiliev, 1997; Armstrong, 1988). Oba, prostor in čas sta po svoji naravi zvezna, vendar za potrebe objektivnih opazovanj po splošno priznanih merilih praviloma razčlenjena na diskretne enote, enotnih ali različnih dolžin, intervalov, meril. Čas in prostor vsled posebnih lastnosti, ki jih imata, ne moreta imeti enake enote (časa ne moremo izraziti v metrih in prostora ne v sekundah). Časovna enota je lahko sekunda, ura, dan, mesec, leto, letni čas, faza ali karkoli drugega, kar ustreza opisu lastnosti opazovanega pojava. Časovni intervali, kot enote časa, so lahko ločeni z dogodki, na primer, da določen dogodek predstavlja tipično navzočnost neke spremembe pri pojavu/predmetu, ki ga opazujemo. Neizbežna razčlenitev časa in prostora na diskretne, osnovne enote opazovanja nas nemudoma vodi k vprašanju opredelitve ustrezne časovne in prostorske ločljivosti ter ustreznega merila.

Navzočnost dogodka lahko v eno-razsežni časovni dimenziji zabeležimo kot časovni trenutek ali časovno točko (analogno z lastnostmi točkovnih objektov v eno-razsežnem prostoru) ali preko zveznih/nezveznih, a povezanih, časovnih intervalov (ki so analogni z lastnostmi segmentov v eno-razsežnem prostoru), s katerimi navzočnost dogodka ponazorimo preko opisa časovnega trajanja dogodka. Tako vse skupaj zbrane časovne točke kot vsi skupaj zbrani časovni intervali ali kombinacija obojih tvorijo časovno dobo, obdobje. Časovna skala

je lestvica oziroma ustaljeno merilo na kateri beležimo časovne dogodke, ki pa lahko ima različne stopnje strukturiranosti, razdelbe. Vendar imajo, podobno kot prostorske skale, tudi časovne skale metrične lastnosti vselej skrbno določene (Peuquet, 1994; Snodgrass, 1997).

Modeliranje časovno-prostorske informacije

Objekti v splošnem pomenu besede (otipljivi predmeti iz naše fizične stvarnosti) so podvrženi spremembam. Lahko se preoblikujejo, premikajo, nastajajo ali izginevajo; lahko ostajajo enaki. Spreminjanje objektov je le eden od pojavov v prostoru. V to jih spodbujajo tako notranje kot zunanje sile. Pojavi so praviloma povezani s številnimi in raznolikimi procesi, ki jih prinašajo čas, narava, človek ter se bolj ali manj izrazito kažejo skozi tempo časa. Te pojave iz različnih razlogov opazujemo. Kako pa jih lahko merimo in analiziramo? Ena od možnosti, primerna za opazovanje geografskih pojavov, je zbiranje t. i. časovno-prostorskih informacij in podatkov o objektih in pojavih v prostoru. Bistvo časovno-prostorskega modeliranja kot metodologije ali načina obravnave pri tem je, zagotoviti primerjavo med novimi in preteklimi stanji, s tem pa seveda tudi prostorsko-časovne analize in prostorsko-časovno sklepanje (postopek prostorsko-časovne razlage; angl. spatio-temporal reasoning).

Informacijski sistemi najpogosteje modelirajo časovnost pojavov na dva načina (Langran, 1989; Egenhofer in Golledge, 1988): procesno in vzročno-posledično modeliranje. Če se za hip oddaljimo od prostorskih analiz, kakršne lahko izvajamo z GIS, uvidimo, da številna področja ali aplikacije vključujejo časovno dimenzijo kot glavno premiso za izvajanje analiz (npr. ekonometrija, vsi eksperimenti na področju meteorologije, rasti tkiv, množenja populacije, katerih meritve se zbirajo v časovni domeni). Vpeljevanje časovne informacije v tovrstne informacijske sisteme poznamo pod oznakama *procesno modeliranje*, kjer sistem odgovarja na časovna poizvedovanja v smislu analize trendov *kaj – kje – kdaj* na eni strani ter *vzročno-posledično modeliranje*, kjer sistem poišče ustrezne ali možne rešitve situacije glede na ugotovljene ali predvidene povode, na drugi strani.

Pri nalogah prostorsko-časovnega sklepanja težimo k uravnoveženosti več vprašanj. Za razpoložljive podatke želimo ustvariti zvezo v vseh smereh med vprašanji *kaj – kje – kdaj*; pri tem pa vprašanji *zakaj* in *kako* običajno ostajata na strani naše kolikor je le mogoče objektivne interpretacije. Razumevanje obravnavanega problema bo torej odvisno od mehanizma za izpeljavo prostorsko-časovnih vzorcev in odnosov ter od mehanizma za izpeljavo ali ugotovitev pravih časovnih ritmov, vzrokov in posledic in vsega drugega, kar lahko povezujemo s časovnimi razlagami dogodkov in pojavov. Vzročno-posledični modeli prostora in časa, ki so v razlagi prostora in časa nekako najbolj naravni in pogosti, terjajo vzpostavitev metodologije, s katero identificiramo zveze med vzroki in posledicami in s katero identificiramo zveznost spreminjanja ali zveznost ohranjanja (nespremenljivosti) objektov oziroma pojavov. Pri tem pride lahko še posebej do izraza lastnost nepopolnosti podatkov, saj lahko na videz trivialne napake v verigi sklepanja in razlage zvez vzrokov in posledic privedejo do kumulativnih učinkov, ki nikakor niso več zanemarljivi, lahko pa so zavajajoči.

Načini obravnave prostorsko-časovne informacije v daljinskem zaznavanju

Daljinsko opazovanje površja Zemlje s satelitov je tako rekoč samodejna meritev. Takšna avtomatiziranost omogoča, da se podatki zbirajo tako sistematično, kakor tudi zelo pogosto. Podatki daljinskega zaznavanja so – z vidika meritev in opazovanj dolgotrajnih procesov na Zemljinem površju – izčrpni, način zajema pa v splošnem tak, da opazovanja lahko smatramo za neselektivna, tj. neodvisna od razvoja dogodkov na površju Zemlje in ki so vstavljena v

realno ali pa zgolj navidezno zaporedje oziroma tek procesov. Takšna enakomernost zbiranja podatkov ima svoje prednosti, pa tudi slabosti.

Prednost je ta, da lahko pustimo »naj podatki sami spregovorijo«, brez vnaprej ustvarjenega mnenja ali pričakovanja, kaj bomo izmerili, ki v obratni situaciji lahko zasenči prej še neodkrite vzorce. Zanimiva lastnost je tudi, da je ista opazovanja mogoče interpretirati na različne načine, pri tem pa nam sistematičnost zajema vseeno omogoča določeno absolutnost pogleda. Omejitev satelitskega načina zbiranja podatkov je (za določene pojave) lahko časovni interval zajema – časovno profiliranje. Sistemi, ki sistematično zbirajo podatke za določeno površje (npr. Landsat, ki preleti Slovenijo na 16 dni), lahko imajo za opazovanje nekega specifičnega pojava prenizko pogostost ponovnega obiska (časovna ločljivost), dodatno pa lahko meritve poslabšajo tudi deviantne meteorološke razmere, ki se odvijajo med enim in drugim snemanjem iste scene. Pomembno torej je, da za opazovani pojav, še sploh v primeru opazovanja razvoja zelo specifičnih pojavov, izberemo ustrezen satelit (tj. ravnovesje med ustrežno spektralno, časovno in prostorsko ločljivostjo ter namenom opazovanja).

2.2 Vloga in oris obstoječih raziskav

Analiza sprememb na površju je dandanes pomembna predvsem z vidika rahljanja ekološkega ravnovesja in skrbi zaradi povečane ranljivosti okolja. Gre za pereč problem pospešenega preoblikovanja naravnega prostora v različne neustrezne izrabe zemljišč in naravnih dobrin, kot posledica motivov kapitala in pogleda sodobne civilizacije na ustroj bivanja, ter na drugi strani analitične potrebe po ohranjanju nujnih dobrin za preživetje in ravnovesje na planetu.

Časovne analize površja, kot jih omogočajo satelitski opazovalni sistemi, so edinstvene. Omogočajo sinoptično, ponovljivo in koherentno perspektivo opazovanja in spremljanja večjih območij zemeljskega površja. Edinstvene so tudi zaradi posebne tehnologije in njenih zmožnosti, po drugi strani pa tudi zato, ker lahko odgovarjajo na različna vprašanja in rešujejo različne probleme. Te Jensen (1996) razdeli na:

- splošne probleme, ki so dolgoročnega pomena za celotno družbo (ohranjanje biodiverzitete in habitatov, spremljanje širjenja puščav, krčenja ledenikov, tropskega gozda) ter
- bolj konkretne probleme, ki so tudi bolj prostorsko lokalizirani (aktivnosti pri nesrečah: zemeljski plazovi, poplave, razlitja surovinskih derivatov).

Časovne analize površja so naravnane tako raziskovalno (analize sprememb z vidika perspektive časa) kot tudi strateško (uporabnost in koristnost analiz). Velja tudi izpostaviti, da tedaj, ko imamo analizirano stanje in potek dogodkov v preteklosti, lahko (pod določenimi pogoji) predvidevamo tudi razvoj dogodkov v prihodnosti – torej lahko tudi napovedujemo trend razvoja okoljskih sistemov ter v primerih slabih in škodljivih scenarijev pravilneje in učinkoviteje oziroma ustrezneje ukrepamo.

2.2.1 Dosedanje aplikacije

Zaznava sprememb v študijah s področja daljinskega zaznavanja se je silovito razmahnila predvsem v zadnjem desetletju, glavni razlog pa je najverjetneje širša uveljavitev uporabe

daljinsko zaznanih podatkov ter ugodnejša cenovna in arhivska dostopnost podatkov. Pred tem so bile študije in analize sprememb kar nekako v senci glede na druge vsebine daljinskega zaznavanja, kot so klasifikacija posnetkov, radiometrični popravki in podobno (Smits in Bruzzone, 2004). Šele zahteve po širši uporabi obsežnih zalog podatkov, močnejše povezave med uporabniki in stroko ter hiter in poenostavljen način pridobivanja podatkov za večje površine, so sprožile številne *časovne analize* ter *sporadična in/ali kontinuirano usmerjena opazovanja* Zemljinega površja, s tem pa tudi popularizacijo raziskav in uporabe časovnih serij satelitskih posnetkov.

Na drugi strani je bilo veliko raziskav pogojenih z *naravnimi ali antropogenimi nesrečami* (ESA Space and Major Disasters, 1999 – 2007; Oštir et al., 2003), tj. z opazovanjem prav določenega pojava ali dogodka v lokalnih, regionalnih ali medcelinskih razsežnostih (tj. opazovanje in ocena nastale škode širjenja razlitih naftnih madežev, premikanja orkanov, pustošenja požarov, zemeljskih plazov, poplav, vulkanov in podobno). Pri takšnih nesrečah je bilo najbolj pomembno zagotoviti opazovanje pojavov »tu in zdaj«. Satelitski posnetki, kot praktično nemudoma razpoložljivi podatki ter sodobna informacijska opremljenost tako prevzamejo ključno vlogo. Rezultat tovrstnih raziskav je običajno vezan na dramatične spremembe ter spremljanje razsežnosti in posledic sprememb. Praviloma te obstanejo na stopnji kartiranja specifičnih pojavov in dogodkov ter ocene škode na objektih ali v naravi.

Šele v zadnjih letih je mogoče zaslediti preobrat tudi v smeri določitve in opazovanja procesnih sprememb (glej npr. članke v revijah IJRS; PE&RS; RSE¹), torej sprememb, ki se v prostoru dogajajo ves čas. Razvijajo se metodološke raziskave za učinkovite načine merjenja in spremljanja kontinuitete (tudi milejših, postopnejših) sprememb na daljinsko zaznanih podatkih. Tovrstne raziskave so poznane tudi pod imenom *ekosistemski monitoring*. Nekaj konceptov za ekosistemska opazovanja je sicer že razvitih, vendar izvedbe še zdaleč niso tako izpopolnjene, da bi bile tudi simultano vključene v komercialne in/ali profesionalne programe.

Problem je seveda tudi ta, da ima vsak okoljski sistem svoje značilnosti, tako v sestavi kot procesih, ki se v njem odvijajo. Zato potrebuje specifično merilo (za prostor in čas) in ustrezne podatke (izbira satelitskega sistema narekuje tako lastnosti kot postopke obdelave podatkov). Prav sestava in lastnosti obravnavanega površja (območja) določata številne predpostavke in pogoje za metodologijo ekosistemskega monitoringa. Zato vse različne situacije težko združimo pod streho univerzalnega sistema. Praksa kaže tudi na to, da so za kompleksnejše študije učinkovitejši ekspertni sistemi in predmetno usmerjeni pristopi.²

Za analizo stanja med dvema časovnima trenutkoma, so se najbolj uveljavile primerjave na osnovi enostavnega odštevanja podob. Navkljub odprti/poljubni definiciji spodnje in zgornje meje tolerančne variabilnosti nespremenljivosti predmetov, pa takšnega pristopa ni mogoče implementirati v vseh situacijah, saj se primerjane podobe lahko preveč razlikujejo v radiometričnem intervalu in v spektralnih lastnostih (te lahko pogojijo meteorološke,

¹ International Journal of Remote sensing, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Remote Sensing of Environment.

² V tem duhu, recimo, tudi profesionalni program za obdelavo satelitskih posnetkov Erdas Imagine ponuja zgolj klasično primerjavo posnetkov z odštevanjem podob »pred« in »po«, rezultat pa je vrnjen v obliki podobe absolutnih razlik. S tem program omogoča vzpostavitev časovne scene dogajanja v obliki niza podob razlik, ne daje pa dobrega izhodišča za neposredno analitično obdelavo same dinamike spreminjanja. Izvedba časovnih analiz na satelitskih posnetkih je v tem trenutku bolj ali manj prepuščena lastnemu oblikovanju sistema, modeliranju.

fenološke razmere, degradacija senzorja in podobno). Prav zaradi tega razloga večina pionirskih pristopov k analizi sprememb izhaja iz predhodne *klasifikacije podob* (Coppin et al. 2004; Lu et al. 2004), kar bi lahko deloma šteli tudi za predmetno orientiran pristop. Problem časovnih analiz klasificiranih podob lahko je: (1) da s klasifikacijo namensko posplošujemo informativno vrednost podobe, s tem pa lahko izgubimo dragoceni del informacij za zaznavo in merjenje sprememb v manjšem merilu ter (2) zagotovitev identitete spektralnih podpisov predmetov na več posnetkih zahteva precej pozornosti in dela. Poleg tega so klasifikacije običajno namensko zastavljene in zato omejene. Pri večjem številu posnetkov se moramo zavedati tudi prirastka v obsegu dela. Kljub temu so post-klasifikacijske analize sprememb še danes nadvse priljubljene in tudi najbolj pogoste.

Pristop, ki temelji na predhodni klasifikaciji podob, je tudi z vidika interpretacije sprememb vsebinsko gotovo med najbolj povednimi. V opazovanje nam ponuja možnost neposrednega sinoptičnega proučevanja t. i. transformacij rabe tal/pokrovnosti, tako po obsegu (prostorska razsežnost) kot po prehodu razreda ali atributu (iz dane rabe tal v neko drugo rabo tal). Kljub temu menim, da post-klasifikacijski pristop k obravnavi sprememb v prostoru ni vselej zadovoljiv, saj (1) zanemari nivo opazovanja manjših sprememb in blažjih prehodov ter (2) kakovostne klasifikacije vrste posnetkov (primerljivosti) ni enostavno doseči. Zato v okviru doktorske disertacije analiziram uporabnost izvornih informacij o površju in proučujem možnost in učinkovitost kontekstualno povezanih pristopov za obravnavo *vsestranskih* sprememb.

2.2.2 Obstoječe metode in pristopi

V osnovi ločimo *dvo-časovne analize* ali *analize para podob* (opazujemo podobo razlik) ter *več-časovne analize* ali *analize niza podob* (opazujemo trend sprememb skozi vrsto podob). Obstoječe postopke ali, bolje, principe časovnih analiz na podatkih daljinskega zaznavanja (Singh, 1989; Coppin et al., 2004; Lu et al., 2004) naštevam v naslednjih alinejah (podrobneje pa jih obravnavam v poglavju 4):

- post-klasifikacijska primerjava (tudi delta klasifikacija): gre za primerjavo dveh ali več že klasificiranih podob po principu rastrske primerjave (odštevanja, deljenja) piksel na piksel ali segment na segment,
- univariantno razlikovanje podob z odštevanjem podob ter z deljenjem podob,
- dvo-časovne linearne transformacije podatkov: opravljamo v dvo-razsežnem prostoru, na izbranih parih, pri tem izvorne podatke transformiramo v nove, bolj sežete informativne komponente obeh podob (npr. z metodo glavnih komponent ali s Kauth-Thomasovo transformacijo spektralnih prostorov),
- dvo-časovne analize vektorjev sprememb: opazujemo magnitudo (jakost) in smer (kot) spremembe v t. i. vektorju sprememb,
- analiza z linearno regresijo: indikator spremembe je dimenzija v ostankih,
- kompozitne analize: analiza veččasovnih tipskih gruč (spektralnih vzorcev) ter
- hibridne ali kombinirane metode: postklasifikacijska primerjava samo tistih območij, ki smo jih z drugimi algoritmi identificirali kot spremenjena območja; vzporedna izpeljava več algoritmov za določanje sprememb, nato pa po načelu »glasovanja« integriramo mero za spremembo (npr. sprememba je potrjena, če so tri od petih metod dani piksel/območje potrdila za spremembo).

Za analize časovnih trajektorij (analize v časovnih profilih) se uporablja še:

- analizo enostavne časovne vrste,
- več-časovne linearne transformacije podatkov,
- analize na spremembah vektorjev,
- na krivuljah temelječe ekstrahiranje indikatorjev sprememb, nadalje pa še
- analiza na podlagi Markovske verige verjetnosti prehajanja in podobno.

Najsodobnejše raziskave in preizkusi za analizo več-časovnih vrst potekajo še na področju:

- ekspertnih sistemov ter vključevanja umetne inteligence (npr. princip celičnega avtomatizma); novih algoritmov za izračun zaznave sprememb; vključevanja mehke logike za identifikacijo sprememb ter strojnega učenja za identifikacijo vzorcev.

Tehnike, ki temeljijo na veččasovnih, večspektralnih daljinsko zaznanih podatkih so potrdile potencial uporabe daljinsko zaznanih podatkov za namen zaznave, identifikacije, kartiranja in opazovanja sprememb v zemeljskih ekosistemih, tudi neodvisno od vzročnih sil in gibal pojavov. Kljub temu velja opozoriti, da ni smiselno povsem zanemariti in v analize ne vključiti primarnih vzgibov delovanja v opazovanem sistemu. Če ne zaradi drugega, nam poznavanje možnega obnašanja pojavov bistveno olajša interpretacijo ter pomaga pri izključevanju šuma ali navideznih sprememb v rezultatu vseh identificiranih sprememb.

2.2.3 Primeri uporabe posnetkov Landsat za opazovanje sprememb na površju

Posnetki Landsat so zaradi več kot 30 letne časovne pokritosti površja Zemlje, pogostosti snemanja površja (na 16 oziroma 18 dni), razmeroma visoke prostorske ločljivosti (30 m), radiometrične primerljivosti med senzorji različnih Landsat misij (MSS, TM, ETM+), razmeroma velike spektralne pokritosti v vidnem in IR spektru (4 oziroma 7 spektralnih kanalov) ter precejšnje prostorske pokritosti površja (scena zajame približno 175 x 180 km) nedvomno privlačni za številne regionalne študije površja in študije sprememb na površju.

V literaturi s področja zaznavanja in analize sprememb na površju s satelitskimi posnetki Landsat po številu vodijo študije sprememb gozdnih površin oziroma vegetacije ter pokrovnosti / rabe tal nasploh. Pri vegetacijskih študijah gre največkrat za predelavo posnetkov v različne izvedbe vegetacijskih indeksov in v klasificiranja gozdnih tipov. Predmet proučevanja so posledice požarov, zaraščanje iz tega ali onega razloga, nenadzorovana sečnja, goloseki itn. Precej raziskav prihaja, razumljivo, iz Kanade (monitoring in upravljanje z velikimi površinami gozdov), srednje in Južne Amerike (tropski gozdovi, izkoriščanje gozda) ter Evrope (zaraščanje, zdravost gozdov). Študije sprememb pokrovnosti oziroma rabe tal, ki izhajajo izključno iz klasifikacije in poleg vegetacijskih tipov obravnavajo še druge tipe rabe tal (na primer travnike, polja, urbane površine, gola tla, skalovje, vodne površine in podobno), v prvi vrsti proučujejo spreminjanje deleža posameznih kategorij pokrovnosti / rabe tal v splošnem ter z vidika analize na račun katere kategorije se dana kategorija zmanjša ali poveča v danem časovnem presledku.

Precejšnje število študij analize sprememb je mogoče zaslediti tudi na področju obravnave tal, pri čemer se uporablja tako klasifikacijo podob kot različne indekse tal, mineralne indekse,

komponente vlažnosti tal in podobno. Te se pojavljajo predvsem za potrebe kmetijstva in opazovanja širše okolice z intenzivnim izkoriščanjem naravnih virov.

Sledijo še razmeroma številčne študije vode: spremljanje premikov obalne linije, razporejenosti in količine površinskih voda, spremljanje kakovosti voda ter spremljanje močvirnatih območij, premikov snežne odeje in ledu oziroma ledenikov ter sprememb mineralne sestave tal (izkoriščanje naravnih virov).

Na koncu velja omeniti, da se je v zadnjem desetletju okrepilo tudi število študij sprememb v urbanem okolju (širjenje urbanizacije, večji infrastrukturni posegi v prostor). Te so pogoste za mesta bližnjega vzhoda in nasploh mesta, ki so priča nenadzorovanemu in hitremu širjenju.

Za območje Slovenije lahko zasledimo uporabo posnetkov Landsat za namen zaznave in analize sprememb na površju v naslednjih primerih:

- Ugotavljanje gozdne meje in napovedovanje trenda zaraščanja (Kobler et al., 2002; 2000), monitoring in analiza zaraščanja kraške krajine (Hočevar et al., 2004), ocenjevanje sprememb v pokrovnosti gozda in rabi prostora na območju Loške doline 1992-2000-2005 (Levec, 2006).
- Ugotavljanje pokrovnosti / rabe tal ter spremembe rabe tal v Sloveniji 1993-2001 (Skumavec in Šabić, 2005).
- Ocena sprememb na področju rabe zemljišč na podlagi primerjave slojev CORINE Land Cover 1995/96-2000 (Narava in površje, 2005; Vrščaj, 2006).
- Uporabnost Landsat podatkov za opazovanje spreminjanja urbane rabe tal v Ljubljani (Krevs, 2004).
- Analiza razsežnosti, učinkov in posledic zemeljskega plazju v Logu pod Mangartom (Oštir et al., 2003).

Iz navedenega izhaja, da so študije sprememb površja Slovenije z uporabo satelitskih posnetkov maloštevilne ter da je največja aktivnost, pa tudi inovativnost raziskav prisotna na področju gozdarstva oziroma za potrebe gospodarjenja z gozdom. Ugotavljanje sprememb za potrebe kmetijstva je na Ministrstvu za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano sicer v teku (zajem in primerjava kmetijske rabe tal med stanjem leta 2000 in sedaj), vendar so za vir uporabljeni posnetki ortofoto in ne Landsat. Slednje je verjetno posledica težavnosti obdelave posnetkov, v prvi vrsti kakovostne klasifikacije, ne nazadnje pa tudi merila posnetkov (razdrobljenost kmetijskih površin nasproti velikosti najmanjše zaznane prostorske enote pri posnetkih Landsat).

Študijo sprememb v rabi tal oziroma izrabi zemljišč v obliki kontinuiranega monitoringa večjih površin s posnetki Landsat, ki je vsekakor lahko zanimiva in uporabna aplikacija za številna področja, opravljajo na Uradu za statistiko. Primer ovrednotenja podatkov o rabi tal srednjega merila pa je narejen na Biotehnični fakulteti in Kmetijskem inštitutu Slovenije. Tudi uporaba satelitskih posnetkov za oceno nastale škode po naravni ali antropogeni nesreči, kar je ena od prominentnejših uporab satelitske tehnologije, je omejena na en primer. Podobno kot opravljene raziskave za potrebe gozdarstva tudi slednja potrjuje uporabnost in učinkovitost uporabe satelitskih posnetkov Landsat v dane namene. Do drugačnega zaključka je prišel Krevs (2004), ki ocenjuje, da so Landsat posnetki s svojo 30 m prostorsko ločljivostjo pregobega merila (detajla) za opazovanje spreminjanja urbane rabe tal.

2.3 Oblikovanje časovne vrste podatkov za analizo sprememb na površju

Satelitski posnetki omogočajo merjenje in določanje sprememb na površju Zemlje na širšem območju. Sistematična opazovanja elementov površja Zemlje v daljšem časovnem obdobju omogočajo kvantitativno izmeriti lastnosti sezonskih dogodkov in opisati stanja elementov površja glede na sezonske, periodične časovne vzorce, kot tudi letne in večletne časovne vzorce (Jensen, 1996; Lillesand in Kiefer, 1994; Liang, 2004; Coppin et al., 2004).

Glavni dejavniki, ki jih za oblikovanje časovne vrste vselej upoštevamo, so čas, prostor in lastnost opazovanega pojava. Pri tem upoštevamo t. i. načelna vodila časovne narave in načelna vodila prostorske zastopanosti, vselej z vidika lastnosti opazovanega pojava ter določimo ustrezen presek naštetih parametrov (Coppin et al, 2004; Lu et al., 2004; Singh, 1989). Kakšen presek oblikujemo je v prvi vrsti odvisno od tega, v kakšni luči želimo spremembo opazovati. Ali v ospredje postavimo spremembe, kjer nas zanima predvsem časovna dinamika izbranega dogodka (kako se opazovano spreminja v času → trajektorija intenzitete izbranega dogodka) ali spremembe kot prostorsko dinamiko, kjer nas zanima položajna komponenta nekega pojava (kako se opazovano spreminja v položaju, legi, obliki, velikosti in podobno) ali nemara oboje. V resnici želimo največkrat spremljati oboje hkrati – torej magnitudo, smer in hitrost opazovanega, saj je v naravi stvari, da so naravni in antropogeni procesi v tesni povezavi specifičnih prostorskih in časovnih determinant. Na naši strani torej še ostane, kako želimo dobljene informacije prikazati, kartirati in/ali izrisati odnose. Kot pri vsaki meritvi, si je tudi pri analizi sprememb treba opredeliti ustrezne osnovne enote za merjenje količine časa in prostora z vidika lastnosti opazovanega pojava.

Za ilustracijo si pogledjmo nekaj možnosti načrtovanja prostorsko-časovne analize sprememb ter razvrščanje načelnih vodil časa in prostora.

2.3.1 Izbira časovne enote

Za primer naj služita letno opazovanje »življenja« pokrovnosti tal v poljubni regiji ter opazovanje obnove hitro rastoče vrste gozda na nekem območju, ki je v celoti namenjen gospodarskemu izkoriščanju. Cilj je podoben, spremljati želimo dinamiko izbranih procesov, to pomeni, da opazujemo točko nastopa nekega dogodka, razvoj in iztek, torej trajanje dogodka ter točko zaključka dogodka ali prestopa v neko drugo fazo »življenja« opazovanega pojava – transformacijo. Namen pa, da bomo pravočasno zaznali bodisi neka odstopanja v opazovani periodi, ki bodo presegala naravno variabilnost (odkloni) bodisi, da bomo, kot v namišljenem drugem primeru, sposobni določiti najustreznejši dan sečnje.

V prvem primeru opazovane količine primerjamo in/ali preverjamo z dinamiko v izbranih, drugih primerljivih letih. Časovna premica je v tem primeru dolga eno leto, se vselej začne z isto izhodiščno točko, sama časovna ločljivost je enakomerna, vendar odvisna od razpoložljivih podatkov in potrebne časovne natančnosti (dan, teden ali mesec). V drugem primeru bi časovna premica lahko bila dolga 20 let, časovna ločljivost pa prilagojena pomembnim razvojnim stopnjam rasti gozda in zato lahko tudi neenakomerna.

Na tak način lahko opazujemo in primerjamo potek izbranih dogodkov z neko pričakovano ali uveljavljeno krivuljo poteka. Če imamo tudi referenčen vir (dolgotrajna opazovanja), potem

lahko določimo količine kot so: zamik v nastopu dogodka (npr. zapoznelo prebujanje narave spomladi, podaljšana sezona kmetovanja in premik glavne sezone za rast pridelkov v kasnejše mesece, prezgoden nastop hladnega obdobja in podobno), nadalje intenziteto in dolžino pojava ter nenazadnje, z več primerjavami lahko sklepamo o možnih posledicah in neposrednih učinkih. Tovrstna opazovanja so pomembna za različne vidike načrtovanja v prostoru ali zgolj dolgoročnega opazovanja spreminjanja naše fizične stvarnosti in so danes že sestavni del odgovornosti družbe do okolja.

Tisto, kar v samem bistvu družijo *periodična* opazovanja, je, da je časovna »premica« praviloma vezana na periodo in sezone opazovanega dogodka ali procesa. Če pa združimo in primerjamo več zaporednih period, dobimo vpogled v globalni *trend*. Na drugi strani so predmet našega zanimanja lahko informacije o globalnih spremembah stanja. Torej, nekakšna inventura celostnega stanja ob točno določenih točkah na dani časovni premici. V tem primeru opazujemo gibanje stanja ali *profil*.

2.3.2 Izbira satelitskih posnetkov

Pri izbiri posnetkov, ki bodo tvorili časovno vrsto podatkov za analizo sprememb, je treba upoštevati in poznati (Sabins, 1996; Coppin et al., 2004):

- kakšne so *lastnosti satelitskega opazovalnega sistema* oziroma programa snemanja: spremenljivost geometrije snemanja, čas ponovnega obiska, spektralna in radiometrična ter prostorska in časovna ločljivost podatkov,
- da imajo na vsebino podobe velik vpliv naslednji, med seboj tesno prepleteni, *naravni dejavniki*:
 - geografsko – podnebni vplivi lege opazovanega površja na Zemlji,
 - vpliv razgibanosti reliefa pri dani geometriji snemanja (Sonce – teren – senzor),
 - raznolikost sezonskih vplivov glede na različne kombinacije lege geografske širine in dolžine opazovanega območja.

Pogostejša ponovljivost snemanja površja omogoča večjo in boljšo izbiro posnetkov, ki so bili zajeti v t. i. optimalni sezoni (letnem času) za izbrano analizo in interpretacijo.

Pri oblikovanju časovne vrste torej poiščemo optimalen letni čas (ali letne čase) za opazovanje izbranega pojava (ločimo lahko vegetacijske študije, študije za potrebe kmetijstva, študije urbanega okolja). Optimalna sezona je odvisna od klimatskih in naravnih razmer na površju ter ni in ne more biti enaka (splošno privzeta) na različnih geografskih območjih.

Na območjih s sezonskimi obilnimi padavinami bodo, razumljivo, informacije o površju zajete v deževnem obdobju bistveno drugačne od tistih, zajetih v sušnem obdobju. Glavne sezone bi zato lahko razdelili na obdobje pred monsunom, med monsunom in po monsunu. Vpliv na zaznane lastnosti površja ima tako različna struktura ozračja (nasičenost, vodna para, vsebnost prašnih delcev, oblaki), kot tudi uskladiščenje prahu na površju, ki je v sušnem obdobju bistveno večje kot med in/ali po deževnem spiranju. Poleg tega se zemeljsko površje, kot preplet žive in nežive narave, na različne klimatske (temperaturne, padavinske) pogoje odziva tudi s spremembo oddanih spektralnih lastnosti oziroma spektralnega odboja površja.

Pri večji in zmerni geografski širini je shema letnih časov spet drugačna, razlike nastopijo med pomladnimi, poletnimi, jesenskimi in zimskimi posnetki, in sicer zaradi vsaj naslednjih razlogov: različnih podnebnih razmer, spreminjanja položaja sonca ter spreminjanja temperature, ki odločilno vpliva na letni cikel rasti vegetacije, pokritosti s snežnim pokrovom in podobnih posledic značilnosti posameznih letnih časov.

2.3.3 Izbira in vloga predobdelave posnetkov

Optični satelitski senzorji večje ločljivosti, kot so Landsat, SPOT, IKONOS ali QuickBird so pomemben vir informacij za raziskave okolja v kmetijstvu, gozdarstvu in urbanem razvoju (Jensen, 1996; Sabins, 1996). Povečano zanimanje za opazovanje Zemljinega površja, za pridobivanje kvantitativnih rezultatov iz vesoljskih instrumentov ter za združevanje in uporabo podatkov več senzorjev, pa narekuje:

- medsebojno položajno uskladitev posnetkov in položajno uskladitev z drugimi primerljivimi ali referenčnimi viri,
- odstranitev vpliva napak senzorja ter različne geometrije ključnih parametrov med snemanjem (zenitni kot sonca, položaj senzorja, razgibanost površja),
- pretvorbo informacij v »zapisu« svetlostnih vrednosti v fizikalne količine, kot sta odboj površja in temperatura površja ali druge standardizirane količine. Torej količine, ki jih lahko na površju tudi z drugimi meritvami določimo in tako med seboj primerjamo ali pa so po fizikalni vsebini standardizirane, absolutne.

S popravki satelitskih posnetkov, ki jih vpeljemo v fazi predobdelave posnetkov (glej poglavje 3), lahko pomembno izboljšamo rezultate analiz, in sicer v več pogledih (Richter, 2006; Richards, 1986; Liang, 2004):

- Odstranimo ali občutno zmanjšamo vpliv atmosfere pri prenosu energije in vpliv Sončeve osvetlitve površja.
- Scene zajete v različnem času in v različnih atmosferskih pogojih, lahko bolj zanesljivo primerjamo med seboj – v spremembah, ki jih bomo zaznali, bo teža dejanskih sprememb, ki so se zgodile na površju, večja kot vpliv razlike zaradi razlik v atmosferskih pogojih.
- Rezultati predmetno orientiranih algoritmov (kot sta klasifikacija in predmetno orientirana zaznava sprememb) so v primeru upoštevanja vidikov kalibracije in standardizacije podatkov občutno bolj natančni od bolj vsestranskih primerjav.
- Če obnovimo odboj površja lahko primerjamo tudi podatke iz spektralnih kanalov različnih senzorjev (npr. kanal 3 Landsat TM in kanal 2 SPOT). Slednje je dobrodošla prednost predvsem v primerih, ko na primer dopolnujemo časovno vrsto s podatki drugega senzorja, če so podatki prvega senzorja neuporabni zaradi prekritosti z oblaki ali iz drugih razlogov.
- Obnovljene podatke o odboju površja (pravih spektralnih lastnostih površja), ki jih pridobimo iz podatkov daljinskega zaznavanja, lahko primerjamo z meritvami opravljenimi na površju, torej, če so takšne meritve na razpolago, lahko preverimo in ovrednotimo lastne rezultate obnove energije površja.

Predobdelava podatkov daljinskega zaznavanja torej znatno pripomore k relevantnejšim rezultatom kvantitativnih časovnih analiz na podobah.

2.3.4 Določitev metodologije za določanje, analizo in interpretacijo sprememb

Na razpolago je precej tehnik, ki omogočajo študijo sprememb (glej poglavje 4). Od bolj enostavnih in vsestranskih do bolj zapletenih in predmetno orientiranih (Coppin et al., 2004). V osnovi pa gre za razmeroma enostaven princip primerjave para ali več parov stanj z uporabo različnih aritmetičnih operacij (odštevanje, deljenje). Na tej podlagi lahko opišemo odklone in razvoj – podamo t. i. trajektorijo dogajanja. Zavedati se moramo, da obravnavanje več spektralnih kanalov sicer podaja pestrejšo informacijo o lastnostih površja, je pa tudi res, da se precej poveča obseg in celovitost interpretacije. Samo tehniko za analizo sprememb bomo morali prilagoditi tudi izbrani celostni metodologiji za analizo sprememb. Saj so določene tehnike bolj robustne, druge pa bolj občutljive na preplet neželenih razlik med posnetki, ki še lahko ostanejo prisotne po predobdelavi. Pri izbiri metodologije za analizo in določanje sprememb torej velja upoštevati naslednje:

- Opredeliti, kaj želimo opazovati, kakšno bo ustrezno prostorsko merilo glede na lastnosti opazovanega pojava, kakšno frekvenco zaznave sprememb lahko pričakujemo (sezonske, letne, večletne).
- Izbrati gornjim opredelitvam vzajemno ustrezne podatke (časovna, prostorska, spektralna in radiometrična ločljivost), predvideti učinke naravnih pogojev (lastnosti ozračja, vlaga tal oziroma razporeditev padavin pred ali med snemanjem, značilnosti fenološkega cikla, stopnje v razvojnem ciklu opazovanega pojava).
- Zagotoviti primerljivost podatkov. To pomeni opredeliti in izvesti ustrezno predobdelavo in popravo podatkov: geometrični popravki in položajna uskladitev posnetkov, radiometrični popravki in/ ali radiometrična standardizacija.
- Glede na značilnosti doslej izbranih parametrov izbrati ustrezen algoritem za določanje sprememb. Sledi kartiranje sprememb, kvantitativna obdelava rezultatov ter interpretacija.
- Oceniti točnost in natančnost rezultatov (prenos napak iz vhodnih podatkov in uporabljenih postopkov) ali primerjati rezultate z referenčnim virom.

Določanje sprememb na površju s podatki daljinskega zaznavanja je po svojih značilnostih postopek modeliranja lastnosti (spreminjanja) fizične stvarnosti v času. Za predstavitev fizične stvarnosti z modeli pa vemo, da so poenostavitev in abstrakcija dejanskih dejavnikov in stanj (Šumrada, 2005). Vendar na tak način, da ohranimo ključne in pomembne gradnike in vidike obravnavnega problema. Rezultat modeliranja je zato zlasti podvržen samemu postopku in pa seveda dejstvu, da je določanje sprememb s podatki daljinskega zaznavanja po svoji naravi induktiven postopek.

3 PREDOBDELAVA SATELITSKIH POSNETKOV

Če želimo satelitske posnetke primerjati, moramo vzpostaviti in zagotoviti takšno stanje, da posnetke smatramo za primerljive. To pomeni, da se trudimo odpraviti vsa tista *neskladja in razlike* na posnetkih, ki lahko motijo primerjavo (tj. čimveč tistih variacij in šuma, ki niso spremembe stanja same). Vzroki, zaradi katerih pride do geometričnih nesoglasij ali semantičnih razlik med posnetki, v največji meri izhajajo iz razlik v nastajanju posnetkov. Torej iz okoliščin in lastnosti (letni čas, ura snemanja, meteorološko stanje, atmosferski pogoji, vegetacijska fenološka faza) – pogojev – zajema. Če želimo zaznavati in analizirati spremembe vsebine, moramo podobe sistematično popraviti in uskladiti, standardizirati. Z geometričnimi popravki dosežemo prostorsko ali položajno primerljivost, z radiometričnimi in spektralnimi popravki in transformacijami pa še vsebinsko primerljivost. Pričujoče poglavje opredeljuje vlogo, pomen in postopke posameznih faz priprave satelitskih posnetkov za potrebe analize sprememb.

Predobdelava združuje več različnih postopkov popravljanja posnetkov ter več različnih postopkov izboljšanja posnetkov. Postopki *popravljanja* se izvajajo zato, da odpravimo določena nesoglasja ali odstopanja, lahko rečemo tudi napake, ki nastanejo med zajemom in so v večji ali manjši meri vselej prisotne na posnetkih. Delimo jih na:

- popravki oziroma *kalibracija senzorja* (poglavje 3.2), ki je nekakšen notranji radiometrični popravek saj se nanaša na odpravljanje napak, ki nastanejo zaradi spremenljivosti v občutljivosti detektorjev (popravek instrumentarija),
- *geometrični popravki* (poglavje 3.3), ki se nanašajo na odpravljanje položajnih odstopanj in položajnega umeščanja posnetkov v koordinatni sistem ter
- *radiometrični popravki* (poglavje 3.4 do 3.6), ki jih obravnavamo kot zunanje radiometrične popravke (popravki, ki se nanašajo na zunanje okoliščine, zunanje parametre), s katerimi odpravljamo razlike v osvetlitvi scene, vplivu topografije in vplivu atmosferskih pogojev v času snemanja.

Predvsem v primerih časovne analize večjega števila posnetkov je poleg doslej naštetih popravkov praviloma treba opraviti še:

- *relativno normalizacijo ali standardizacijo*. S tem postopkom izbrano število posnetkov prilagodimo značilnostim poljubno izbranega, referenčnega posnetka (poglavje 3.7).

Postopki *izboljšave* podob zajemajo postopke transformacije vsebinskih vrednosti podob z določenim namenom, zato niso vselej obvezni, pač pa jih izvajamo predvsem takrat, ko želimo iz podob pridobiti ali bolj sežete ali neke dodatne informacije. Ker pri tem

spremenimo spektralne lastnosti podob in pridobimo radiometrično oziroma spektralno usmerjene lastnosti podob, skupino tovrstnih postopkov imenujemo:

- radiometrična izboljšava podob (poglavje 3.8). Mednje sodijo: izračun spektralnih indeksov, klasifikacija, Kauth-Thomasova transformacija, pretvorba v glavne komponente in podobno.

Predobdelava satelitskih posnetkov torej pomeni, da poiščemo takšno transformacijo posnetkov, da bodo točke/strukture/predmeti na enem posnetku v vseh pogledih kar najbolj ustrezale odgovarjajočim točkam/strukturam/predmetom na nekem drugem posnetku, obenem pa smo pri tem ohranili in zagotovili tudi prave vrednosti informacij elektromagnetne energije. Določitev optimalne transformacije posnetkov je tako odvisna predvsem od tipa in vrste *variacij*, *razlik* in *popačenj*, ki so prisotni na posnetkih ter od namena uporabe posnetkov.

Preden se posvetimo pregledu postopkov predobdelave posnetkov ali priprave podatkov za časovne vrste, posvetimo del pozornosti razumevanju lastnosti podatkov daljinskega zaznavanja (satelitski posnetki). Namen prvega razdelka je uvodno predstaviti razloge, kdaj izvajamo določene postopke predobdelave in zakaj (poglavje 3.1).

3.1 Lastnosti podatkov daljinskega zaznavanja v luči nuje po postopkih predobdelave

Naslednji primer naj pokaže, zakaj je za določene aplikacije treba opraviti več korakov predobdelave kot za druge. Nazoren primer so klasične fotografije. Ko gledamo fotografije, se nam njihova vsebina zdi, kot da bi bili naši očesi na mestu fotoaparata in usmerjeni v enaki smeri kot fotoaparati v trenutku snemanja. Fotografija se zdi skladna s stvarnostjo, ker podaja stvarnost po zakonih naravne vidnosti, torej kot stvarnost vidimo oziroma bi jo videli z lastnimi očmi. Ker pa je resnična stvarnost predmet tako nečesa vidnega kot marsičesa nevidnega, se bomo v splošnem strinjali, če rečemo, da gre pri fotografiji za posnetek stvarnosti, torej njen najbolj pristen, človeku naravno razumljiv približek. Nastala fotografija je torej zgolj relativna odslikava stvarnosti in danih pogojev trenutka in inštrumenta zajema.

Problem se razširi, če želimo premostiti relativnost situacije ali drugače, si zagotoviti ustrezno objektivnost obravnavane situacije in postopka pridobivanja posnetka stvarnosti. Jasno je, da če bi fotografijo iste scene ponovili ali z drugim fotoaparatom ali ob drugem času ali z drugimi (lahko tudi zgolj vnovičnimi) postopki razvijanja fotografije, bi za nove končne fotografije težko rekli, da so povsem enake. Vsebinska fotografij bi bila prepoznavna in tudi na moč podobna, vendar bi do razlik in odstopanj prišlo vsaj v kontrastu in barvni lestvici, če že spregledamo dejanske vsebinske spremembe, ki bi lahko bile posledica razlike v času zajema.

Podobno velja tudi za satelitsko zaznane posnetke stvarnosti, torej satelitske »fotografije« površja Zemlje. Tako kot v opisanem primeru fotografij iste scene, bi bili vsi identični satelitovi pogledi/posnetki (nemara zajeti ob različnih dnevih ali zaznani z različnimi senzorji) prepoznavni in si tudi na moč podobni, pa vendar ne objektivno identični, torej ne povsem enakih lastnosti. Uporabnik daljinsko zaznanih podatkov zato ne sme spregledati dejstva, da *digitalne vrednosti* (oziroma njihov svetlostni ton ali intenziteta), ki opisujejo zaznane signale elektromagnetne energije na posnetkih, kljub temu, da prikazujejo isto zemeljsko tarčo, niso

nujno tudi metrično enake. Torej drži, da so si na pogled lahko zelo podobne, niso pa zato tudi neposredno primerljive.

Daljinsko zaznane podobe so rezultat večstopenjskega postopka. Površje v danem trenutku oddaja elektromagnetno energijo. Odbiti del te energije je na poti od površja do detektorjev (senzorja) podvržen atmosferskemu sipanju, ki njen signal oslabi. Oslabljeni analogni signali, ki jih zazna senzor, so pretvorjeni (kvantificirani) v ustrezen digitaliziran zapis, nato pa so posredovani, prejeti in shranjeni v centru za obdelavo, kjer se obdelava nadaljuje. Četudi bi senzori delovali brez napak in bi bili postopki obdelave brez napak, dejavniki kot so: variacije v atmosferskih pogojih, vpadni kot senzorja, lega sonca, radiometrična občutljivost senzorja v času snemanja ter čas snemanja v dnevnu torej povzročajo, da se ista zemeljska tarča prikazuje drugače (z drugačnimi vrednostmi) na različnih posnetkih.

Cilj postopkov predobdelave posnetkov je torej pridobivanje od pogojev zajema čimbolj neodvisne in kvantitativno primerljive informacije o zemeljskem površju. V odpravljanje različnih razlik je vloženega veliko truda, ker pa zadeva ni preprosta, vsi postopki še danes niso splošno operativni. Kako je mogoče tovrstne razlike odstraniti, zmanjšati ali vsaj omiliti si podrobneje pogledjmo v nadaljevanju.

3.2 Kalibracija senzorja in točnost zaznave daljinsko zaznanih podatkov

Popravki, ki se nanašajo na odpravljanje razlik nastalih zaradi spremenljivosti občutljivosti detektorjev senzorja ali motenj v delovanju detektorjev, se imenujejo kalibracija senzorja. Kalibracija senzorja po svoji naravi sodi med radiometrične popravke, vendar se tudi več uporabnik s temi popravki praviloma ne srečuje. Ločeno od ostalih jih obravnavam iz dveh razlogov. Prvič, ker gre za povsem tehnično in tehnološko uravnavanje radiometričnih lastnosti instrumentarija. Ter drugič, ker tovrstni popravki sodijo med notranje radiometrične popravke (popravke instrumentarija), vsi ostali popravki pa med zunanje radiometrične popravke, ki se nanašajo na lastnosti naravnih okoliščin zajema posnetkov.

Splošen postopek, ki si prizadeva zagotoviti skladnost produktov daljinskega zaznavanja, poznamo pod imenom *kalibracija in točnost zaznave* (angl. calibration and validation ali Cal/Val). Pri tem gre za preverjanje mer ter oceno ustreznosti podatkov in postopka zajema. Postopek ne odpravlja vseh napak in motenj na daljinsko zaznanih podatkih, zato končni rezultat ni produkt, ki bi bil prost vseh napak. Poskrbi predvsem za odpravljanje notranjih neskladij – delovanja senzorja in ostalega instrumentarija. Uporabniku bi moral služiti kot zagotovilo za kakovost daljinsko zaznanih podatkov oziroma mu podati oceno, kako zanesljive so informacije in s tem, kako so podatki ustrezni za dano aplikacijo. Postopki kalibracije in točnosti zaznave senzorja se opravljajo v sprejemnih postajah (Optical Imaging Systems, 2006; NASA, 2006; Jensen, 1996).

Po definiciji delovne skupine za kalibracijo in veljavnost pri mednarodnem odboru za opazovalne satelite Zemlje (Working Group on Calibration and Validation of the international Committee on Earth Observation Satellites) je kalibracija postopek, s katerim se kvantitativno določi odziv senzorja na znane, nadzorovane *vhodne* signale (t. i. radiometrična kalibracija senzorja), točnost zaznave pa je postopek ugotavljanja kakovosti *izvedenih* podatkov danega sistema na podlagi neodvisnih sredstev (t. i. nadzor geofizikalne ustreznosti podatkov). Oba pojma v kombinaciji sta sinonim za celotno spremstvo algoritmov obdelave in infrastrukture,

ki se uporablja za pretvorbo surovih podatkov v točne in uporabne geofizikalne količine na površju Zemlje, in sicer tako, da so *pravilne in skladne z dejanskim stanjem na površju*.

Preverjanje delovanja sensorja poteka v luči kalibriranja odzivnosti sensorja na elektromagnetno valovanje, in sicer v funkciji (Optical Imaging Systems, 2006; NASA, 2006; Markham et al., 2003; Chander in Markham, 2003; 2007):

- valovne dolžine in/ali spektralnega kanala (spektralni odziv),
- intenzitete vhodnih signalov (radiometrični odziv),
- različnih lokacij v trenutnem vidnem polju in/ali celotne scene (prostorski odziv ali prostorska poenotenost),
- različnega integracijskega časa in leče ali nastavitve odprtine,
- neželenih signalov kot so zablodela svetloba ali prepuščanje iz drugih spektralnih kanalov.

Rezultat kalibracije sensorja je radiometrična in geometrična konsistentnost (poenotenje) po celotnem posnetku (Optical Imaging Systems, 2006; NASA, 2006). Cilj postopka točnosti zaznave je pridobiti končno oceno kakovosti oziroma oceno natančnosti satelitskega posnetka, kot ga uporabnik dobi v roke (npr. natančnost podobe je 95 % v ravninskih predelih in 90 % v hribovitih predelih ali podobno). Pomen kalibracije satelitskih posnetkov je za določene uporabniške aplikacije, kot je pridobivanje geofizikalnih in biofizikalnih informacij o površju Zemlje večji kot na primer za določanje rabe tal na izseku enega posnetka. Velik pomen ima tudi, če izvajamo analize, ki zahtevajo več satelitskih posnetkov, kjer moramo zagotoviti njihovo primerljivost. Situacije, za katere je še posebej pomembno, da je senzor točno kalibriran, so (Optical Imaging Systems, 2006; Liang, 2004; Jensen, 1996):

- opazovati zveznost informacije med različnimi sensorji,
- medsebojno primerjati podatke enega sensorja s podatki podobnega sensorja ali primerjati podatke, ko različni sensorji zajemajo podobne podatke,
- imeti integriteto v arhivu posnetkov,
- obnoviti posnetek v absolutno kvantitativno količino, kot je npr. odboj površja z vpeljavo atmosferskih popravkov na podlagi kod širjenja/prenosa elektromagnetne energije v atmosferi.

Ker sta kalibracija sensorja in ovrednotenje točnosti zaznave postopka s katerima se pri praktičnem delu s satelitskimi posnetki uporabniki ne srečujemo, sta pa temeljna za razumevanje lastnosti in razlik med podatki daljinskega zaznavanja, ju podrobneje predstavljam v Prilogi A1.

3.3 Odpravljanje geometričnih odstopanj

Geometrični popravki se nanašajo na napake v relativni postavitvi in razmestitvi pikslov na satelitskem posnetku. Do teh napak pride zaradi geometrije gledanja sensorja ter spremenljivosti terena (Jensen, 1996; Richards, 1986; Mather, 2004; Liang, 2004; Erdas Field Guide, 2005). Cilj geometričnih popravkov je izboljšati zaupanje in točnost relativnega prostorskega ali absolutnega položajnega vidika svetlostnih vrednosti satelitskega posnetka.

Vsi surovi satelitski posnetki vsebujejo geometrične napake. Temu problemu se ne moremo izogniti iz dveh razlogov. Prvič, do motenj in netočnosti prihaja zaradi tehnologije in načina zajema, saj je praktično nemogoče zagotoviti teoretsko optimalne pogoje za meritev, zajem podatkov. In drugič, trirazsežno površino Zemlje poskušamo prikazati kot dvorazsežno podobo, ravnino. Z geometričnimi popravki se trudimo podobe popraviti tako, da kar se da ustrezajo stvarnosti v metričnem smislu, tj. da so predmeti na podobi usklajeni z razmerji iz stvarnega sveta ali narave (velikost, oblika, smer, stik in drugi geometrijski parametri).

Geometrični popravki zato vključujejo postopke za (Richards, 1986; Oštir, 2006) odstranitev popačenja zaradi geometrije snemanja (satelit–Zemlja) in zaradi spreminjanja te geometrije (stabilnost tirnice, zasuk sensorja, vrtenje Zemlje). Večina teh napak je sistematičnih, torej predvidljivih. Te lahko odpravimo z natančnim modeliranjem gibanja sensorja ali platforme ter z upoštevanjem položaja sensorja glede na Zemeljsko površje (poglavje 3.3.1). Druge nepravilnosti so naključne in jih z modeliranjem ne moremo zadovoljivo odstraniti. Zato moramo podobe poravnati v izbrani koordinatni sistem (georeferencirati; poglavje 3.3.2) in jih po potrebi še geometrijsko registrirati (poravnati, poglavje 3.3.3).

3.3.1 Modeliranje geometrije snemanja

Ne glede na način (sistem) zajema pri daljinsko zaznanih podobah opazimo določena in prepoznavna geometrična popačenja. S postopki geometričnih korekcij običajno odpravljamo popačenja, ki so posledica (Jensen, 1996; Oštir, 2006, Toutin, 2004; Girard in Girard, 1999):

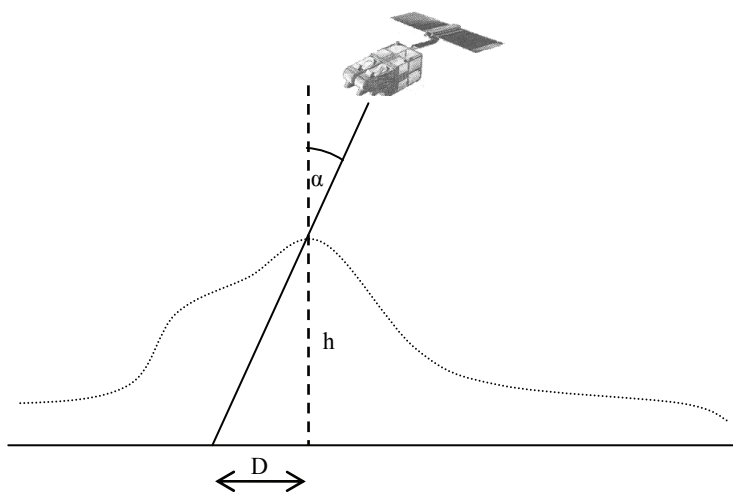
- optike sensorja (perspektiva),
- gibanja snemalnega sistema,
- gibanja in (ne)stabilnosti platforme (nosilca),
- višine, hitrosti in usmerjenosti (naklona) platforme,
- vpliva in oblike reliefa ter
- ukrivljenosti in vrtenja Zemlje.

Popačenja, ki so posledica optike sensorjev, gibanja snemalnega sistema ter nestabilnosti in usmerjenosti platforme, so bolj ali manj poznane. Zato se lahko tovrstne napake v večji meri odstrani ali pa njihov vpliv zadovoljivo zmanjša (Richards, 1986; Oštir, 2006). Odpravljanje omenjenih popačenj poteka s postopki modeliranja na t. i. surovih posnetkih na podlagi podatkov in parametrov, ki jih zagotavljajo sprejemne postaje. Pri tem gre za takšno predelavo posnetka, da bo prej surovi posnetek vzpostavljen v merilu (odpravi se razpotegnjenost ali stisnjenost, odpravi se ukrivljenost, zamiki med vrsticami; posnetek pridobi končno prostorsko ločljivost) in bo praviloma (ni pa nujno) najmanj grobo umeščen v nek koordinatni sistem, projekcijo. Posnetki, ki pokrivajo Slovenijo, in so na opisan način grobo umeščeni, so v projekciji UTM (33. cona) in z datumom oziroma elipsoidom WGS 84.

Mogoče je naročiti tudi že ortorektificirane posnetke, torej posnetke popravljene za vpliv reliefa in geometrijo snemanja, vendar so podatki o reliefu, s katerimi razpolagajo sprejemne postaje za posnetke srednje in visoke ločljivosti praviloma pregrobi. Pri popravkih za vpliv reliefa je bistvenega pomena kot snemanja. Satelitski sistemi, ki snemajo v zenitu ali skoraj zenitu (npr. Landsat), so dosti manj podvrženi učinkom topografije reliefa, kot sistemi z bočnim ali stranskim pogledom (npr. SPOT, če pogled sensorja zasukamo stran od navpičnice ali sistemi, ki opazujejo celotno Zemeljsko poloblo, npr. METEOSAT). Tudi vpliv paralakse

je pri snemalni višini opazovalnih satelitov Zemlje, ki snemajo v zenitu, praktično zanemarljiv (Girard in Girard, 1999).

Do paralakse sicer prihaja zaradi skupnih učinkov oblike reliefa in odmika od vertikalnega (pravokotnega) kota snemanja (slika 2). Paralaksa je sprememba lege opazovanega predmeta ali točke, projicirana s površja na ravnino, do katere pride vselej, kadar predmete na površju opazujemo pod incidenčnim kotom, tj. kotom, ki je izmaknjen iz prave vertikale (npr. položaj sensorja satelitskega sistema, kot α). Paralakso (horizontalni odmik D) računamo po enačbi: $D = \Delta h \cdot \operatorname{tg} \alpha$, kjer je Δh nadmorska višina (višinska razlika točke nad projekcijsko ravnino) in α vpadni kot.



Slika 2: Paralaksa – geometrična napaka, do katere pride zaradi razgibanosti terena in kota opazovanja.

Figure 2: Parallax – influence between relief and sensor position on geometric distortion.

Uporabniku, ki obdeluje posnetke zajete v zenitu ali skoraj zenitu, torej z vidika geometričnih popravkov v praksi preostaneta le naslednja koraka.

3.3.2 Georeferenciranje podob

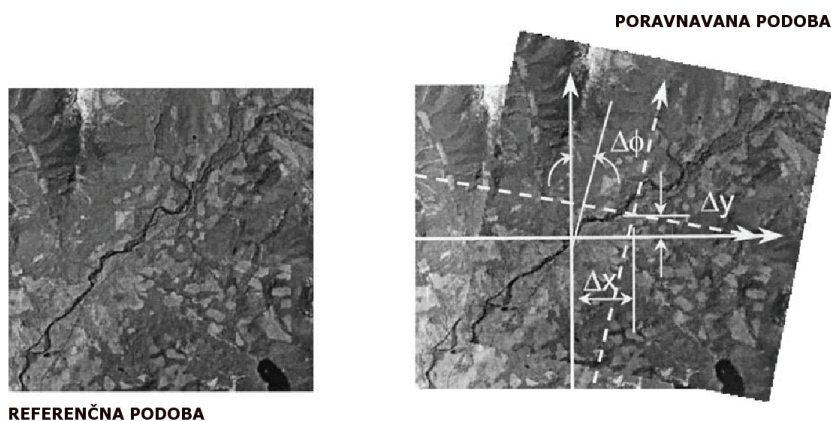
Postopek s katerim posnetek natančneje umestimo v izbrani lokalni koordinatni sistem se imenuje georeferenciranje (Richards, 1986; Oštir, 2006). Običajno je, da za to nalogo uporabimo zadosti natančne topografske karte, tako na primer za posnetke satelita Landsat, s 30 m prostorsko ločljivostjo že ustrezajo državne topografske karte v merilu 1 : 25 000 (TK 25). Seveda lahko uporabimo tudi natančnejše vire, na primer DOF 5. Rezultat je, za primer Slovenije, posnetek, ki je transformiran v UTM ali Merkatorjevo prečno projekcijo, koordinate pa so podane v Gauss-Krügerjevem koordinatnem sistemu (Besselov elipsoid).

Učinkovito georeferenciranje na topografsko karto je še vedno ročen in zato dolgotrajen postopek. Poteka tako, da točkam na posnetku poiščemo ustrezno (zadostno) število točk na referenčni topografski karti, tj. okoli 100 parov kontrolnih točk, ki pa morajo biti čim bolj enakomerno razporejene po posnetku. Izberemo ustrezno transformacijo (za posnetke Landsat so globalne transformacije, kot sta afina ali polinomska 1. oziroma 2. reda, povsem ustrezne), nato pa posnetek še prevzorčimo z izbranim interpolacijskim algoritmom (najbližjega soseda

ali z bilinearno interpolacijo). Tako dobljen georeferenciran posnetek je po položajnih lastnostih že primerljiv z drugimi prostorskimi podatki in zbirkami podatkov srednjih meril, na primer podatki Geodetske uprave Republike Slovenije.

3.3.3 Registracija podob

V primeru, ko želimo na satelitskih podobah opravljati kvantitativne meritve, medsebojne primerjave ali kakovostno interpretacijo, moramo poskrbeti tudi za popačenja, ki so posledica preslikave trirazsežne stvarnosti v ravninski prikaz (Brown, 1992; Jensen, 1996; Richards, 1986; Girard in Girard, 1999; Oštir, 2006). To so povečini neskladja, ki so posledica kota in časa snemanja ter vpliva oblike reliefa. Lahko gre za odpravljanje razmeroma zapletenih in po podobi neenakomerno in nelinearno razporejenih popačenj, lahko pa zgolj za določen zasuk in/ali premik. Tovrstna neskladja poskušamo odpraviti v postopku *registracije (poravnave) podob* ter s postopki *topografskih radiometričnih korekcij* (poglavje 4.4.2).



Slika 3: Primer poravnave podob – odpravljanje razlik v translaciji ($\Delta x, \Delta y$) in rotaciji ($\Delta \varphi$).

Figure 3: An example of image registration – translation ($\Delta x, \Delta y$) and rotation ($\Delta \varphi$) elimination.

Poravnava podob pomeni umestiti novo podobo v izbran koordinatni sistem, in sicer preko primerjave z že georeferencirano ali poravnano podobo (slika 3). Situacij in kombinacij poravnave dveh podob je zaradi številnih okoliščin (različni satelitski sistemi, različni senzorji, različen čas zajema) in namenov mnogo. Najpogosteje pa gre za (Brown, 1992; Fonseca in Manjunath, 1996; Toutin, 2004; Girard in Girard, 2001; Oštir, 2006) večsenzorske, veččasovne in večspektralne registracije. V tem pogledu se torej registracijske tehnike med seboj razlikujejo predvsem glede na vhodne podatke, tj. reševanje razlik med lastnostmi vhodnega para podob (referenčna, poravnavana). Vsem registracijskim tehnikam je skupen splošen postopek registracije. Ta zajema naslednje štiri korake (Brown, 1992; Fonseca in Manjunath, 1996):

- prepoznavanje značilnih predmetov,
- ujemanje predmetov,
- prostorska transformacija ter
- interpolacija ali prevzorčenje poravnane podobe.

Registracijske tehnike se razlikujejo predvsem po tehnikah prepoznavanja in ujemanja predmetov ter po uporabljenih transformacijah (Brown, 1992; Fonseca in Manjunath, 1996). To natančneje pomeni iz kakšnega prostora za iskanje značilnih predmetov izhajajo (tip značilnega predmeta; frekvenčna ali prostorska domena), kakšno mero uporabljajo za opredelitev podobnosti dveh točk, ki tvorita par kontrolnih točk (korelacija, odstopanje ipd.) ter s kakšno strategijo se ti koraki izvajajo (večstopenjsko, večločljivostno, iterativno). Najtežji korak registracije je ustvarjanje povezave med značilnimi točkami na eni in drugi podobi. Zaradi pomena pravih povezav je prav ujemanju posvečena največja pozornost. Iskanje transformacije je, ko enkrat določimo pare koordinat ali kontrolne točke, razmeroma enostavno in nesporno opravilo, podobno pa velja tudi za sklepno fazo prevzorčenja ali interpolacije. Posamezni koraki registracije podob so podrobneje predstavljeni v Prilogi A2.

Kadar se nameravamo ukvarjati z eno samo podobo ali le nekaj njimi, lahko podobe poravnavamo ročno. V primeru večjega števila poravnjav, je danes že smiselna in modra odločitev samodejna registracija, saj obstoječi algoritmi že dosegajo najmanj pikselo položajno natančnost (Veljanovski, 2003; Veljanovski in Oštir, 2004). Samodejno registracijo izvajamo z registracijskimi programi. Cilj vseh je čimbolje obvladovati lastnosti podobe, znati »prebrati« in »spustiti« moteče šume/variacije na podobi ter najti zadostno število dovolj kakovostnih kontrolnih točk.

Georeferenciranje je torej postopek s katerim posnetek umestimo v izbran koordinatni sistem. Registracija ali poravnava podob pa je postopek s katerim dva satelitska posnetka, preko ustrezne primerjave, natančno preložimo enega čez drugega. Pri tem dosežemo, da istim predmetom oziroma območjem na zemeljskem površju, ki so jih zaznali senzorji na obeh posnetkih, ustrezajo (konvencionalno) enake koordinate.

3.4 Odpravljanje radiometričnih odstopanj

Radiometrični popravki se nanašajo na odpravljanje variacij v svetlostnih tonih pikslov (intenziteti), ki jih ni povzročil sam objekt ali scena snemanja (Jensen, 1996; Richards, 1986; Liang, 2004; Oštir, 2006; Erdas Field Guide, 2005). Cilj radiometričnih popravkov daljinsko zaznanih podatkov je izboljšati zaupanje oziroma točnost magnitud svetlostnih vrednosti.

Radiometrična nestanovitnost je posledica razlik v osvetlitvi scene in šuma senzorjev. Zato je radiometrični popravek odvisen od vrste in lastnosti uporabljenega senzorja, nosilca za zajem podatkov in od atmosferskih pogojev med zajemom. Z radiometričnimi popravki skušamo (Richards, 1986; Richter, 2006):

- odpraviti razlike nastale zaradi spremenljivosti v občutljivosti detektorjev senzorja ali motenj v delovanju detektorjev (kalibracija senzorja),
- odpraviti preostale nepravilnosti v delovanju senzorja (odpravljanje prog, zapolnjevanje manjkajočih vrstic),
- odstraniti atmosferske in topografske vplive ter
- podatke pretvoriti v poznano absolutno odbojnost.

Z radiometrično korekcijo olajšamo in izboljšamo ter na splošno omogočimo kvantitativno primerjavo podatkov.

Radiometrični šum je lahko prisoten v obliki naključne porazdelitve v svetlostnih vrednostih ali pa variira bolj sistematično in vztraja tudi v prostorskih ali časovnih strukturah svetlostnih vrednosti (Liang, 2004). Nestanovitnost svetlostnih vrednosti, ki jo povzročajo tako šum sensorja (notranji dejavniki), kot šum okoljsko-atmosferskih (zunanjih) dejavnikov, se v postopku radiometričnih popravkov uravnovesi (normalizira) po podobi in med podobami, pri čemer se praviloma upoštevajo lastnosti pokrovnosti površja, lastnosti posameznih spektralnih kanalov (relativna normalizacija) ter lastnosti prenosa elektromagnetne energije skozi ozračje. Radiometrične popravke izvajamo tudi v absolutnem smislu – za obnovo energijskih oziroma spektralnih lastnosti površja (radianca, spektralni odboj, albedo ali temperatura površja). V poglavjih 3.5 do 3.7 sledijo teoretične osnove atmosferskih popravkov ter pregled pomembnejših metod in pristopov iz skupin radiometričnih popravkov.

3.5 Atmosferski popravki

Z atmosferskimi korekcijami satelitske posnetke popravljamo za vpliv interakcije med prejeta in odbito energijo ter sestavo Zemljine atmosfere.

Spektralno območje med 0,4 in 2,5 μm , območje v katerem satelitski sensorji zaznavajo in snemajo Zemeljsko površje, je močno podvrženo vplivom pogojev v ozračju (atmosferi) ter zenitnemu kotu Sonca (Richter, 2006; Liang, 2004; Oštir, 2006). Atmosferski učinki lahko »prizadenejo« daljinsko zaznane posnetke na več načinov. Sipanje v splošnem povzroča, da se vpadni svetlobi pri potovanju skozi ozračje spremeni smer, absorpcija v ozračju pa signal svetlobe oslabi. Poglavitni atmosferski elementi, kot so kisik, ogljikov dioksid, ozon in vodni hlapi oziroma vodna para (še posebej slednja dva) povzročajo, da se elektromagnetna energija pri izbranih valovnih dolžinah bolj ali manj sipa ali absorbira.

Na molekularni ravni atmosferski plini povzročajo *Rayleighovo sipanje* (tudi molekularno sipanje), ki polagoma oziroma stopnjujoče učinkuje na krajše valovne dolžine (Richards, 1986; Richter, 2006; Liang, 2004). Takšno sipanje se pojavi, kadar je valovna dolžina sipane svetlobe mnogo večja od dimenzije sipalca, v našem primeru so to molekule v zraku. Lord Rayleigh je prvi zapisal zvezo, ki pravi, da je intenziteta sipane svetlobe obratno sorazmerna s četrto potenco valovne dolžine (Electromagnetic scattering, 2006; Derganc in Zupan, 2006; Mezgec, 2006). Ta zveza nam pojasni zakaj je nebo modro, modri del spektra sončne svetlobe se v atmosferi bolj siplje kot druge barve. Za Rayleighovo sipanje je značilno, da se svetloba s krajšo valovno dolžino razprši precej bolj od tiste z daljšo. Rayleighovo sipanje povzročajo predvsem molekule dušika in kisika v ozračju. Koefficient molekularnega sipanja σ_{Rayleigh} oziroma jakost sipanja je torej zelo odvisna od valovne dolžine λ :

$$\sigma_{\text{Rayleigh}} = \frac{c}{\lambda^4} (1 + \cos^2 \theta), \quad (1)$$

kjer θ predstavlja kot med vpadnim in sipanim snopom svetlobe, c pa je gostota energijskega toka vpadle svetlobe. Sipani snop je porazdeljen simetrično glede na center sipanja. Molekularno sipanje je zaradi visoke, četrte potence valovne dolžine v imenovalcu enačbe 1 zanemarljivo v spektralnem območju, kjer so valovne dolžine večje od 1 μm .

Aerosoli, plinaste zmesi sestavljene iz trdnih ali tekočih delcev, so glavni povzročitelji meglic in v veliki meri prispevajo k od valovne dolžine neodvisnem *Miejevemu sipanju* (tudi

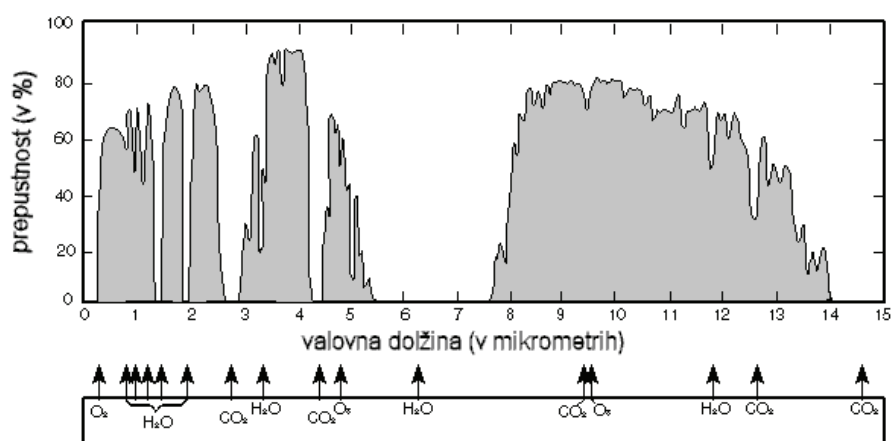
aerosolsko sipanje). Da je sipanje neodvisno od valovne dolžine pomeni, da na vse valovne dolžine učinkuje enako močno. Jakost aerosolskega sipanja je zelo odvisna od vrste aerosolov oziroma od indeksa refrakcije in porazdelitve velikosti delcev (Richter, 2006; Liang, 2004). Odvisnost med aerosolskim sipanjem in valovno dolžino kaže enačba 2 (Liang, 2004; Electromagnetic scattering, 2006; Derganc in Zupan, 2006; Mezgec, 2006):

$$\sigma_{Mie} = \frac{c}{\lambda^n} \quad (2)$$

Pri čemer n zavzame vrednost v intervalu med 0,8 in 1,5. Aerosolsko sipanje se torej počasi zmanjšuje z večanjem valovne dolžine. Sipan snop ima izrazit vrh v smeri sipanja.

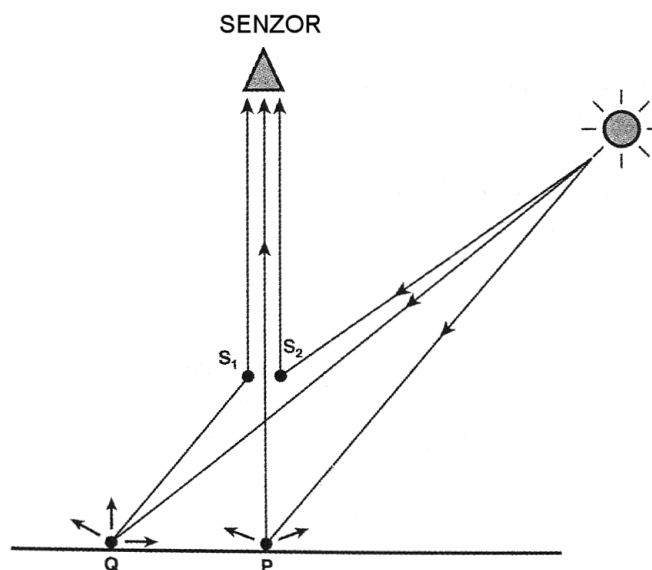
Kot vidimo, je atmosferski prispevek, zajet v vrednostih daljinsko zaznane podobe lahko kar znaten (Eastman, 2006). Vemo, da vrednost, ki je zapisana v danem pikslu (majhno območje v naravi), ni popoln zapis dejanskega odboja te lokacije, in sicer zaradi najmanj dveh vzrokov. Jakost signala, ki se od površja odbije, je na poti do senzorja podvržena atmosferski absorpciji, ki signal oslabi, smer potovanja odbitega signala pa atmosferskemu sipanju in lomu. Drugi vzrok je že omenjeno sipanje v atmosferi, ki lahko zmanjša ali zaduši del energije, ki osvetljuje površje. To pomeni, da je signal dvakrat bolj ali manj oslavljen.

Tudi *atmosferska absorpcija* je odvisna od molekul in aerosolov (Richter, 2006; Liang, 2004; Richards, 1986). Molekularna absorpcija, ki jo v glavnem povzročajo ogljikov dioksid, ozon in vodna para v ozračju, je v posameznih delih optičnega spektra zelo močna. Absorpcija valovanja (prepuščanje) v posameznih delih spektra tudi določa, katere dele spektra lahko uporabimo za daljinsko zaznavanje. Dele spektra, na katere ozračje ne vpliva pretirano, imenujemo jih atmosferska ali prepustnostna okna, lahko uporabimo pri daljinskem zaznavanju (Jensen, 1996; Oštir, 2006). Slika 4 prikazuje prepustnost elektromagnetnega valovanja (svetlobe) skozi atmosfero v območju vidnega in infrardečega spektra med 0,4 in 15 μm .



Slika 4: Prepustnost atmosfere v odvisnosti od valovne dolžine. Vidimo območja z visoko (atmosferska okna) in nizko prepustnostjo ter valovne dolžine in molekule odgovorne za absorpcijo (po: NASA, 2006).

Figure 4: Atmospheric transmittance in the 0 and 15 μm spectral region and the molecules responsible for absorption (after NASA, 2006).



Slika 5: Poenostavljena shema komponent signala, ki ga prejme senzor nad atmosfero (vir: Mather, 2004).

Figure 5: Illustration of atmospheric radiative transfer and signal components that sensor receives (source: Mather, 2004).

Senzor bi v idealnem primeru (brez atmosferskih vplivov) zaznal valovanje, ki ga oddaja točka na površju Zemlje pod njim (Richards, 1986; Mather, 2004; Liang, 2004). Vendar takšnih pogojev ni, zato v t. i. vidno polje senzorja (angl. instantaneus field of view, IFOV) prispe (glej sliko 5) tudi del vpadne elektromagnetne energije, ki se v atmosferi (S_2) sipa in preusmeri proti senzorju ne da bi prešla atmosfero – imenuje se *atmosferski odboj* (angl. atmospheric path radiance). Senzor poleg te lahko zaznava tudi del energije, ki se odbije od sosednjih točk, npr. točke Q, in se v atmosferi (S_1) sipa tako, da jo senzor zazna kot, da bi energija prihajala iz točke P. Takšno sipano energijo sosednjih točk oziroma predmetov imenujmo *okoljski odboj* (angl. environmental radiance), povzroča pa t. i. učinek »sosedstva« oziroma bližnje okolice (angl. adjacency effect).

Na zaznano elektromagnetno energijo (zaznane spektralne lastnosti površja) torej vplivajo atmosfersko sipanje, absorpcija in lom ter razlike v osvetlitvi in geometriji gledanja, naklon površja in razporeditev topografskih elementov površja, ki jih vse obravnavamo v postopkih atmosferskih in topografskih popravkov. Kako in za koliko je nek signal oslavljen je torej odvisno od atmosferskih in meteoroloških pogojev (čistost, nasičenost ozračja: aerosoli, vodna para) in valovne dolžine signala ter sestave, lastnosti in stanja površja Zemlje (torej kako predmeti odbijajo, absorbirajo in prepuščajo energijo).

Z enačbo lahko situacijo opredelimo takole (Mather, 2004):

$$L_S = H_{tot} \rho T + L_p, \quad (3)$$

kjer je L_s odboj, ki ga zazna senzor nad atmosfero, H_{tot} celotna sevana energija v posameznem spektralnem pasu, ρ odboj od tarče (razmerje med prejeto in oddano energijo; planetarni albedo), T atmosferska prepustnost in L_p atmosferski odboj.

Prvi člen na desni strani enačbe je energija oziroma odboj, ki zapusti površje. Pri tem je razmerje med prejeto in oddano energijo ρ odvisno od lastnosti predmeta (kolikšen del prejete energije predmet absorbira in koliko je odda, odbije) ter stanja (prepustnosti) atmosfere. Velikost drugega člena, atmosferski odboj L_p , je odvisna od valovne dolžine, saj sipanje narašča z manjšanjem valovne dolžine.

Različni spektralni kanali vsebujejo različno količino atmosferskega odboja. Konkretnije, (modro-zeleni) spektralni kanal 1 senzorja Landsat TM ali ETM+ bo praviloma imel večjo komponento atmosferskega odboja kot (zeleni) spektralni kanal 2 in tako naprej. Velja, da je atmosferski odboj prisoten predvsem v kanalih vidnega dela spektra, v infrardečih kanalih pa je praktično zanemarljiv (Liang, 2004). Atmosferski odboj je tudi edina komponenta, ki ni v odvisnosti z lastnostmi površja Zemlje.

Učinek sosedstva na satelitskih posnetkih povzroča zmanjšanje kontrasta in določeno zabrisanost (Liang, 2004). Na primer, če je neko temno območje obkroženo z zelo svetlim območjem, se bo bolj oddaljenemu opazovalcu temen predmet zdel svetlejši, kot opazovalcu, ki je predmetu blizu. Učinek sosedstva je na podobah srednje (npr. Landsat, SPOT) in visoke (npr. IKONOS, QuickBird) ločljivosti bolj prisoten kot na podobah nizke ločljivosti (npr. AVHRR, ki ima 1.1 km ločljivost).

Atmosferski vplivi spremenijo spektralno informacijo o površju Zemlje in zmanjšujejo prostorsko ločljivost senzorjev. Atmosfersko korekcijo (obnovo spektralnih lastnosti površja) je zaradi fizikalnih lastnosti elektromagnetnega valovanja treba opraviti v treh primerih (Mather, 2004):

- Prvič, če nameravamo večspektralno podobo transformirati v novo podobo s postopkom kombinacije spektralnih kanalov (z izračuni raznih spektralnih indeksov). Ker učinki sipanja naraščajo z manjšanjem valovne dolžine valovanja, bi pri kombinaciji spektralnih kanalov dolgo in kratko valovne energije brez opravljene atmosferske korekcije zagrešili določeno napako.
- Drugič, če želimo podatke daljinskega zaznavanja primerjati s fizičnimi lastnostmi površja, moramo oceniti in odstraniti komponento atmosferskih vplivov, ki je prisotna v zaznanem signalu. Tak primer je proučevanje oceanov, saj je odboj vode (ki vsebuje informacije o bioloških in sedimentnih materialih zgornjih slojev morja) majhen v primerjavi s prispevkom atmosferskih vplivov.
- Tretjič, če želimo primerjati stanje površja v časovnem trenutku t_1 s stanjem v časovnem trenutku t_2 . Zaradi različnih stanj atmosfere med nastankom enega in drugega posnetka, je prav tako treba podatke popraviti za vpliv atmosferskega šuma, sicer neposredna primerjava ni objektivna.

Atmosfera je kompleksen in dinamičen sistem. Z obsegom in celovitostjo interakcije med atmosfero in elektromagnetnim valovanjem se ukvarja posebna veja fizike, atmosferska fizika. Na tem mestu in v nadaljevanju pa se bomo omejili zlasti na tehnike atmosferske

korekcije, ki so bile razvite za reševanje problema ocene atmosferskih učinkov v optičnih večspektralnih satelitskih podobah, to je v območju elektromagnetnega spektra 0,4–2,4 μm .

Popravki učinkov sipanja molekul in absorpcije EM energije zaradi ozona, kisika in drugih plinov so razmeroma enostavni, saj so koncentracije teh elementov razmeroma stabilne tako v času kot v prostoru. Bistveno težja naloga je oceniti prostorsko razporeditev aerosolov in vodne pare neposredno s podob (Liang, 2004), torej mimo fizikalnih meritev v ozračju. Atmosferske korekcije delimo v dve večji skupini (Jensen, 1996):

- absolutne atmosferske korekcije in
- relativne atmosferske korekcije.

Absolutne atmosferske korekcije so tiste, ki uporabljajo numerične modele radiacijskega prenosa elektromagnetne energije skozi ozračje (poglavje 4.4.1.1). Relativne atmosferske korekcija pa so tiste, ki posnetek obnavljajo na podlagi prilagajanja posameznega spektralnega kanala v dani podobi (npr. substrakcija vrednosti temnih predmetov v vsakem spektralnem kanalu) ali tiste, ki dane spektralne kanale posnetka (ali več njih) normalizirajo glede na vrednosti izbranega referenčnega posnetka (poglavje 4.4.1.2).

Atmosferski popravki običajno zajemajo dva koraka:

- ocena atmosferskih parametrov in
- obnova energije površja (ali obnova odbojnih lastnosti površja).

Poglejmo najprej ozadje in primere zahtevnejših metod, nato pa še manj zahtevnih.

3.5.1 Modeliranje atmosferskih pogojev in prenosa energije

Metode modeliranja atmosferskih pogojev skušajo oceniti odboj piksla (tarče), ki doseže senzor. Običajno se te metode uporabljajo skupaj s postopki za odpravljanje vpliva osvetlitve in kalibracije senzorja (Liang, 2004). Kompleksnost prenosa energije v stiku z atmosfero modelirajo nekateri sistemi, ki jih poznamo pod skupnim imenom *numerični modeli prenosa energije* (angl. numerical radiative transfer models). Najbolj poznana računalniška orodja in s tem numerični modeli za atmosfersko korekcijo satelitskih posnetkov so: LOWTRAN, MODTRAN (Berk et al., 1989; Berk et al., 1998), ATREM, 5S/6S (Vermote et al., 1997) in ATCOR (deloma uporablja numerični model MODTRAN; Richter, 2006). Skupno vsem je to, da prenos energije določajo na podlagi ene od različic dvosmerne funkcije porazdelitve odboja (angl. bidirectional reflectance distribution function, BRDF) ter da za njeno določitev uporabljajo številne podatke o stanju atmosfere v času snemanja (glej tudi Prilogo A3).

Zmožnosti teh modelov so sicer velike, dejanska uporaba pa je omejena, saj moramo poznati in razpolagati s precej podatki o stanju atmosfere v času zajema satelitskega posnetka (na primer: razporeditev in vrsta aerosolov, količina vodne pare, prepustnost ali vidljivost v atmosferi in podobno). Zbiranje tovrstnih podatkov je zahtevno, predvsem pa drago, zato se v modelih običajno uporablja približke stanja, t. i. atmosferske standarde. Za približke atmosfere (kjer so zajeti podatki o višinskem profilu zračnega pritiska, temperaturi zraka, vsebnosti vodne pare, koncentraciji ozona) so na primer na voljo: atmosferske značilnosti poletja na srednji geografski širini, zime na srednji geografski širini, značilnosti tropske atmosfere, jesenske atmosfere in standardne atmosfere ZDA 1976. Za približke vrste ali tipa

aerosolov pa na primer: ruralen tip aerosolov, urban, puščavski, morski in podobno. Uporaba takšnih približkov razumljivo zmanjšuje točnost rezultatov, in ker praviloma ne poznamo dejanskih atmosferskih razmer pri zajemu, tudi ocene (ne)natančnosti zaradi uporabe atmosferskega približka ne moremo določiti. Problem uporabe tovrstnih modelov nastane tudi pri obdelavi arhivskih (starejših) posnetkov, saj podrobnejših podatkov o atmosferskih pogojih za desetletje in več nazaj pogosto ni na razpolago.

Slednje in pa dejstvo, da so tovrstni programi cenovno težje dostopni, je razlog, da v praktičnem delu disertacije atmosferskih popravkov na podlagi računanja radiacijskega prenosa energije skozi ozračje nisem izpeljala. Ker je teoretično ozadje vseeno pomembno za razumevanje lastnosti satelitskih posnetkov podajam osnovna izhodišča o dvosmerni funkciji porazdelitve odboja v Prilogi A3.

3.5.2 Izračuni na osnovi podatkov v podobi

Ravno zaradi kompleksnosti numeričnih modelov prenosa energije in težav z razpolaganjem podatkov za izračun dvosmerne funkcije porazdelitve odboja, so se razmahnile raziskave odstranjevanja oziroma zmanjševanja atmosferskih vplivov s preprostejšimi izračuni na osnovi podatkov v sami podobi (Liang, 2004). Metode skušajo na različne načine določiti atmosferske učinke v posameznih spektralnih kanalih, upoštevaje osnovne lastnosti prenosa energije v posameznih spektralnih območjih. V nadaljevanju se osredotočam le na reprezentativne metode za korekcijo multispektralnih podob zajetih v zenitu (ali nekaj stopinj iz zenita). Korekcije podob zajetih z večjih ali več kotov v nalogi ne obravnavam, ker niso uporabne za podatke s katerimi razpolagam (posnetki Landsat).

V literaturi (Liang, 2004; Mather, 2004; Jensen, 1996) in v aplikacijah za določanje sprememb na površju se najpogosteje navajajo naslednje metode atmosferskih popravkov:

- metoda nespremenljivega predmeta (angl. invariant-object method),
- metoda ujemanja histograma (angl. histogram matching method)
- metoda temnega predmeta (angl. dark-object saturation method)
- metoda zmanjšanja kontrasta (angl. contrast reduction method)
- metoda ujemanja gruč (angl. cluster matching method).

Glavne principe pridobivanja koeficientov za atmosferske popravke pa lahko opišemo z naslednjimi tremi postopki:

- princip minimuma v histogramu,
- princip z uporabo linearne regresije ter
- Chavezova metoda vidljivosti.

Vsi trije odpravljajo predvsem vpliv *atmosferskega odboja* v posameznih spektralnih pasovih. Poglejmo najprej temeljne principe, nato pa še posamezne tehnike atmosferskih korekcij.

Princip minimuma histograma

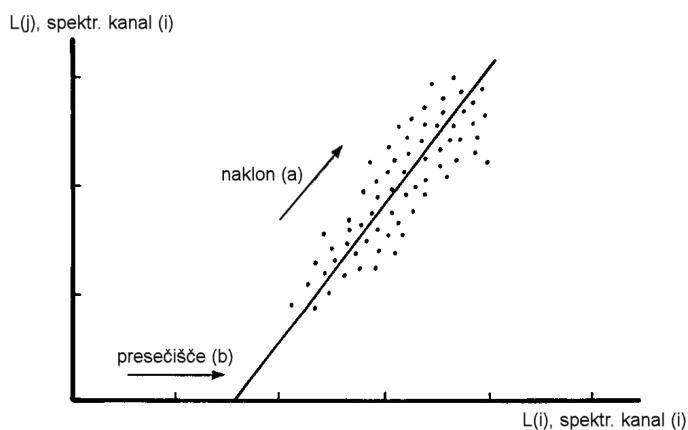
Izračun koeficientov popravkov temelji na identifikaciji odbojnih vrednosti temnih predmetov na podobi (to so lahko večje vodne površine čiste vode, dolge in globoke sence, območja temnih kamnin) v pogojih čistega ozračja, torej v pogojih, ko je atmosfersko sipanje zelo

majhno. Predpostavka tega principa je, da so odbojne vrednosti temnih predmetov v primeru, ko je ozračje čisto, zelo majhne ali skoraj enake nič, zato je lahko večje odbojne vrednosti temnih predmetov pripišemo posledici atmosferskega sipanja (Liang, 2004; Oštir, 2006). Določiti je torej treba najmanjše svetlostne vrednosti v vsakem posameznem spektralnem kanalu in jih odšteti od podobe. Atmosfersko sipanje moramo opazovati in določiti za vsak kanal posebej zato, ker je sipanje odvisno od valovne dolžine in so najmanjše vrednosti različne od kanala do kanala.

Pri posnetkih Landsat TM ali ETM+ to pomeni, da bodo najnižje vrednosti takih območij zelo blizu nič v infrardečih (IR) spektralnih kanalih, kot je spektralni kanal 4 ter nekoliko višje v drugih spektralnih kanalih (1–3). Če bi si izrisali histograme spektralnih pasov, bi hitro opazili, kako se začetne vrednosti v posameznih spektralnih pasovih približujejo izhodišču, vrednosti nič. Najnižja vrednost v histogramu (ali neka kombinacija najnižjih vrednosti) spektralnega kanala je prvi približek atmosferskega odboja za obravnavani kanal. Te vrednosti torej odštejemo od podobe za vsak spektralni kanal posebej. Ker pa je atmosferski odboj v srednje IR kanalih, kot sta kanal 5 in 7, že zelo zmanjšan, teh (za učinek atmosferskega odboja) praviloma ni treba popravljati.

Princip z uporabo linearne regresije

Tudi regresijska metoda temelji na identifikaciji odbojnih vrednosti temnih predmetov na podobi. Za takšna območja izračunamo regresijske premice (linearna regresija) med Landsat TM ali ETM+ 4 (tj. bližnja IR) ter ostalimi spektralnimi kanali iz vidnega in bližnje IR spektra. V dobljenih enačbah regresijske premice $Y_i = a \cdot X_i + b$ nato koeficient a (tj. začetna vrednost) na osi x predstavlja oceno prispevka atmosferskega odboja, in sicer za obravnavani spektralni kanal i (slika 6). Te vrednosti a_i , $i=1, 2$ in 3 nato odštejemo od ustreznih spektralnih kanalov podobe.



Slika 6: Princip uporabe linearne regresije za potrebe atmosferskih popravkov.

Figure 6: Linear regression principle in the atmospheric correction algorithm.

Chavezova metoda vidljivosti

Chavezova metoda vidljivosti (Chavez, 1988) prav tako temelji na lastnostih porazdelitve najnižjih vrednosti v histogramih spektralnih kanalov, vendar izhaja iz predpostavke, da je Rayleighovo sipanje obratno sorazmerno z n -to potenco valovne dolžine, pri čemer je

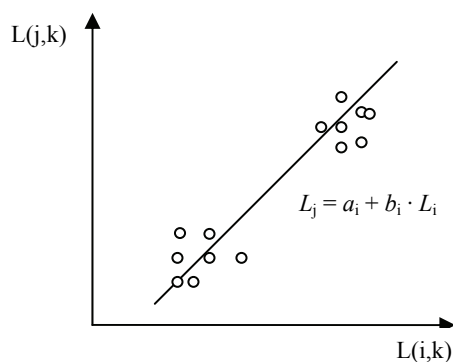
vrednost n odvisna od atmosferske motnosti (angl. turbidity). Določi več modelov, ki so ustrezno povezani s faktorjem n , in sicer od modela za »čisto ozračje, dobra vidljivost« do modela za »megleno ozračje, slaba vidljivost«. Začetna vrednost za vidljivost je pridobljena iz enega od kratkovalovnih kanalov, nato pa so faktorji vidljivosti za ostale spektralne kanale izračunani analitično na podlagi odnosa Rayleighovega sipanja. Metoda zahteva predhodno pretvorbo numeričnih (svetlostnih) vrednosti na podobi v odbojne vrednosti (angl. reflectance). Chavezova metoda vidljivosti je podrobneje predstavljena tudi v poglavju 5.4.1.

3.5.2.1 Metoda nespremenljivega predmeta

Metoda nespremenljivega predmeta predpostavlja, da je na podobi mogoče določiti skupino pikselov, katerih odboj se s časom ne spreminja zelo. Nato se določi linearen odnos (regresija) med predvidoma nespremenljivima predmetoma ali več njih iz ene in druge (zajete v drugem času) podobe. Za referenčno podobo je treba izbrati najbolj čisto podobo. Kadar določamo linearen odnos z referenčno podobo več podobam postopku rečemo tudi *relativna normalizacija* niza podob. Če pa bi poznali dejanske odbojne vrednosti nespremenljivega predmeta (npr. z meritvami na površju), bi bil postopek tudi *absolutna korekcija*. Ker so nespremenljivi predmeti lahko katerikoli deli površja, za katere vemo, da imajo stanovitven odboj, se metoda smatra za atmosfersko korekcijo, ki temelji na fizikalni osnovi.

Če imamo torej N t. i. nespremenljivih pikselov, ki smo jih identificirali na vseh M podobah, zajetih v različnem času, in izberemo za referenčno podobo J , lahko vse ostale podobe normaliziramo na podobo J z uporabo linearne regresije na teh nespremenljivih pikslih (slika 7). Naj L_j predstavlja radiance referenčne podobe J , in L_i naj predstavlja radiance ostalih podob, potem odnose lahko zapišemo:

$$L_j^k = a_i^k + b_i^k L_i^k. \quad (4)$$



Slika 7: Princip normalizacije posnetka z uporabo linearne regresije na nespremenljivih predmetih.

Figure 7: Linear regression analysis in the invariant object atmospheric correction algorithm.

Enačba 4 predstavlja regresijsko funkcijo za vsak spektralni kanal k , koeficienta a in b pa uporabimo za normalizacijo vseh ostalih pikselov spektralnega kanala k za vsako podobo i .

Pri tem presečišče ali prištevna komponenta (a_i^k) v regresijski enačbi predstavlja in uravnava razliko v atmosferskem odboju med podobama, naklon regresijske premice (b_i^k) pa uravnava razlike v kalibraciji senzorja, vpadnem kotu sonca, razdalji med Soncem in Zemljo, atmosferskih pogojih in geometrijo snemanja senzor – površje – satelit med dvema datumoma posnetkov.

Za učinkovitost korekcije je pomembno, da izberemo ustrezen nespremenljiv predmet, kar v prvi vrsti pomeni, da mora skupina pikselov zajeti dovoljšen razpon v svetlostnih vrednostih, v vseh kanalih. Če bomo izbrali ali večinoma temne piksele ali večinoma svetle piksele, skupine pikselov ne bodo izkazovale statistično zanesljive linerane regresije in linearna transformacija bi v tem primeru vpeljala velike napake. Ustrezni nespremenljivi predmeti so tisti, ki zadostijo naslednjim kriterijem (Schott et al., 1988; Callahan, 2003; Eckhardt et al., 1990):

- so na neki srednji (povprečni) nadmorski višini, kot je območje na posnetku (da bolje predstavimo atmosferske pogoje po celotni sceni),
- so na razmeroma ravnem terenu (da zmanjšamo vpliv razlik zaradi azimuta sonca),
- niso prekrita z vegetacijo (saj se vegetacija hitro odziva na sezonske spremembe in razne okoljske strese, s tem pa tudi njen spektralni odziv).

Če slednje upoštevamo, ugotovimo, da so najpogosteje izbrani nespremenljivi predmeti urbane strukture (ceste, večje zgradbe) ali puščavska in peščena območja. Tarče izberemo na podlagi identifikacije pikselov, ki se kažejo kot temni v bližnje IR-rdečem razmerju (E/TM 4/3) in svetli v srednje IR spektralnem kanalu (E/TM 7).

3.5.2.2 Metoda ujemanja histograma

Metoda ujemanja histograma sloni na predpostavki, da so histogrami odboja površja na območjih čistega ozračja (brez oblakov in meglic) in megličastih (angl. haze) območjih enaki. Najprej je treba določiti območja čistega ozračja in območja z meglicami, nato pa histograme megličastih območij prestaviti tako, da se ujemajo s histogrami odboja na območjih s čistim ozračjem (Richter, 1996; Richter, 2006; Liang, 2004). Postopek je naslednji.

- Podobo razdelimo na $N_x \times N_y$ sektorjev.
- Izberemo tip referenčne tarče s poznano referenco (npr. temna voda ali gosta vegetacija). Z interaktivnim spreminjanjem mejne vrednosti (angl. thresholding) določamo ciljne piksele, določamo pa tudi optično globino (intenzivnost svetlostnih vrednosti) v skupini teh pikselov.
- Določimo piksele meglic in piksele oblakov z interaktivno uporabo Kauth-Thomasove transformacije.
- Za ustrezajoče si sektorje izvedemo ujemanje histogramov megličastih območij na območja s čistim ozračjem, s tem določimo tudi atmosfersko vidljivost v posameznih sektorjih.
- Obnovimo površinski odboj, tako da uporabimo povprečno atmosfersko vidljivost v vsakem sektorju.

To metodo uporablja program za obdelavo satelitskih posnetkov Erdas Imagine, njena glavna omejitev pa je predpostavka, da je histogram odboja v megličastem območju enak histogramu odboja v območju s čistim ozračjem. Ta slepa predpostavka v večini primerov ne drži, tudi

tedaj ne, ko imamo v megličastih območjih in območjih čistega ozračja enak pokrajinski tip. Poleg tega uporaba Kauth-Thomasove transformacije za določitev megličastih območij ni dovolj robustna, da bi vselej dala rezultate.

3.5.2.3 Metoda temnega predmeta

Ena najstarejših in najpogosteje uporabljenih metod atmosferskih korekcij je metoda temnega predmeta. Sloni na predpostavki, da na podobi lahko najdemo skupino pikslov (predmet), katerih odboj s površja je zanemarljivo majhen (npr. popolna senca). Ko tak predmet identificiramo, uporabimo princip minimuma histograma. Predpostavka o praktično ničnem odboju se ni izkazala za realno, zato je bila metoda kasneje nadgrajena (Chavez, 1988; 1989; 1996) s predpostavko o vsaj minimalnem odboju (vsaj 1 %). Metoda v taki obliki, tj. z neposredno uporabo principa minimuma histograma temnega predmeta, se sicer široko uporablja, vendar ni najbolj točna, saj je povsem statistična in ni najbolj primerna za računanje na pikselni osnovi (Liang, 2004).

Metodo so številni avtorji nadgrajevali, tako da so vpeljali določene fizikalne postopke, s čimer je metodo mogoče uporabiti tudi na pikselni osnovi. Liang (2004) predlaga, da se za ustrezen temen predmet vzame območje goste vegetacije. Koraki so potem naslednji:

1. Določimo območje goste vegetacije, in sicer na podlagi srednje IR spektralnega kanala, v območju valovne dolžine 2,1 μm (pri sistemu Landsat je to kanal 7). Za mejno odbojno vrednost postavimo pogoj $< 0,05$ TOA odboja (angl. top-of-the-atmosphere reflectance, TOA). Ker bomo ob tem najverjetneje zajeli tudi skupine pikslov, ki ustrezajo vodnim površinam in mokrim tlem, z dodatnim pogojem (tj. z uporabo rabe tal ali vegetacijskega indeksa) dobljene piksele omejimo samo na vegetacijo. Ob predpostavki, da je sipanje v območju valovnih dolžin tega kanala zanemarljivo, lahko (z upoštevanjem oddajanja energije zaradi absorpcije) TOA odboj prilagodimo odboju na površju.

2. Izračunamo (na podlagi gornje predpostavke) prilagojen oziroma napovedan odboj površja kanalov 1 in 3 (modrega in rdečega), in sicer na osnovi enostavnega statističnega razmerja:

$$\begin{aligned} \rho_{rdeči} &= 0.5\rho_{2,1} \\ \rho_{modri} &= 0.25\rho_{2,1} \end{aligned} \quad (5)$$

Na podlagi vpoglednih tabel (angl. lookup tables) TOA prilagojenih odbojnih vrednosti, ki smo jih izračunali v prejšnjem koraku, določimo optično globino (optično gostoto; angl. optical depth, optical thickness) kanalov 1 in 3.

3. Določimo optično globino ostalih kanalov na osnovi funkcijskega odnosa, ki ga predpostavljamo za optično globino:

$$\tau_i = a\lambda_i^{-b}, \quad (6)$$

kjer je τ_i optična globina (gostota) aerosolov in λ_i centralna valovna dolžina (μm) spektralnih kanalov i , $1 \leq i \leq 5$. Parametra a in b ocenimo iz optičnih globin spektralnih kanalov 1 in 3 (parameter b imenujemo tudi Angstromov indeks).

4. Ocenimo prostorsko porazdelitev optične globine, npr. z uporabo interpolacije s premičnim oknom.

Opisana metoda razmeroma uspešno obnovi predele na podobi, kjer se nahajajo meglice in tudi celoten kontrast podobe se poveča (Liang, 2004). Ne more pa, kot atmosferske korekcije nasploh, odstraniti in obnoviti odbojnih vrednosti na mestih, kjer so prisotni oblaki.

3.5.2.4 Metoda zmanjšanja kontrasta

Metoda zmanjšanja kontrasta izhaja iz predpostavke o nespremenljivosti odboja površja v bližnjem sosedstvu in velikem kontrastu odboja površja med sosedstvi. Za območja, kjer je površinski odboj zelo stabilen, lahko variacije v signalih, ki jih zazna satelit v različnih časih zajema, pripišemo variacijam optičnih lastnosti ozračja oziroma atmosfere. Vemo, da sipanje na aerosolih zmanjšuje varianco lokalnega odboja. Večja ko je obremenitev ozračja z aerosoli, manjša je lokalna varianca – zadušijo se lokalni kontrasti. Matematično zapisano je razlika (kontrast) dveh sosednjih pikselov navideznega TOA odboja Δ_{ij}^* v zvezi z razliko dejanskega odboja površja Δ_{ij} potemtakem naslednja:

$$\Delta_{ij}^*(\mu_s, \mu_v, \phi) = \Delta_{ij}(\mu_s) \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_v}\right), \text{ kjer je } \mu_s = \cos(\theta_s) \text{ in } \mu_v = \cos(\theta_v) \quad (7)$$

in so θ_s zenitni kot sonca (angl. Sun zenith angle), θ_v zenitni kot gledišča (angl. viewing zenith angle) ter ϕ relativni azimut (angl. relative azimuth angle). Nadalje opredelimo še dva elementa: $T(\mu_s)$ naj predstavlja celotno prepuščanje v atmosferi (direktne in difuzne energije) na t. i. poti sončevega obseva (od Sonca do površja Zemlje), $\exp(-\tau/\mu_v)$ pa naj bo direktno prepuščanje na poti gledanja satelita (od površja Zemlje do satelita). Ob predpostavki, da je razlika označena z lokalno radianco, je navidezna varianca TOA odboja σ^{*2} v linearnem razmerju z dejansko varianco odboja površja σ^2 :

$$\sigma^{*2} = \sigma^2 T^2(\mu_s) \exp\left(-\frac{2\tau}{\mu_v}\right). \quad (8)$$

Če predpostavimo, da je dejanska površinska varianca poznana, potem lahko s pomočjo TOA radianc, ki jih zazna satelit, ocenimo parametre atmosferske prepustnosti v enačbi 8. Kot je razvidno iz enačbe, so ti parametri še najbolj odvisni od optične globine aerosolov τ . Običajno lahko privzamemo kar povprečni model aerosolov, dejansko varianco odboja površja pa ocenimo iz podobe, ki ima najbolj čisto ozračje.

Metoda je bila učinkovito uporabljena v študijah opazovanja puščavskega prahu, kjer so analizirali kontrast med kopnim in morjem. Učinkovitost se nanaša predvsem na uspešnost in natančnost določanja optične globine aerosolov. Zaradi osnovne predpostavke o nespremenljivosti odboja površja v bližnjem sosedstvu in velikem kontrastu odboja površja med sosedstvi, pa je uporabnost metode omejena na specifične situacije. To so, kot navaja avtor metode (Liang, 2004), predvsem situacije, ko je v ozračju prisotna večja količina močnega oziroma težkega prahu in smoga.

3.5.2.5 Metoda ujemanja gruč

Glavni problem pri večini metod atmosferske korekcije, ki smo jih doslej obravnavali, je, da je določitev optične globine aerosolov vezana na neke specifične pogoje oziroma razlike. Metoda ujemanja gruč skuša to pomanjkljivost premostiti, in sicer na tak način, da v prvo vrsto postavi pridobivanje ocene prostorske razporeditve obremenitve ozračja z aerosoli v splošnih pogojih. Poleg tega vpeljuje tudi tretjo komponento energijskega ravnovesja – atmosferski popravek za učinek sosedstva (angl. adjacency effect). Metoda je verjetno najbolj učinkovita, a v primerjavi z doslej predstavljenimi tudi najbolj zapletena za uporabo. Ta atmosferska korekcija poteka v treh korakih:

- ocena optične globine aerosolov,
- popravek učinka sosedstva in
- obnova odboja površja.

Ker metode v okviru disertacije nisem implementirala, je pa zgleden primer verjetno najbolj učinkovite obstoječe atmosferske korekcije na osnovi podatkov v podobi, jo podrobneje predstavljam v Prilogi A4. Pri testiranju učinkovitosti opisane metode je avtor (Liang, 2001, 2004) dokazal, da je metoda po kakovosti in točnosti rezultatov atmosferskih popravkov lahko primerljiva z absolutnimi (radiacijskimi) metodami popravkov.

3.6 Topografski popravki

S topografskimi radiometričnimi popravki odpravljamo *vpliv terena* ter *razlike v osvetlitvi*, ki so posledica geometrije gledanja, in sicer z modeliranjem geometrije opazovanja (Oštir, 2006). Pri tem upoštevamo razdaljo med površjem in senzorjem ter položaj Sonca, senzorja in posamezne lokacije na površju (slika 8). Modeliranje popravkov osvetlitve in vpliva terena je neizogibno v primerih, ko želimo primerjati podobe zajete ob različnih časih (mesec v letu, ura v dnevu), ali če želimo ustvariti mozaik več posnetkov istega senzorja ter želimo pri tem ohraniti enakomerno osvetlitev po vsej kompoziciji.

Pri odpravljanju topografskih neskladij uporabljamo tudi digitalni model reliefa (DMR). Predvsem v razgibanem in visokogorskem svetu lahko s pomočjo DMR uspešno odpravljamo t. i. psevdo-geomorfološke napake, ki so posledica oblike terena ter kota in časa opazovanja in se kažejo kot napake v intenziteti svetlostnih vrednostih (sence, lega vrhov, dolžina pobočij in podobno). Postopek, ki obravnava topografske popravke, je v daljinskem zaznavanju poznan pod imenom *topografska normalizacija*.

Signal, ki ga zaznajo senzorji na satelitih ali letalih, je odvisen od velikega števila dejavnikov, od katerih so najpomembnejši (Oštir, 2006; Jensen, 1996, Erdas Field Guide, 2005):

- odbojnost površja (lastnosti površja Zemlje),
- narava (vrsta) in stopnja atmosferskih vplivov,
- naklon in usmerjenost površja glede na položaj Sonca,
- vidni kot senzorja in
- položaj Sonca.

Posledice naštetih vplivov in njihovega skupnega delovanja se lahko kažejo v zelo različnih svetlostnih vrednostih pri sicer sorodnih pogojih terena (naklon, nadmorska višina) in sorodni odbojnosti površja (enaka raba tal / pokrovnost). Tovrstne razlike torej skušamo odpraviti s postopki topografskih korekcij.

Raziskave na področju odpravljanja vpliva terena na satelitskih posnetkih segajo v konec 70. in začetek 80. let prejšnjega stoletja. Razdelimo jih lahko na tri skupine (Liang, 2004):

- algoritmi razmerij,
- algoritmi kosinusnih popravkov ter
- Dozierjeva metoda ali metoda IPW.

V nadaljevanju opisani algoritmi so smiselno omejeni na tiste, ki so primerni za situacije, ko je senzor v zenitu ali približno v zenitu (lastnosti sistema Landsat, SPOT in podobno).

3.6.1 Algoritmi razmerij

Med preprostejše, vendar prve algoritme metod topografske korekcije uvrščamo t. i. *algoritme razmerij* (Liang, 2004). Slonijo na predpostavki, da so učinki osvetlitve, ki jih povzroča topografija površja, sorazmerni v različnih spektralnih kanalih. Potemtakem bi s pomočjo ugotovljenega razmerja med dvema kanaloma lahko odstranili topografske vplive. Vendar se je kmalu pokazalo, da tak pristop ne daje ustreznih rezultatov, saj so radiometrične variacije, ki so posledica topografije površja, odvisne od valovne dolžine, in zato razlike v različnih kanalih niso večje ali manjše za neko konstantno vrednost, niti niso enakomerno prostorsko porazdeljene.

3.6.2 Algoritmi kosinusnih popravkov

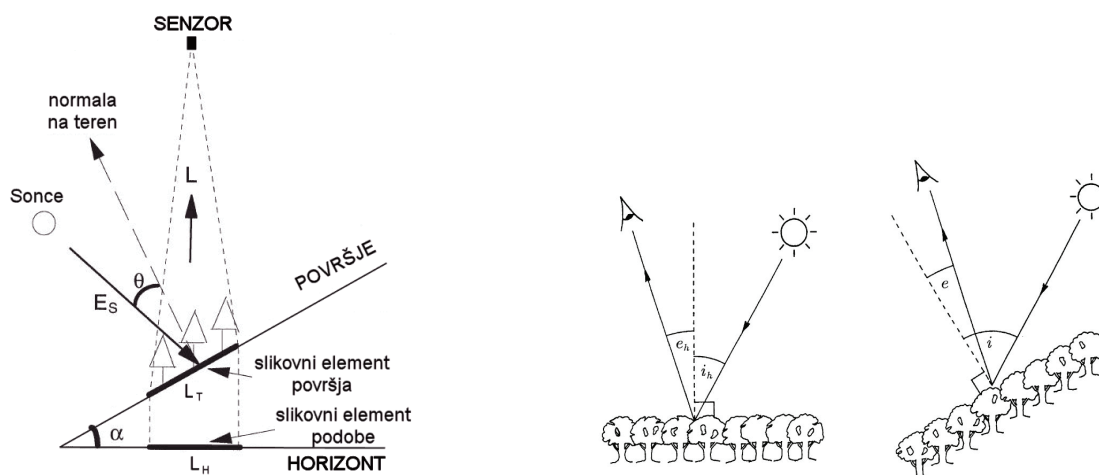
Prvim poskusom so sledili t. i. *algoritmi kosinusnih popravkov*. Ti so še razmeroma preprosti, vendar pa izrabljajo tudi prednosti uporabe digitalnega modela reliefa, nekateri od njih pa poskušajo modelirati tudi izotropne lastnosti površja. Vse različice metod kosinusnih popravkov so empirične. Ker pa so v primerjavi z drugimi, zapletenejšimi metodami razmeroma enostavne za uporabo in ker dajejo tudi zadovoljive rezultate, se najbolj pogosto uporabljajo.

Če zanemarimo atmosferski vpliv in vpliv odboja sosedstva, lahko vpliv terena popravimo na osnovi razlike v direktnem sončevem obsevu. Spremembe v položaju Sonca najenostavneje določimo, če predvidevamo, da površje svetlobo odbija po Lambertovo. Do Lambertovega sipanja prihaja na grobih površinah. Zanj je značilno, da je intenziteta sipanja neodvisna od kota gledanja, torej od položaja opazovalca. To le redko drži za naravne površine, je pa dovolj za približek prvega reda (Oštir, 2006; Liang, 2004).

Metode kosinusnih popravkov pretvorijo opazovano radianco na nagnjenem terenu L_T v vrednost ekvivalentne radiance na horizontalnem terenu L_H (slika 8). Če je zenitni položaj Sonca (kot med normalo na elipsoid in Sončevimi žarki, merjen od navpičnice) enak θ in opazovana radianca L_T , potem je radianca normirana na horizontalni teren L_H v osnovi določena z odnosom:

$$L_H = \frac{L_T}{\cos(\theta)} \quad (9)$$

V splošnem gre torej za to, da globalno direktno osončenost popravimo za razmerje med kosinusom vpadnega kota in kosinusom zenitnega kota sonca. Ta osnovni postopek lahko izboljšamo, če upoštevamo tudi obliko opazovanega reliefa (digitalni model višin) in odbojne lastnosti površja (Oštir, 2006; Riaño, 2003). Postopki, ki vključujejo obliko opazovanega reliefa se imenujejo tudi *topografska normalizacija*.



Slika 8: Skica geometrijskih odnosov med položajem Sonca, površjem oziroma terenom in položajem senzorja, poznana kot geometrija STS.

Figure 8: Geometrical presentation of the Sun – Terrain – Sensor geometry correction models.

3.6.2.1 Kosinusna metoda

V algoritmihi topografske normalizacije zenitni položaj Sonca v enačbi 9 nadomestimo s t. i. *vpadnim kotom* α , kotom med normalo na relief in Sončevimi žarki, ki ga za posamezno točko določajo višina θ_s in azimut Sonca ϕ_s ter naklon θ_p in usmerjenost ϕ_p površja. Pri tem za kosinus vpadnega kota velja (Oštir, 2006; Riaño, 2003):

$$\cos(\alpha) = \cos(\pi - \theta_s) \cos(\theta_p) + \sin(\pi - \theta_s) \sin(\theta_p) \cos(\phi_s - \phi_p). \quad (10)$$

Topografsko normirano podobo L_{TN} lahko nato izračunamo:

$$L_{TN\ Cos} = L_T \frac{1}{\cos(\alpha)}. \quad (11)$$

Metoda, ki uporablja enačbo 11, se imenuje *kosinusna metoda* (Smith, 1980; McCormick, 1999). Enostavna nadgradnja kosinusne metode pa je *Lambertov model*. Ta predpostavlja, da je dvosmerni faktor odboja konstanten za vse valovne dolžine ter je opazovana radianca linearana funkcija kosinusa vpadnega kota, zato je mogoče opazovano radianco popraviti zgolj glede na spremembe v direktnem Sončevem obsevu (Teillet et al. 1982; Vincini in Frazzi, 2003; McCormick, 1999; Riaño, 2003):

$$L_{TN \text{ Cos Lambert}} = L_T \frac{\cos(\theta_s)}{\cos(\alpha)} \quad (12)$$

Difuzni odboj (angl. diffuse sky radiation) je pri tem zanemarjen, medtem, ko moramo okoljski odboj predhodno odpraviti z eno od metod atmosferskih korekcij (Vincini in Frazzi, 2003). Zaradi zelo približnih predpostavk kosinusna metoda običajno preceni vrednosti radianc pri večjih vpadnih kotih oziroma na površinah, obrnjenih stran od sonca.

3.6.2.2 Minnaertova metoda

Bolj zapletena metoda topografske normalizacije, ki upošteva dejstvo, da opazovana površina valovanja ne odbija v vse smeri enako, se imenuje Minnaertova metoda. Smith et al. (1980) predlagajo, da odnos računamo takole:

$$L_{TN \text{ Minn}} = L_T \frac{\cos^{1-k}(\theta_p)}{\cos^k(\alpha)}, \quad (13)$$

kjer je θ_p kot naklona, definiran s kotom med normalo na površje in vertikalo na površje ter k t. i. Minnaertova konstanta. Minnaertova konstanta pove, koliko površina odbija po Lambertovo in lahko zasede vrednosti med 0 in 1. Za površino, ki svetlobo/valovanje odbija popolnoma po Lambertovo (izotropno), je $k = 1$.

Faktor k lahko določimo z linearno regresijo (McCormick, 1999; Riaño, 2003). Pri čemer za neodvisno spremenljivko X vzamemo $\log(\cos \alpha \cdot \cos \theta_p)$, za odvisno spremenljivko Y pa t. i. Minnaertovo podobo, ki jo določa $\log(L_T \cdot \cos \theta_p)$. Linearno regresijo $Y_i = a_i X + b_i$ računamo za vsak spektralni kanal posebej na nekem manjšem reprezentativnem območju. Dobimo niz regresijskih koeficientov a_i in b_i , nato pa koeficiente naklona regresijske premice a_i uporabimo za Minnaertove konstante k_i .

Minnaertova metoda torej za vsak spektralni kanal empirično določi Minnaertovo konstanto, ki podaja neizotropne lastnosti površja.

3.6.2.3 Metoda c-faktor

Metoda c-faktor je nadaljnja različica kosinusnih algoritmov, ki so jo predlagali Teillet et al. (1982). Izhaja iz empiričnega opazovanja linearne korelacije med opazovano radianco in kosinusom vpadnega kota. Topografsko normalizirano podobo v tem primeru računamo takole (McCormick, 1999; Riaño, 2003):

$$L_{TN \text{ c-faktor}} = L_T \frac{\cos(\theta_s) + c}{\cos(\alpha) + c}, \quad (14)$$

kjer je θ_s zenitni položaj Sonca, definiran kot smer vpadne sončeve svetlobe (merjen od navpičnice proti horizontali površja), člen c je določen s kvocientom b/a , a in b pa sta koeficienta dobljena iz linearne regresije med opazovano radianco L_T (odvisna spremenljivka Y) in kosinusom vpadnega kota $\cos(\alpha)$, kot neodvisno spremenljivko X :

$$L_T = a \cos(\alpha) + b. \quad (15)$$

Člen c da metodi ime, modelira pa difuzni odboj. Računamo ga za vsak kanal posebej.

3.6.2.4 Statistična metoda

Še ena od različic kosinusnih metod je statistična metoda. Predlagali so jo Teillet et al. (1982), nadgradili pa so jo še Itten et al. (1992). Topografsko normalizirano podobo po tej različici izračunamo kot (McCormick, 1999):

$$L_{TN \text{ stat}} = L_T - (\cos(\alpha) - a), \quad (16)$$

pri čemer je a regresijski koeficient naklona iz linearne regresije med opazovano radianco L_T (odvisna spremenljivka Y) in kosinusom vpadnega kota $\cos(\alpha)$ kot neodvisno spremenljivko X (linearna regresija je v tem primeru enaka kot pri metodi c-faktor).

Če pogledamo vlogo koeficientov v zgornjih enačbah, ugotovimo, da če so vrednost k v Minnaertovi enačbi ali vrednosti a in b v enačbi c-faktor ter enačbi statistične metode odvisne od valovne dolžine, lahko z razmerjem med dvema spektralnima kanaloma odstranimo vpliv topografije površja. Pri tem ne bo odveč opozoriti, da so te vrednosti splošno spremenljive, tj. različne za različne spektralne kanale ter različne satelitske posnetke in je zato treba vse navedene enačbe uporabiti za vsak spektralni kanal posebej. V splošnem bi torej morali pisati:

$$L_{TN_\lambda} = L_{T_\lambda} \frac{1}{\cos(\alpha)}, \quad (17)$$

kjer je $\lambda = 1 \dots n$ spektralni kanal, za primer satelitskih posnetkov Landsat torej spektralni kanali 1–5, 7.

Opisane metode se med seboj razlikujejo tudi po tem, katere spremenljivke uporabijo za linearno regresijo. Preglednica 1 prikazuje vhodne odvisne in neodvisne regresijske spremenljivke v postopku topografske normalizacije za površine, ki ne odbijajo po Lambertovo.

Preglednica 1: Regresijske spremenljivke za ne-Lambertove površine v postopku topografske normalizacije.

Table 1: Regression variables for non-Lambertian topographic normalization.

Metoda topografske normalizacije	Neodvisna regr. spremenljivka	Odvisna regr. spremenljivka
Minnaert	$\log(\cos \alpha \cdot \cos \theta_p)$	$\log(L_T \cdot \cos \theta_p)$
Statistična	$\cos \alpha$	L_T
c-faktor	$\cos \alpha$	L_T

3.6.2.5 SCS metoda

SCS metoda (angl. Sun-Canopy-Sensor method) podobno kot kosinusna metoda predpostavlja Lambertov model. Za vse valovne dolžine predlaga eno funkcijo kota odboja, ki jo dobimo z vpeljavo nakona površja θ_p v Lambertovem modelu (Gu in Gillespie, 1998):

$$L_{TN\ SCS} = L_T \frac{\cos(\theta_s) \cdot \cos(\theta_p)}{\cos(\alpha)}. \quad (18)$$

3.6.3 Dozierjeva metoda ali metoda IPW

Metoda temelji na Dozierjevem delu (1981; 1990) in za razliko od doslej opisanih metod, ki izhajajo izključno iz modeliranja geometrije opazovanja ter oblike reliefa, vpeljuje še nekatere druge spremenljivke. Metoda se razmeroma pogosto uporablja, saj je dostopna v odprtokodnem programskem sistemu IPW³.

V osnovi izhaja iz formulacije, da je skupna vpadna kratkovalovna energija E seštevek treh komponent: direktnega sončevega obseva E_{DIR} , difuzne energije E_{DIF} in odboja iz soseske E_{SOSED} :

$$E = E_{DIR} + E_{DIF} + E_{SOSED}. \quad (19)$$

Kako metoda določa posamezne komponente podrobneje (in ker metode nisem uporabila v praktičnem delu naloge, je pa vsekakor zanimiva) namesto na tem mestu podajam v Prilogi A5. Dozierjeva metoda od vseh opisanih najbolj kompleksno obravnava reševanje problema vpliva terena in osvetlitve, saj edina združuje modeliranje dveh močno povezanih sistemov: geometrije opazovanja in širjenja sončevega obseva (oziroma lastnosti sončevega obseva površja). Kljub temu Liang (2004) navaja nekatere pomanjkljivosti metode. Prva je predpostavka o izotropični porazdelitvi difuznega obseva (angl. sky radiance), saj je v naravi večinoma ravno drugače. Namreč piksli, ki imajo enak naklon, lahko prejmejo precej različen delež vpadnega sončevega obseva, če imajo različne usmerjenosti. Zaradi te posplošitve lahko račun za obnovo odboja površja vpelje tudi velike napake. Metodo dodatno kritizira tudi zato, ker ne ponuja alternative oceni direktnega sončevega obseva, ki ga ne moremo natančno določiti iz meteoroloških podatkov (klimatoloških pogojev ozračja).

3.7 Radiometrična standardizacija

Radiometrična standardizacija (tudi normalizacija) se uporablja predvsem kadar delamo primerjave z več podobami, tj. med več posnetki. Z radiometrično standardizacijo skušamo izenačiti vse tiste preostale vplive, ki niso predmet dejanskih sprememb na površju v danem času. Postopek vpeljemo, kadar želimo primerjati več prostorsko se prekrivajočih, a časovno različnih posnetkov, ki smo jih v absolutnem smislu že obnovili v postopkih predobdelave in jih želimo med seboj še relativno povezati. V splošnem gre za to, da v nizu posnetkov na

³ IPW: Image Processing Workbench: Sistem za obdelavo podob za okolje UNIX.
http://freegis.org/database/viewobj?obj=188&_ZopeId=34872907A23cTx5mhXc

katerih opravljamo analize, izberemo t. i. vodilni ali za analizo referenčni posnetek, nato pa ostale posnetke (relativno) nanj prilagajamo. Rezultat radiometrične standardizacije naj bi bile podobe, za katere bi lahko rekli, da so bile zajete pod enakimi pogoji (glede občutljivosti senzorja, višine in azimuta Sonca, vpliva reliefa ter stanja v atmosferi).

Večina metod izhaja iz predpostavke, da so na tej stopnji obdelave posnetkov odnosi med posameznimi spektralnimi kanali različnih podob v linearnem sorazmerju; zato gre pri metodah radiometrične standardizacije največkrat za eno od oblik linearne transformacije. V nadaljevanju predstavljam tri metode, ki sta jih Yuan in Elvidge (1995) v eni redkih primerjalnih študij s tega področja uvrstila na prva tri mesta glede na dosežene (statistične in vizualne) rezultate. Res pa je, da metode v omenjeni študiji niso ovrednotene tudi z vidika prisotnosti oblakov na posnetkih ter analize statističnih ekstremov.

3.7.1 Z uporabo regresije nadzorovanega diagrama razpršenosti

Standardizacijo z uporabo regresije nadzorovanega diagrama razpršenosti (angl. automatic scattergram-controlled regression, ASCR) so razvili Elvidge et al. (1995) predvsem za delo z veliko posnetki Landsat. Metoda uporablja dvorazsežne diagrame razpršenosti bližnje IR kanalov iz dveh posnetkov z različnim datumom zajema (en posnetek je referenčni, drugega prilagajamo). Na podlagi diagrama razpršenosti metoda določi stabilne skupine pikslov kopenskih in vodnih površin (dve gruči) ter izračuna začetno regresijsko premico med centroma teh dveh gruči. Nato s postavitvijo zgornje in spodnje mejne vrednosti opredeli skupino pikslov, za katere velja, da se med dvema datumoma niso spremenili. Takšne nespremenljive piksele nato uporabi v regresijski analizi za vsak posamezen spektralni par kanalov posnetkov, s čimer pridobimo potrebna koeficienta (naklon, presečišče) za izpeljavo radiometrične standardizacije med dano prilagajano in izbrano referenčno podobo.

Zahteve (in omejitve) za korektno izpeljavo metode so (Elvidge et al., 1995):

- posnetka naj bosta zajeta pod podobnimi pogoji glede položaja Sonca in vegetacijskih fenoloških lastnosti,
- v večjem delu posnetka oziroma obravnavanega območja se raba tal / pokrovnost ni spremenila,
- na posnetku so prisotne tako vodne kot kopenske površine.

Avtorji zagovarjajo metodo tudi s tega vidika, da učinkoviteje odpravlja meglice kot enostavnejše linearne transformacije. Ker se za izračun koeficientov prilagajanja uporabi velik delež pikslov, je metoda (ob izpolnjenih zgornjih treh pogojih) tudi natančnejša od ostalih. Iz enakega razloga se tudi napake normalizacije razmeroma enakomerno porazdelijo med različne tipe rabe tal / pokrovnosti oziroma spektralnih lastnosti površja.

3.7.2 Glede na identifikacijo nespremenljivih predmetov

Metodo so predstavili Schott et al. (1988). Izhaja iz predpostavke, da so razlike v porazdelitvi svetlostnih vrednosti t. i. nespremenljivih predmetov v linearnem razmerju. Kako določimo nespremenljive predmete in kakšne so zahteve zanje sem podala v poglavju 3.5.2.1. Nato na izbranih nespremenljivih predmetih (oziroma njihovih svetlostnih vrednostih) opravimo

linearno regresijo (med prilagajano podobo in referenčno podobo) za vsak par spektralnih kanalov posebej.

Pri tem lahko naklon regresijske premice (multiplikativni koeficient) za posamezen spektralni kanal interpretiramo kot popravek, ki odpravlja razlike v kalibraciji detektorja, položaju Sonca, razdalji med Soncem in zemljo, vplivi atmosfere in geometriji STS med dvema datumoma. Presečišče regresijske premice (prištevni koeficient) pa kot popravek, ki odpravlja razlike v atmosferskem odboju med dvema datumoma (Callahan, 2003).

3.7.3 Z enostavno linearno regresijo

Metoda enostavne linearne regresije je ena najstarejših metod, ki jo je predstavil že Jensen v priročniku za daljinsko zaznavanje leta 1983 (Jensen, 1983). Celotno podobo (oziroma območje prekrivanja), ki jo želimo prilagoditi na referenčno podobo, vstavimo v regresijski model, ki uporablja metodo najmanjših kvadratov. To z drugimi besedami pomeni, da opravimo regresijo med ustreznimi pari spektralnih kanalov, le da tu predmetov, na katerih se opravi regresija, ne izločamo iz celotnega niza podatkov, marveč uporabimo vse. Na koncu prilagajano podobo preračunamo v prilagojeno podobo na podlagi dobljenih regresijskih enačb oziroma koeficientov.

3.8 Spektralne pretvorbe

Na kakšen način v postopku predobdelave podobo obdelujemo je v veliki meri odvisno od namena uporabe in od že opravljene obdelave surovega satelitskega posnetka. S spektralnimi pretvorbami in izboljšavami pa lahko spreminjamo izvirne informacijske vrednosti satelitskega posnetka v nove informativne količine.

Glavni namen *izboljšave* podob je spremeniti njihov videz (Oštir, 2006; Jensen, 1996) in tako olajšati vizualno interpretacijo in analizo. Primer postopkov izboljšanja podob je povečanje kontrasta z raztegovanjem histograma in s tem povečevanjem razlik v tonu med predmeti na podobi. Sem spadajo tudi različna filtriranja, ki poudarijo ali zadušijo določene prostorske vzorce na podobi. Ti postopki se v primerjalnih študijah redkeje uporabljajo, saj gre dejansko za spreminjanje vrednosti (podob) in ne le pretvorbe vrednosti. So pa v pomoč v situacijah, ko moramo iz podob odstraniti del podatkov, na primer oblake ali nepravilnosti podatkov, skratka šum.

Za analizo sprememb so bolj pomembni postopki *spektralne pretvorbe* podob. Najbolj poznani so (Jensen, 1996; Lillesand in Kiefer, 1994; Liang, 2004; Oštir, 2006):

- pretvorbe podob s kombiniranjem razmerij med kanali (različna spektralna razmerja → različni spektralni *indeksi* ali indikatorji lastnosti površja) in s tem pridobivanje novih, specifično naravnanih informacij o površju ter
- *klasifikacija podob* oziroma določanje izbranih vzorcev na podobah,
- *pretvorba spektralnega prostora* iz prvotnega v nov spektralni prostor (analiza glavnih komponent, Kauth-Thomasova transformacija).

Tudi v tem poglavju se omejujem na prikaze izračuna pretvorbe vrednosti za podatke satelitov Landsat (MSS, TM in ETM+). To je tudi edino smiselno v luči preglednosti disertacije, saj sem, kot že rečeno, tudi praktični del opravila na posnetkih Landsat.

3.8.1 Določitev radiance, odboja in temperature

Običajno so signali, ki jih senzor zazna, preko poznanega razmerja pretvorjeni v t. i. digitalne vrednosti (angl. digital numbers, DN). V primeru 8-bitnega zapisa to pomeni, da se vrednosti lahko porazdelijo v razponu celih števil med 0 in 255. Radianco, odboj in temperaturo, kot jih zazna senzor nad atmosfero (angl. top of the atmosphere, TOA), je mogoče določiti, če dovolj dobro poznamo delovanje senzorja in način pretvorbe analognega signala v numerično vrednost (NASA, 2006; Oštir, 2006). Absolutne vrednosti za energijo zaznanega valovanja lahko za vsak slikovni element posebej določimo z obrnjenim postopkom. Vendar to lahko storimo le, če imamo podatke o delovanju senzorja (radiometrični metapodatki).

Digitalne vrednosti pikslov (DN), pretvorimo v *radiance* L_{λ} na naslednji način (NASA, 2006; Chander et al., 2003, 2007):

$$L_{\lambda(i)} = gain \cdot DN + offset, \quad (20)$$

kar lahko zapišemo tudi takole:

$$L_{\lambda(i)} = \frac{LMAX_{\lambda(i)} - LMIN_{\lambda(i)}}{QCALMAX - QCALMIN} \cdot (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda(i)}. \quad (21)$$

Pri tem so:

$L_{\lambda(i)}$: spektralna radianca, ki jo zazna senzor, in ima enoto W/m^2 srad μm ,

$$gain : \text{prirastek, ki ga določa zveza: } gain = \frac{LMAX_{\lambda(i)} - LMIN_{\lambda(i)}}{DN_{MAX}}, \quad (22)$$

$$offset : \text{zamik, ki ga določa zveza: } offset = LMIN_{\lambda(i)}, \quad (23)$$

i : spektralni kanal, $i = 1 \dots 7$ v primeru Landsat TM / ETM+ posnetkov,

$QCAL$: kvantizirana kalibrirana vrednost piksla, izražena z digitalno vrednostjo DN v kanalu $\lambda(i)$,

$LMIN_{\lambda(i)}$: najmanjša še zaznana spektralna radianca (minimum), ki je pretvorjena v $QCALMIN$ in ima enoto W/m^2 srad μm ,

$LMAX_{\lambda(i)}$: največja še zaznana spektralna radianca (maksimum), ki je pretvorjena v $QCALMAX$ in ima enoto W/m^2 srad μm ,

$QCALMIN$: najmanjša kvantizirana kalibrirana vrednost piksla (ki ustreza $LMIN_{\lambda(i)}$) izražena v DN. $QCALMIN$ zavzame vrednost 0 ali 1, odvisno od obdelave v sprejemnih postajah.

$QCALMAX$: največja kvantizirana kalibrirana vrednost piksla (ki ustreza $LMAX_{\lambda(i)}$) izražena v DN. $QCALMAX = 2^8 - 1$ oziroma 255 za 8-bitne posnetke Landsat.

Preglednica 2: Razpon (obseg) spektralnih radianc (kalibracijski parametri) za senzor Landsat ETM+.

Table 2: Post-Calibration Dynamic ranges for Landsat ETM+ data.

	pred 1. julijem 2000				po 1. juliju 2000			
	nizek prirastek		visok prirastek		nizek prirastek		visok prirastek	
	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX
ETM+1	-6.2	297.5	-6.2	194.3	-6.2	293.7	-6.2	191.6
ETM+2	-6	303.4	-6	202.4	-6.4	300.9	-6.4	196.5
ETM+3	-4.5	235.5	-4.5	158.6	-5	234.4	-5	152.9
ETM+4	-4.5	235	-4.5	157.5	-5.1	241.1	-5.1	157.4
ETM+5	-1	47.7	-1	31.76	-1	47.57	-1	31.06
ETM+6	0	17.04	3.2	12.65	0	17.04	3.2	12.65
ETM+7	-0.35	16.6	-0.35	10.932	-0.35	16.54	-0.35	10.8
ETM+8	-5	244	-5	158.4	-4.7	243.1	-4.7	158.3

Zavedati se je treba, da senzor s časom izgublja svojo občutljivost (Markham in Barker 1987; Chander et al., 2007), zato niso redki primeri, ko se mejne vrednosti $LMIN_{\lambda(i)}$ in $LMAX_{\lambda(i)}$ za dani senzor po določenem času delovanja spremenijo (za primer glej preglednico 2). Potrebne podatke za pretvorbo v radiance (kalibracijske parametre) praviloma najdemo v metapodatkovni datoteki, ki spremlja posnetek, sicer pa lahko uporabimo tudi kalibracijske parametre iz uradnih preglednic (glej NASA, 2006; Chander et al., 2007).

Pretvorbo v *odbojne vrednosti* opravimo preko normalizacije za vpliv sončevega sevanja. Z naslednjim izračunom dobimo vrednosti t. i. planetarnega odboja ali albeda. To je kombiniran odboj površja in atmosfere Zemlje, določa pa ga naslednja zveza (NASA, 2006; Liang, 2004):

$$\rho_p = \frac{\pi L_{\lambda(i)} d^2}{E_{S_{\lambda(i)}} \cos \theta} \quad (24)$$

Pri tem je ρ_p planetarni odboj (brez enote), $L_{\lambda(i)}$ spektralna radianca, kot jo zazna senzor, d razdalja med Soncem in Zemljo v astronomskih enotah, $E_{S_{\lambda(i)}}$ srednja Sončeva izven-atmosferska osvetlitev (vrednosti prikazuje preglednica 3) ter θ zenitni položaj Sonca v stopinjah.

Landsat vsebuje poleg vidnih, bližnjih in srednjih IR kanalov tudi termični kanal (TM6 / ETM+6). Ta omogoča določitev temperature površja, kot jo zaznava senzor nad atmosfero (sistem Zemlja + ozračje) ob predpostavki enotne emisivnosti. Radianco kanala 6 $L_{\lambda(6)}$ v tem primeru pretvorimo v fizikalno količino – temperaturo, in sicer preko naslednje zveze (NASA, 2006):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda(6)}} + 1\right)}, \quad (25)$$

kjer so: T temperatura v stopinjah Kelvina, K_1 in K_2 kalibracijski konstanti, ki za Landsat 5 znašata $K_1 = 607,76 \text{ W/m}^2 \text{ srad } \mu\text{m}$ in $K_2 = 1260,56 \text{ W/m}^2 \text{ srad } \mu\text{m}$, za Landsat 7 pa $K_1 = 666,09 \text{ W/m}^2 \text{ srad } \mu\text{m}$ in $K_2 = 1282,71 \text{ W/m}^2 \text{ srad } \mu\text{m}$.

Preglednica 3: Vrednosti srednje Sončeve izven-atmosferska osvetlitve po spektralnih kanalih za Landsat TM in ETM+.

Table 3: Mean Solar exoatmospheric (spectral) irradiance for Landsat TM and ETM+ spectral bands.

Spektr. kanal	TM 5	ETM+ 7
SExo - B1	1957	1969
SExo - B2	1829	1840
SExo - B3	1557	1551
SExo - B4	1047	1044
SExo - B5	219.3	225.7
SExo - B7	74.52	82.07
B6-K1	607.76	666.09
B6-K1	1260.56	1282.71
SExo - B8	/	1368

V primeru zelo čistih podob, torej podob, ki so bile zajete v pogojih zelo čistega ozračja (majhen vpliv aerosolov, oblakov, meglic), z opisanimi pretvorbami digitalnih vrednosti v radianco, temperaturo in odboj lahko že znatno zmanjšamo variabilnost med posnetki.

3.8.2 Spektralni indeksi

Računanje spektralnih razmerij je ena najpogostejših transformacij podob (Oštir, 2006; Jensen, 1996; Liang, 2004). Z razmerji lahko opazimo drobne razlike v spektralnih odzivih različnih tipov površja. Z deljenjem podatkov dveh kanalov poudarimo spremembe naklona odbojnih krivulj, ki jih sicer ne opazimo zaradi sprememb znotraj enega samega kanala. Pomembna prednost spektralnih razmerij je tudi zmanjšanje vpliva topografije in osvetlitve opazovanega območja. Pri razmerjih namreč opazujemo relativne vrednosti in ne absolutnih, kar pomeni, da so rezultati bolj ali manj neodvisni od sprememb v osvetljenosti. Absolutne vrednosti odboja so sicer različne v odvisnosti od usmeritve glede na položaj Sonca, razmerje kanalov pa je od njegovega položaja neodvisno. Zaradi velike prednosti, ki jih razmerja prinašajo v interpretacijo, namesto enostavnega deljenja uporabljamo tudi zapletene, pogosto empirično določene transformacije, ki veljajo samo za posamezen senzor. Govorimo o tako imenovanih spektralnih indeksih (Oštir, 2006).

Dobra stran razmerij je, da z barvnim prikazom več podob različnih razmerij lahko poudarimo marsikatero geološke lastnosti površja. Slaba stran podob razmerij je, da se lahko razlike v albedu (odboju) površja tudi zmanjšajo (Jensen, 1996), in sicer v primeru, kadar imajo

predmeti različen odboj, a podoben naklon v odbojni krivulji. V taki situaciji bo predmet skorajda neprepoznaven v podobi razmerij.

3.8.2.1 Vegetacijski indeksi

Pojem spektralnega razmerja ima posebej velik pomen pri opazovanju vegetacije. Zdravo, to je živo rastlinje močno odbija svetlobo v bližnjem infrardečem delu elektromagnetnega spektra, medtem ko rdečo svetlobo močno absorbira. Druge površine, na primer voda in gola prst, imajo skoraj enako odbojnost v obeh omenjenih spektralnih območjih (Oštir, 2006). Razmerje bližnjega infrardečega in rdečega pasu imenujemo vegetacijski indeks (VI):

$$VI = \frac{IR}{R}. \quad (26)$$

Vegetacijski indeks je mnogo večji od ena za vegetacijo in približno enak ena za večino drugih snovi (vodo, prst). V primeru satelita Landsat in senzorja TM/ETM+ gre pri VI za razmerje kanalov 4 in 3. Ločevanje med vegetacijo in drugimi tipi tal je z uporabo navedenega razmerja precej lažje in jasnejše. Poleg tega lahko hitro odkrijemo območja nezdravega ali poškodovanega rastlinja. To ima manjši odboj v bližnjem infrardečem delu spektra in posledično manjše razmerje od zdrave vegetacije.

Z zapletenejšimi razmerji ali indeksi, ki vsebujejo vsote in razlike kanalov, lahko vegetacijo in druge značilne predmete na površju še močneje poudarimo (Oštir, 2006; Jensen, 1996; Liang 2004). Eden najbolj razširjenih indeksov je normiran diferencialni vegetacijski indeks (angl. normalized difference vegetation index, NDVI). NDVI je bil razvit za opazovanje stanja vegetacije na večjih območjih, na primer na kontinentih ali na celotni Zemlji. Pri tem se v glavnem uporabljajo podatki senzorja AVHRR, ki se nahaja na satelitih skupine NOAA. NDVI predstavlja razmerje med razliko infrardečega in rdečega kanala in njuno vsoto:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}. \quad (27)$$

Indeks NDVI zavzame vrednosti med -1 in $+1$, pri čemer višje vrednosti pomenijo bolj intenzivno vegetacijo. Uporablja se za opazovanje sprememb in količine zelene biomase, vsebnosti klorofila in vodnega stresa vegetacije (Liang, 2004). Obstaja še ena njegova različica, transformirani NDVI (angl. transformed NDVI, TNDVI), ki ga določa naslednja enačba (Erdas Field Guide, 2005):

$$TNDVI = \sqrt{\frac{IR - R}{IR + R} + 0.5}. \quad (28)$$

Vse tri enačbe lahko uporabimo tudi na posnetkih Landsat. Množico bolj zapletenih vegetacijskih indeksov, ki skušajo odstraniti različne moteče dejavnike, na primer prst, vodo, atmosferske vplive, navajam v Prilogi A6.

3.8.2.2 Mineralni indeksi

Indeksi so relativno pogosti tudi v geofizikalnih aplikacijah daljinskega zaznavanja (Liang, 2004). Praviloma so določeni empirično in prilagojeni posameznemu senzorju. V preglednici 4 navajam nekatere enostavnejše indekse za senzor Landsat TM/ETM+.

V praktičnem delu disertacije sem uporabila manjši del naštetih indeksov: VI, NDVI, TNDVI, mineralni kompozit ter hidrotermalni kompozit. Kljub temu se mi zdi predvsem z vidika možnosti, ki jih spektralni indeksi ponujajo, pomembno podati širši razpon indeksov, saj so zanimive alternative odbojnim vrednostim za časovne analize posnetkov (glej Prilogo A6).

Preglednica 4: Mineralni indeksi.

Table 4: Mineral indices.

Indeks	Razmerje spektralnih kanalov
železov oksid	TM3/TM1
ilovnati minerali	TM5/TM7
železovi minerali	TM5/TM4
mineralni kompozit	TM5/TM7, TM5/TM4, TM3/TM1
hidrotermalni kompozit	TM5/TM7, TM3/TM1, TM4/TM3

3.8.3 Klasifikacija

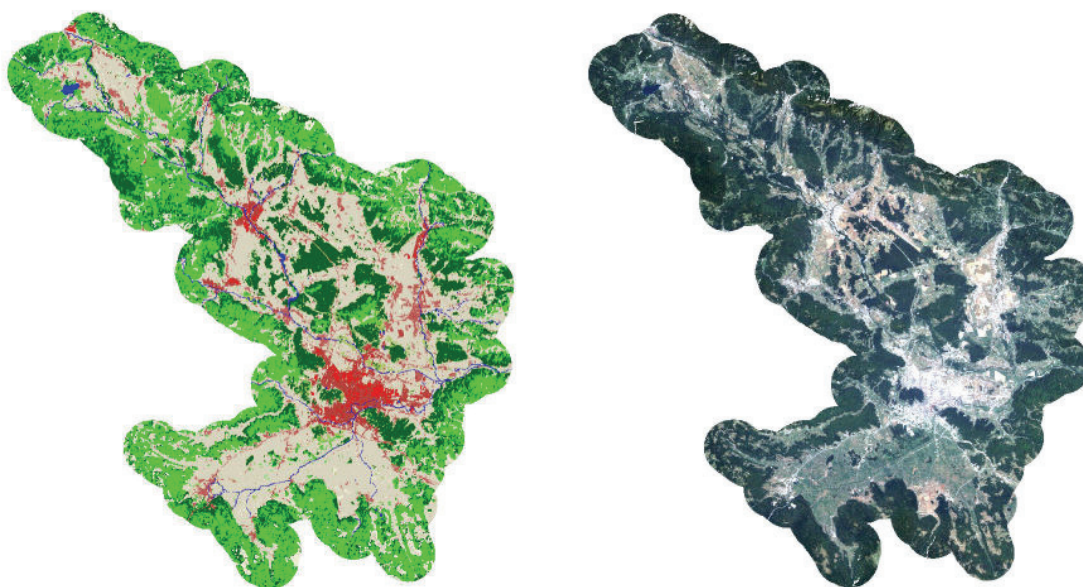
Posnetke iz vesolja ali zraka je prikladno opazovati, pa vendarle so šele tematske karte tiste, ki dajo podobam pomen (Oštir, 2006).

Glavni namen klasifikacije satelitskih in drugih posnetkov je prepoznavanje predmetov na zemeljski površini (Jensen, 1996; Oštir, 2006). Z digitalno klasifikacijo določimo razrede rabe tal z upoštevanjem spektralnih informacij, to je opazovanjem svetlostnih tonov na večspektralnih posnetkih. Tako pri vizualni interpretaciji kot pri digitalni obdelavi skušamo piksele na podobi razdeliti v razrede ali skupine, na primer: voda, iglasti gozd, listnati gozd, urbana površina. Vzorčni rezultat klasifikacije v deset razredov rabe tal naj prikazuje slika 9.

Klasifikacijo posnetkov omogoča tako imenovani spektralni podpis ali spektralni odziv. To je značilen način odboja elektromagnetnega valovanja v odvisnosti od valovne dolžine (Oštir, 2006). Na sliki 10 je za zgled prikazan spektralni podpis treh različnih tipov tal: vode, prsti (golih tal) in zelene vegetacije. Vidimo, da se odbojnost močno spreminja z valovno dolžino in prav odvisnost odboja od valovne dolžine je tista, ki omogoča določanje spektralnih lastnosti in s tem ločevanje med različnimi predmeti (Oštir, 2006).

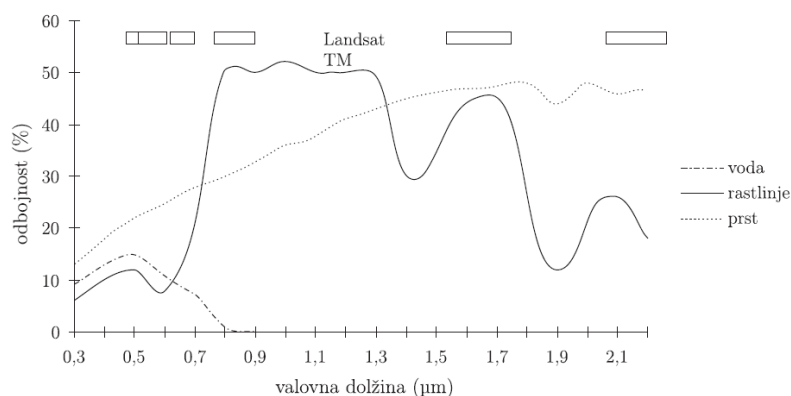
Ker je postopek klasifikacije koristen za razumevanje lastnosti in načina odboja različnih predmetov, ga podrobneje predstavljam še v Prilogi A6.

Analize sprememb na podlagi pokrovnosti / rabe tal (klasifikacije) v disertaciji nisem izvedla, saj bi to pomenilo opraviti vsaj 20 ločenih klasifikacijskih postopkov. Preizkusila sem nenadzorovano klasifikacijo, ki je sicer hitrejša, vendar ostane veliko dela z usklajevanjem razredov med različnimi posnetki. Zato klasifikacije v nadaljevanju ne obravnavam več bolj podrobno.



Slika 9: Primer rabe tal ter satelitskega posnetka 1992-08-18 (TM 321) na območju Ljubljana–Kranj z okolico.

Figure 9: An example of land use map and satellite image 1992-08-18 (TM 321) for the area of Ljubljana–Kranj and surroundings.



Slika 10: Spektralni podpis različnih tipov tal (vode, prsti in vegetacije). Označeni so tudi kanali senzorja Landsat TM (povzeto po: Sabins, 1996; Oštir, 2006).

Figure 10: Spectral signature for different landuses (water, vegetation, soil). Spectral bands of Landsat TM are shown as well (source after: Jensen, 1996; Oštir, 2006).

3.8.4 Pretvorbe spektralnih prostorov

Različni kanali večspektralnih senzorjev so si med seboj pogosto zelo podobni. Podatki senzorja Landsat TM imajo skoraj enake vrednosti v drugem in tretjem kanalu (zelena in rdeča). Odboj večine tipov tal je namreč v omenjenih dveh kanalih skoraj enak (Oštir, 2006).

Korelacijo med kanali in s tem podvajanje podatkov lahko zmanjšamo z uporabo posebnih transformacijskih tehnik, ki temeljijo na statističnih operacijah z večspektralnimi podatki in zahtevnejših obdelavah. Ena izmed pogostih transformacij za zmanjšanje števila kanalov se imenuje analiza glavnih komponent (angl. principal components analysis, PCA). Druga takšna transformacija je Kauth-Thomasova transformacija (KTT), kjer iz večkanalnega posnetka ustvarimo tako imenovano kompozitno podobo, ki v svojih komponentah prikazuje količine kot so svetlost, zelenost, vlažnost površja, megličavost in drugo (komponenti 5 in 6).

3.8.4.1 Analiza glavnih komponent

Glavni namen transformacije PCA je zmanjšanje razsežnosti podatkov; to je števila kanalov, s povečevanjem informacijske gostote (Watkins, 2007a; Oštir, 2006; Erdas Field Guide, 2005). Novi kanali, ki jih dobimo s tem postopkom, se imenujejo glavne komponente. Postopek skuša povsem statistično poiskati kar se da majhno število dimenzij s pestrim razponom vrednosti, to je veliko varianco.

Postopek iskanja glavnih komponent se začne z določanjem korelacij med posameznimi kanali podobe. Z metodami linearne algebre nato poiščemo lastne vrednosti (angl. eigenvalue) in njim pripadajoče lastne vektorje (angl. eigenvector). Ti določajo smeri glavnih komponent, to je osi z največjim razponom vrednosti oziroma največjo varianco. Smer prve komponente je določena s prvim lastnim vektorjem, njena dolžina pa s prvo lastno vrednostjo. Nazadnje podatke v vhodni podobi zavrtimo in jim spremenimo merilo – pretvorimo jih v glavne komponente. Z analizo glavnih komponent ustvarimo zbirko pravokotnih glavnih osi (Watkins, 2007a).

Z analizo glavnih komponent lahko sedem kanalov senzorja Landsat E/TM pretvorimo v zgolj tri kanale, ki vsebujejo skoraj 97 % informacij, vsebovanih v prvotnih kanalih. Prve štiri glavne komponente pogosto vsebujejo več kot 99 % izvorne podobe. Prva osnovna komponenta v grobem predstavlja povprečje kanalov prvotnega posnetka in je zato najbolj podobna seštevku vidnih kanalov 1 – 3. Druga je približna odslikava bližnjega infrardečega kanala (E/TM 4), tretja pa srednjega infrardečega (E/TM 5), zanimiva je tudi četrta, ki pokriva termični kanal, če je ta prisoten. Ostale komponente najpogosteje predstavljajo ali šum, dobro so lahko vidne proge skenerja ali manjše detajle, ki jih v originalnih kanalih zasenči višji kontrast.

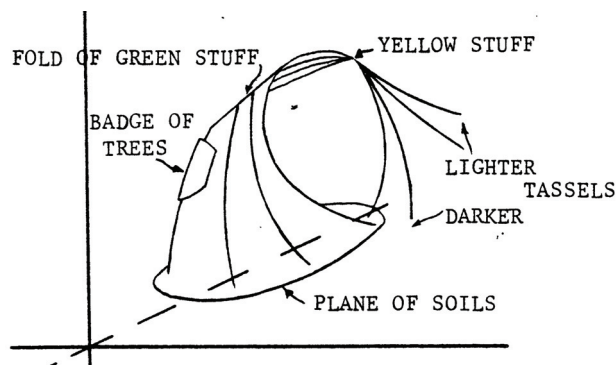
Če povzamemo, transformacija podob v glavne komponente ima naslednje prednosti: (1) večina variance v večspektralnih podatkih je skrčena v eno ali dve komponenti, (2) šum se združi v eni od nižjih komponent in (3) lahko se poudarijo spektralne razlike med materiali, ki v posameznih kanalih niso tako opazne (Jensen, 1996).

Interpretacija prvih nekaj glavnih komponent, pa naj gre za digitalno ali vizualno, je preprostejša od analize vseh kanalov določenega senzorja. Analizo glavnih komponent lahko torej izkoristimo za zmanjšanje števila kanalov ter s tem olajšanje digitalnih obdelav, pa tudi interpretacije rezultatov analize sprememb.

3.8.4.2 Kauth-Thomasova transformacija

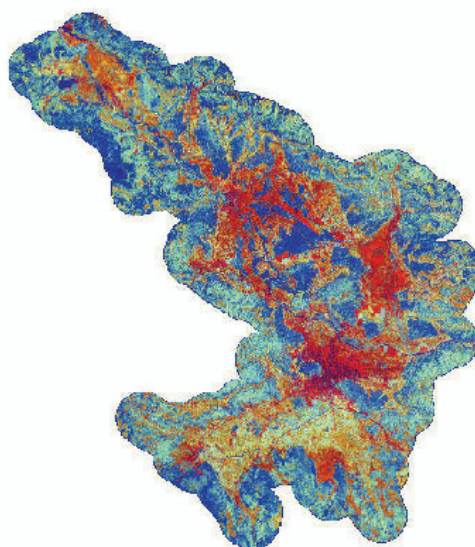
S Kauth-Thomasovo transformacijo iz večkanalnega posnetka ustvarimo t. i. kompozitno podobo. Kompozit je trikanalna podoba, ki praviloma vsebuje tri različne podatke (Oštir,

2006). Pri Kauth-Thomasovi transformaciji osnovne elemente kompozita določajo svetlost, zelenost in vlažnost površja.



Slika 11: S Kauth-Thomasovo transformacijo preoblikovan prostor kanalov. Transformacija se zaradi oblike, ki spominja na kapo v angleščini imenuje tudi tasseled cap (vir: Kauth in Thomas, 1976).

Figure 11: Spectral space transformed with Kauth-Thomas transformation idea. Since the shape of the result reminds on a Cap, the transformation is also called Tasseled Cap (source: Kauth and Thomas, 1976).



Slika 12: Rezultat Kauth-Thomasove transformacije posnetka 1992-08-18 na območju Ljubljana–Kranj z okolico za senzor Landsat TM. V rdeči, zeleni in modri barvi so prikazane svetlost, zelenost in vlažnost.

Figure 12: Kauth-Thomas Transformation of 1992-08-18 Landsat TM image of the Ljubljana–Kranj area and surroundings. In RGB colour composite are shown brightness, greenness and wetness.

Kauth-Thomasova transformacija uporablja enake ideje kot analiza glavnih komponent, le da temelji na empiričnih opazovanjih razvojnih ciklov vegetacije in ne na strogo matematičnih (statističnih) postopkih (Watkins, 2007b). Avtorja transformacije (Kauth in Thomas, 1976) sta namreč z opazovanji ugotovila, da lahko z zasukom koordinatnega sistema kanalov določimo

osi, na katerih sta zelo dobro predstavljena vegetacija, in sicer z dvema komponentama t. i. »zrelost« in »rumenost« ter prst (slika 11). Transformacija je odvisna od uporabljenih podatkov in je bila najprej razvita za senzor Landsat MSS. Kasneje so jo razširili na Landsat TM in ETM+ in še nekatere druge sisteme, tudi IKONOS in QuickBird.

Preglednica 5: Koeficienti Kauth-Thomasove transformacije v primeru senzorja Landsat TM.

Table 5: Kauth-Thomas Transformation coefficients for Landsat TM.

Landsat 5 TM	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	presečišče
svetlost/brightness	0.2909	0.2493	0.4806	0.5568	0.4438	0.1706	10.3695
zelenost/greenness	-0.2728	-0.2174	-0.5508	0.7221	0.0733	-0.1648	-0.7310
vlažnost/wetness	0.1446	0.1761	0.3322	0.3396	-0.6210	-0.4186	-3.3828
meglenost/haze	0.8461	-0.0731	-0.4640	-0.0032	-0.0492	0.0119	0.7879
komponenta 5	0.0549	-0.0232	0.0339	-0.1937	0.4162	-0.7823	-2.475
komponenta 6	0.1186	-0.8069	0.4094	0.0571	-0.0228	-0.022	-0.0336

Kauth-Thomasova transformacija določi tri nove glavne osi, ki se imenujejo svetlost (angl. brightness), zelenost (angl. greenness) in vlažnost (angl. wetness). Tem so kasneje dodali še os megličavosti (angl. haze) ter nič posebej poimenovani, komponenti pet in šest (Crist in Cicone, 1984; Crist in Kauth, 1986). Vrednosti uteži za posamezne kanale senzorja Landsat TM podaja preglednica 5. Svetlost je približno povprečje vrednosti v posameznih kanalih. Zelenost je povezana s kontrastom med vidnimi in bližnjimi infrardečimi kanali (zato tudi različni predznaki uteži). Vlažnost pa je podobno kot vegetacijski indeksi določena z razliko med srednjimi infrardečimi ter rdečim in bližnjim infrardečim kanalom. Ploskev, ki jo določata osi zelenost in svetlost, je povezana z vegetacijo, osi vlažnost in svetlost pa določata ploskev prsti (Watkins, 2007b). Kompozitno podobo, ki je rezultat Kauth-Thomasove transformacije, prikazuje slika 12.

3.9 Sklep

Geometrični popravki

Namen geometričnih popravkov je ugotavljanje in odpravljanje osnovnih geometričnih deformacij, ki so nastale v različnih situacijah in pogojih med snemanjem površja. To so popravek striženja, ki je posledica vrtenja Zemlje, popravek odmika od vertikale snemanja, ki je posledica manjših premikov same platforme, popravek podaljševanja pikslov zaradi odmika snemanja iz zenita ter popravek zaradi vpliva ukrivljenosti Zemlje. Končni cilj postopkov odpravljanja geometričnih nesoglasij je orientiran posnetek, ki prikazuje geometrično pravilne fizične objekte, predmete in pojave in je v izbranem (referenčnem ali lokalnem) koordinatnem sistemu. Tako transformiran v enotno in znano merilo predstavlja ustrezen medij za merjenje in zajemanje merske in semantične vsebine, v stvarnih merskih enotah.

Atmosferski popravki

V praksi oziroma pri aplikacijah daljinskega zaznavanja prav zaradi kompleksnosti numeričnega modela, ki simulira prenos energije skozi atmosfero, le redko srečamo podatke, obnovljene po zahtevnejših metodah. Ovira za uporabo teh je dostopnost (cena) programov ter

pomanjkljivost podatkov o stanju ozračja (meteorološke in fizikalne meritve) za serije satelitskih posnetkov. Za območje Slovenije pa je problem tudi v tem, da ne razpolagamo s terenskimi meritvami odboja površja, ki služijo za kalibracijo numeričnih modelov. Na splošno lahko tudi opazimo, da večina študij na podatkih daljinskega zaznavanja temelji na obnovi podatkov na podlagi ene od metod odstranitve vpliva atmosferskega odboja.

Če opravimo zapleteno atmosfersko korekcijo, ki upošteva lastnosti prenosa energije skozi ozračje, učinek sosedstva in atmosferski odboj, pridobimo podatke, ki imajo praviloma odstranjene meglice in obnovljen t. i. efektivni ali pravi odboj površja (tj. odboj kot bi ga izmerili na površju). V takšnem primeru rečemo, da smo opravili *absolutni popravek*, takšne podatke praviloma lahko med seboj že primerjamo in analiziramo. Če uporabimo eno od enostavnejših metod atmosferske korekcije, pridobimo podatke, ki lahko imajo odstranjene meglice ali pa ne (odvisno ali je v postopek vključen ta korak), odbojne vrednosti pa so obnovljene in popravljene zgolj za vpliv atmosferskega odboja (tj. odboj s primešanim vplivom učinka sosedstva in ostanki ne-modeliranega dela vpliva prenosa energije skozi ozračje). Takšne podatke je za primerjalne študije praviloma treba še *relativno povezati* – radiometrično standardizirati.

Ne glede na prednosti in slabosti enih in drugih atmosferskih korekcij, je za analizo več satelitskih posnetkov zelo pomembno, da jih obnavljamo in popravljamo sistematično, torej na kolikor je le mogoče enak način. Glede na raziskave, ki sem jih v praktičnem delu disertacije opravila, lahko rečem, da dajejo metode, ki uporabljajo princip minimuma histograma in princip linearne regresije podobne rezultate. Slabost teh metod se lahko pokaže, če na posnetku ni ustreznih temnih predmetov (gosta vegetacija, globoke sence). Zavedati pa se je treba tudi subjektivnosti izbire temnih predmetov: rezultati za gosto vegetacijo ali globoke sence namreč niso v vseh spektralnih kanalih primerljivi z rezultati, ki jih izpeljemo na podlagi globokih in čistih vodnih površin. Pri uporabi metod, ki temeljijo na usklajevanju histogramov med območji z meglicami in brez, pa se moramo zavedati, da so enostavnejše uporabe tega principa lahko zelo zavajajoče, celo neustrezne, saj takšna območja ponavadi niso primerljiva (enaka ali vsaj zelo podobna) ne v prostorski razporeditvi odbojnosti (lastnosti površja), ne v optični globini aerosolov (ki je lahko izrazito različna nad megličastimi območji in nad čistimi območji).

Po atmosferski korekciji se satelitska podoba zdi temnejša, a bolj kontrastna. Tudi relativna razmerja med spektralnimi kanali se spremenijo, saj vpeljemo različne konstante, ki odražajo lastnosti prenosa energije skozi ozračje v različnih spektralnih kanalih.

Na splošno velja, da so absolutne atmosferske korekcije ob predpostavki, da uspemo zagotoviti dovolj dobre atmosferske parametre, bolj natančne in točnejše od relativnih atmosferskih korekcij. Njihova največja slabost pa je, da so odvisne od številnih *in situ* podatkov, ki pogosto niso razpoložljivi (Callahan, 2003).

Topografski popravki

Kljub številnim in dolgoletnim raziskavam na področju topografske normalizacije težko zaključimo, da bi bila katerakoli metoda vsestransko učinkovita in vselej uporabna. Za kosinusne metode je značilno, da se obnove podob lotevajo samo z vidika modeliranja geometrije opazovanja. Nekatere, v koraku računanja koeficientov linearne regresije, vključujejo tudi možnost obravnave razlik v odbojnih lastnostih različnih tipov površja. Dozierjeva metoda skuša modelirati in odpravljati tudi naravo (vrsto) in stopnjo atmosferskih

vplivov, a, kot kaže, ne zmore obvladovati vseh situacij, zato lahko podoba po topografski normalizaciji vsebuje precej grobih napak.

Na učinkovitost metod topografske normalizacije vpliva tudi dejstvo, da odnosi, ki jih skušamo modelirati niso enostavni. Drugi razlog je ta, da na kakovost rezultatov močno vplivajo podatki o reliefu (kakovost in točnost DMR) ter medsebojna položajna usklajenost posnetka in DMR (registracija). Nadalje se je treba tudi zavedati, da pri topografski normalizaciji združujemo podatke o lastnostih površja ter podatke o terenu, ki jim je praviloma odstranjena informacija o pokrovnosti (predvsem višini vegetacijskega pokrova in drugih predmetov znatnih višin). Tako da v prihodnosti lahko pričakujemo, da bodo tudi rezultati topografske normalizacije občutno boljši, ko bomo razpolagali na primer z lidarskimi podatki na širšem območju.

Rezultat topografske normalizacije je podoba, pri kateri naj ne bi bilo več razlik zaradi položaja posameznega predmeta glede na vir sončevega obseva. Osvetlitev je izenačena na senčnih in sončnih pobočjih in je preračunana na ravnino (horizont). Topografsko normalizirana podoba daje videz, kot da smo površje sploščili – učinek smeri osvetlitve in vpliva reliefa na površju je odpravljen. Vendar se pri uporabi topografske normalizacije na razgibanem površju, še posebej pa v goratem svetu, pokaže še ena slabost metod, ki izhajajo iz modeliranja geometrije opazovanja na osnovi trigonometričnih funkcij.

Vpadni kot sonca namreč pogojuje, ali je nagnjena površina v senci ali ne (Zakšek, 2002; 2007). Kadar je vpadni kot Sončevih žarkov na zemeljsko površje manjši od zenitnega kota Sonca, je osončenost nagnjene površine večja kot osončenost horizontalne ploskve (in obratno). Če je površina v senci, je njena direktna osončenost enaka nič. Ali je neka površina v danem trenutku v senci, se določi na osnovi poznanega vpadnega kota Sončevih žarkov – ko je vpadni kot manjši od 90° . Ali je ob jasnem vremenu površina obsijana, je dejansko odvisno še od drugih pogojev, tj. od prisotnosti ovire med Soncem in površino. Če ovira je, nastane vržena senca. Kadar so Sončevi žarki vzporedni reliefu oz. je vpadni kot približno 90° , je površina zaradi raznih naravnih in antropogenih ovir le delno obsijana, senca je delna. Površina je v lastni senci, če je vpadni kot večji od 90° . Območja v senci torej prejmejo le difuzno svetlobo oziroma difuzno osončenost, ki je običajno mnogo šibkejša od direktne ter del osončenosti odbite iz okolice. Satelitski senzorji, ki snemajo v zenitu ali zgolj majhnem odklonu od te navpičnice, v območjih senc zaznajo odboj, ki pa je precej oslavljen.

Algoritmi topografske normalizacije območja senc na podlagi zgoraj opisanega razmerja zaznajo in jih praviloma ali izločijo iz nadaljnje obravnave ali pa jih moramo izločiti sami. Kosinus vpadnega kota namreč zavzame vrednosti med $[-1,1]$, kosinus naklona površja pa vrednosti med $[0,1]$. Za pripravo regresijskih spremenljivk, na primer pri Minnaertovem modelu, produkt teh dveh spremenljivk še logaritmiramo (preglednica 1). Negativne vrednosti se v teku postopka prepisujejo v nedefinirane vrednosti in so izključene iz nadaljnje obravnave algoritma. Rezultat topografske normalizacije je sicer obnovljena podoba, ki pa ima na območjih z algoritmom definiranih senc t. i. prazna mesta (angl. NoData). To je lahko še posebej moteče, če je obravnavano območje omejeno na hribovit oziroma gorski svet, saj cone brez podatkov lahko zasedejo tudi znaten del območja, pri čemer je ta delež odvisen predvsem od vpadnega kota Sončevih žarkov (Veljanovski et al., 2007).

Popolna radiometrična korekcija podob torej vključuje kalibracijo senzorja, odstranjevanje atmosferskih vplivov, topografsko normalizacijo in pretvorbo numeričnih vrednosti slikovnih

elementov na podobi v ustrezne odbojne vrednosti. Končen produkt je boljša ali slabša obnova *dejanskega odboja* za vsak piksel. A tudi, če opravimo vse korake radiometričnih korekcij, bodo med satelitskimi podobami še vedno določene razlike. Te so posledica nekaterih preostalih neodstranjenih vplivov in razlik v meteoroloških pogojih v času pred zajemom ali med zajemom, variacij zaradi letnih časov, variacij zaradi fenologije vegetacije in podobno ali pa dejanskih sprememb na površju. Če želimo odpraviti še tovrstne, preostale neželene razlike med podobami, moramo opraviti še t. i. radiometrično standardizacijo.

Radiometrična standardizacija

Radiometrična standardizacija skuša niz posnetkov, ki smo jih predhodno popravili za različne vplive, dokončno premakniti v nek skupen interval. Z drugimi besedami, radiometrična standardizacija skuša vpeti preostalo variabilnost med obdelanimi podobami v primež skupnega, dopustnega razpona vrednosti, kjer naj bi bile povprečne vrednosti primerljivih spektralnih kanalov med podobami čim bolj izenačene. Kot smo videli, večina metod izhaja iz linearne transformacije prilagajane podobe na referenčno. Velja omeniti, da dosežemo podoben učinek tudi z drugimi tehnikami, na primer s tehniko uravnoteženja histogramov, vendar so te, po lastnih izkušnjah, učinkovite le za majhna območja, kjer vladajo podobni pogoji (glede prisotnosti oblakov, vegetacijskega fenološkega cikla in podobno).

Spektralne pretvorbe

S spektralnimi pretvorbami pridobimo nove informativne vrednosti ali indikatorje površja. Za analizo sprememb so še posebej zanimive, saj, prvič, ponujajo opis in opredelitev izbranih lastnosti površja ter drugič, zmanjšajo razsežnost podatkov, to je število obravnavanih kanalov. Navedeno bistveno lajša interpretacijo rezultatov analiz.

Primerjava različnih postopkov predobdelave

Primerjalne študije vpliva postopkov predobdelave niso prav številčne. Kljub temu je več avtorjev prišlo do ugotovitve, da uporaba zapletenih (atmosferskih) popravkov ne vodi nujno k večji končni natančnosti v študijah analize sprememb. Songh et al. (2001) so na primer testirali in primerjali vplive enega relativnega (atmosferska normalizacija) in sedmih drugih atmosferskih popravkov (metoda temnega predmeta z upoštevanjem Rayleighevega sipanja in brez ter druge metode) ter ugotovili, da so rezultati zaznave in določitve sprememb v vseh primerih boljši, kot če atmosferskih popravkov ne opravimo. Prav tako so potrdili prvo ugotovitev, da bolj zapleteni algoritmi ne dajejo znatno boljših rezultatov.

Različne postopke in stopnje predobdelave sta testirala Collins in Woodcock (1996). Primerjala sta rezultate analize sprememb za tri stopnje: brez predobdelave (DN), srednja stopnja predobdelave (medsebojno prilagajanje DN) ter popolna radiometrična korekcija (do obnove odbojnih vrednosti površja). Povzela sta, da je vsaj minimalna stopnja radiometrične predobdelave za analizo sprememb nujna. Priporočata najmanj relativno standardizacijo med posnetki s postopkom regresije (relativni popravek). Ugotavljata pa tudi, da absolutni postopki (popolna radiometrična korekcija), z vidika povečane zahtevnosti in obsega dela in v primerjavi z rezultati enostavnejših relativnih postopkov niso bistveno bolj učinkoviti in ne povišajo znatno natančnosti rezultatov določitve sprememb (poslabšajo pa tudi ne).

Vpliv slabe registracije posnetkov na natančnost določanja sprememb so proučevali Townshend et al. (1992) ter Dai in Khorrām (1998). Na simuliranih podatkih posnetkov MODIS in Landsat MSS so ugotovili, da bi morala biti natančnost registracije najmanj 0,2

piksla ali boljša, če bi hoteli napake v vrednostih vegetacijskega indeksa omejiti na največ 10 %. Tudi Coppin in Bauer (1994) zagovarjata podpikslesko natančnost registracije, kot predpogoj za kakovostne analize in tipizacijo sprememb v gozdnem pokrovu.

Na splošno lahko zaključimo, da si le z izpeljavo kakovostne geometrične in radiometrične predobdelave lahko zagotovimo, da so ugotovljene prostorske ali časovne spremembe prave razlike med posnetki in ne tiste navidezne, ki so posledica razlik v slabi poravnavi posnetkov, odzivnosti in kalibraciji senzorja, vplivu razlik v sipanju in absorpciji valovanja v ozračju in/ali razlik v položaju Sonca (osvetlitvi površja).

4 PREGLED METOD ZA ČASOVNE ANALIZE SATELITSKIH POSNETKOV

Poglavje obravnava metodologijo časovnih analiz ter podaja pregled obstoječih tehnik, primernih za določanje sprememb na satelitskih posnetkih. Tehnike so predstavljene na kratko, podane so njihove slabosti ali omejitve in prednosti.

4.1 Splošno

Področje zaznave in določitve sprememb na podatkih daljinskega zaznavanja je staro dobri dve desetletji. Raznolikost podatkov in namenov proučevanj pa je velika, zato metode še niso niti povsem utečene niti izkoriščene. V obstoječi literaturi najdemo tri pomembnejše pregledne članke (Singh, 1989, Coppin et al., 2004, Lu et al., 2004), ki stanje na področju tehnik za zaznavo sprememb na podatkih daljinskega zaznavanja na različne načine, vsekakor pa dopolnjujoče sistematizirajo. Tudi primerjalne študije kakovosti in učinkovitosti različnih metod določanja sprememb ob identičnih izhodiščih (pogojih, predobdelavi) niso pogoste.

Slabše je z obravnavo koncepta spremembe ter kategorizacijo sprememb na podatkih satelitskih podob, torej kaj spremembe, ki jih opazujemo v danih okoliščinah, so, kaj predstavljajo v svetu stvarnosti in v kakšni meri pridobljeni informaciji lahko zaupamo. Skrbnejši analitiki vnaprejšnji opredelitvi pojma sprememb/e v izvajani študiji posvečajo del pozornosti, vendar na podlagi pregledane literature ugotavljam, da je večinski del raziskav in študij vendarle naravnani k induktivni in precej pragmatični tipizaciji sprememb.

V študijah analize sprememb torej ločimo dva koraka:

- zaznava oziroma izločitev / določitev sprememb ali kategorizacija sprememb, kar rešujemo z algoritmi za določanje sprememb ter
- razlikovanje ali karakterizacija (tudi klasifikacija) sprememb, postopek s katerim skušamo spremembe tudi označiti in jih interpretirati.

V prvem koraku gre predvsem za določitev položajev, kjer je prišlo do sprememb ter jakosti ali magnitude sprememb, v drugem koraku skušamo spremembo (vzorke sprememb) tudi vsebinsko ovrednotiti. Za prvi korak imamo na voljo številne algoritme, za drugi korak v tem pogledu ni utečene metodologije. Karakterizacija sprememb ostaja na strani lastnosti proučevanega pojava in je v veliki meri namembnostno naravnana.

Ne glede na uporabljeno metodologijo, si je pri proučevanju sprememb predhodno treba odgovoriti na naslednji vprašanji:

- Na kakšen način, tj. s kakšnimi parametričnimi opisi, lahko spremembo podamo (bodisi v pokrovnosti, rabi tal ali drugih informacijah, indikatorjih površja)?
- Katere postopke lahko uporabimo za lociranje, identifikacijo in meritev spremembe ter kako bodo izmerjene spremembe v dani študiji obravnavane?

Metoda oziroma tehnika za določanje sprememb je na aplikativni ravni praviloma izbrana posamični situaciji (namen raziskave, podatki) primerno. V osnovi so tehnike zasnovane tako, da so lahko splošno uporabne, do razlik med njimi pa prihaja predvsem z vidika:

- merila (ustreznost za globalno, regionalno, lokalno raven), torej vrste uporabljenih podatkov (kateri satelitski sistem in pripadajoča prostorska / radiometrična / spektralna / časovna ločljivost),
- predmeta opazovanja (zaraščanje / izsekavanje gozda, poplavljanje, urbanizacija, pustošenje požarov – takorekoč načina spektralnega odziva stvarnosti),
- vrste rezultata, torej ali želimo spremembe zgolj kartirati ali tudi klasificirati, statistično obdelati, prepoznati trende, odmike, simulirati, napovedovati v zveznem (prehodi) ali kategoričnem (drastične spremembe) smislu.

V nadaljevanju poglavja sledi pregled obstoječih metodoloških pristopov in pomembnejših tehnik za ugotavljanje in analizo sprememb v času na podatkih daljinskega zaznavanja.

4.2 Metodologija in tehnike za določanje sprememb na satelitskih posnetkih

Tehnike za proučevanje sprememb na podatkih daljinskega zaznavanja se delijo v tri skupine. Prvi dve sta osnovni metodološki skupini, tretjo lahko razumemo kot nadgradnjo analitične ravni, torej takole (Singh, 1989, Coppin et al., 2004, Lu et al., 2004):

- tehnike za primerjavo *para* podob (analiza stanj pred- in po-),
- tehnike za primerjavo ter analizo trendov in anomalij na več podobah (analiza časovne vrste; razvijamo krivuljo sprememb in spremljamo odklone, profile),
- metode za napovedno modeliranje (ekstrapolacija trenda razvoja sprememb; simulacije potencialnih dogodkov).

V razdelkih 4.2.1 do 4.2.3 podrobneje obravnavam vse tri skupine.

4.2.1 Tehnike za primerjavo para podob

Pri primerjavi para podob analiziramo stanje v časovnem trenutku t_2 glede na neko prejšnje stanje v trenutku t_1 . Tak pristop se pogosto uporablja v zvezi z nekim dogodkom (npr. zemeljski plaz, požar, poplava) ali pa za primerjavo dveh stanj v daljšem časovnem obdobju, zato se zanj uporablja tudi izraz *analiza pred- in po-* (dogodku ali preteku nekega časa).

V primeru primerjave dveh stanj, je poleg izbire ustreznega senzorja, pričakovane kategorije sprememb in algoritma za določitev sprememb, izrednega pomena izbira obeh datumov zajema (Coppin et al., 2004). Velja se držati preprostega pravila, da za opazovanje spremembe stanj izberemo nek jubilejni datum (obletnico). Na tak način se lahko že v

precejšnji meri izognemo neskladnostim ali razlikam v odbojnih lastnostih površja, ki so posledica faze vegetacije v danem letnem času ali razlikam med letnimi časi ter razlikam, ki so posledica različnih položajev Sonca. Seveda tudi na ta način ne moremo izključiti vseh neželenih razlik med posnetkoma. Saj so tudi na povsem »obletnih« datumih lahko prisotne znatne fenološke neskladnosti, kot posledica lokalnih meteoroloških razmer. Lastnosti letnega časa in lokalnih razmer različno močno in na različni način vplivajo na odbojne lastnosti površja v vidnem in v infrardečem delu spektra. Zato se nadalje velja držati še enega napotila, da sta za dvočasovne analize sprememb najustreznejša letna časa poletje in zima, ker so takrat fenološke lastnosti dosti bolj stabilne, kot je to v obdobju prebujanja oziroma rasti in poslavljanja oziroma odmiranja vegetacijskega pokrova.

Velikost časovnega razmika med obema datumoma (tj. primeren časovni interval) je v prvi vrsti odvisna od tega, kaj opazujemo. Za opazovanje uspešnosti obnove (regeneracije) gozda bo morda primeren interval na tri leta. Upoštevaje vrsto drevja (s tem pa hitrosti rasti mladih dreves) bi se kot ustrežnejši lahko izkazal tudi daljši interval, na primer pet ali celo deset let. Podobno bi za transformacijo zelenih površin v izgrajene lahko opredelili ustrezen časovni interval, če vemo, kdaj se je izgradnja začela in s kakšno hitrostjo je napredovala.

Tehnike za primerjavo para podob delimo na dve skupini, in sicer glede na vrsto vhodnih podatkov (Singh, 1989, Coppin et al., 2004, Lu et al., 2004). Ločimo tehnike za analizo na kvantitativnih (zveznih) podatkih, ki kažejo nek obseg meritev, to so npr. razlike v odbojnih vrednostih, vegetacijskem indeksu, vlažnosti površja ali pa temperaturi ter tehnike za analizo na kvalitativnih (kategoričnih) podatkih, ki že ponazarjajo različne vrednostne skupine, kategorije, kot so npr. razredi rabe tal / pokrovnosti.

4.2.1.1 Razlikovanje podob

Po idejni zasnovi je razlikovanje podob (angl. image differencing) zagotovo najpreprostejša tehnika v analizi sprememb. Gre za to, da kasnejšo podobo $P(t_2)$ od zgodnejše $P(t_1)$ odštejemo, nato pa v rezultatu, tj. podobi razlik, P_R , proučujemo ostanke. Iščemo lahko absolutno ali relativno razliko med parom podob, $P_{R\text{ ABS}}$ oziroma $P_{R\text{ REL}}$ (enačba 29), izračun pa poteka po posameznih spektralnih kanalih ali indikatorjih površja:

$$\begin{aligned} P_{R\text{ ABS}} &= P(t_2) - P(t_1), \\ P_{R\text{ REL}} &= \frac{P(t_2) - P(t_1)}{P(t_1)} \end{aligned} \quad (29)$$

\Rightarrow če $P_R \cong 0 \rightarrow$ ni sprememb.

Rezultat je torej podoba razlik, ki praviloma vsebuje širši razpon vrednosti t. i. ostankov. Te je treba na ustrezen način obravnavati (jakost, kategorija), saj le tako lahko ovrednotimo izražene spremembe. Najpogostejši načini razslojevanja magnitude sprememb so (Coppin et al., 2004, Lu et al., 2004): prikaz z izbranim odstotkom spremembe (npr. 10 % deleži relativne razlike), prikaz s faktorjem standardnega odklona ali klasificirane vrednosti standardizirane podobe razlik (npr. z-vrednosti razporejene v n razredov).

Težavna je izbira in *določitev mejne oziroma vhodne vrednosti* za razlikovanje med dejansko spremembo in naravno variabilnostjo opazovanega pojava (Lu et al., 2004). Konkretnih

napotkov za rešitev tega problema ni. Če bi poznali dejansko stanje v naravi v času obeh posnetkov, bi bila naloga trivialna. Za oceno meje za nespremenljivost zato najpogosteje izhajamo iz predpostavke, da se večina območja (če ne obravnavamo zgolj neke lokacije spremembe) ni spremenila. V tem primeru in če na posnetkih ni večjega šuma (oblaki, meglice, neodstranjeni atmosferski in topografski vplivi), so razlike porazdeljene normalno. Za izhodiščno mejno vrednost nato lahko uporabimo kriterij na primer 1 standardnega odklona (STD). To pomeni, da se območja, katerih vrednost na podobi razlik je znotraj odklona 1 STD, štejejo kot območja, kjer značilne spremembe ni, območja izven tega odklona, pa naj so pozitivnega ali negativnega predznaka, pa za območja raznih sprememb (glej tudi sliko 33). Odvisno od okoliščin (spektralnih lastnosti satelitskega posnetka, tipologije primerjave ter naravnih in odbojnih lastnosti opazovanega predmeta) so lahko primerne tudi višje ali nižje vrednosti STD. Alternativa za določitev mejne vrednosti je uporaba naravnih preskokov v histogramu podobe razlik ali podobe odstotka spremembe, še sploh pa je tak način primernejši in pravilnejši, če porazdelitev vrednosti v podobi razlik ni normalna. Za situacije, ko sta posnetka med seboj res dobro usklajena, je primerna tudi določitev mejne vrednosti na podlagi deleža maksimalnega odklona (npr. polovica maksimalnega odklona).

Dobra stran tehnike razlikovanja podob je njena enostavnost in neposredna primerjava vrednosti. Slabost pa je predvsem v težavnosti določitve optimalne mejne vrednosti, ki naj splošno opredeljuje takšno spremembo stanja, da lahko govorimo o dejanski spremembi ter težavni interpretaciji magnitude sprememb, kadar opazujemo več predmetov hkrati (še sploh če obravnavamo absolutne razlike majhnih števil in velikih števil). Torej, če nas zanima zlasti lega in obseg korenitejših sprememb na površju, ne pa tudi stopnjevanje jakosti znotraj zaznane spremembe (kategorizacija in karakterizacija sprememb), so tehnike razlikovanja podob zelo priročne.

4.2.1.2 Deljenje podob

Tehnika deljenja podob (angl. image rationing) stanji na paru podob med seboj primerja tako, da podobi (za vsak par spektralnih pasov) deli. V rezultatu (podoba razlik) znova proučujemo ostanke, pri čemer vrednost 1 in blizu 1 ponazarja območja, kjer sprememb ni.

$$P_R = \frac{P(t_2)}{P(t_1)} \quad \Rightarrow \text{če } P_R \cong 1 \rightarrow \text{ni sprememb.} \quad (30)$$

Vedeti je treba, da mera relativne spremembe pri deljenju podob ni povsem simetrična okoli vrednosti 1, lahko se tudi zgodi, da je bimodalna. Zato je pred določanjem mejne vrednosti za spremembo podobo priporočljivo transformirati – logaritmirati, oziroma uporabiti naravne preskoke v histogramu, če so ti prisotni, ali odstotke razlik ločeno za pozitivne spremembe (prirastek) in negativne spremembe (primanjkljaj).

Za obe doslej opisani metodi je nujen pogoj visoka izhodiščna primerljivost podob (položajna usklajenost, radiometrične lastnosti posnetka), sicer so rezultati lahko dvomljivi in zavajajoči (zavajajoče ali navidezne spremembe, neprave spremembe).

4.2.1.3 Regresijsko razlikovanje

Matematični model, ki bo opisoval ujemanje med dvema posnetkoma različnih datumov, a enakega območja, lahko razvijemo preko linearne regresije (Coppin et al., 2004; Lu et al. 2004). Predpostavka pristopa je v tem, da je vsak piksel na posnetku iz kasnejšega datuma $P(t_2)$ v linearni odvisnosti od istoležnega piksla na posnetku zgodnejšega datuma $P(t_1)$, v vseh spektralnih kanalih. Ker regresijske tehnike nasploh izhajajo iz obravnave razlik v srednji vrednosti in varianci med piksli obeh datumov, iz tega sledi, da bo pristop učinkovit in statistično značilen le, če med obema datumoma ni prišlo do obsežnih sprememb (delež sprememb glede na celotno območje je majhen). Podobo regresijskih ostankov in velikosti teh nato obravnavamo kot indikator vzorca sprememb.

V primeru, ko vemo ali sumimo, da so med parom podob prisotne tudi razlike, ki so posledica razlik pri zajemu (npr. različen senzor ali sprememba v delovanju sensorja), ali pa predobdelava ni bila najbolj uspešna, je uporaba tehnike regresijskega razlikovanja (angl. regression differencing) primernejša kot neposredna primerjava (Lu et al. 2004). Pri tem gre za to, da časovno prej zajet posnetek obravnavamo kot neodvisno spremenljivko in kasneje zajet posnetek kot odvisno spremenljivko v linearni regresiji. Premico in naklon regresije uporabimo kot iskana parametra začetne vrednosti (offset ali presečišče = a) in prirastka (gain ali naklon regresijske premice = b) za prilagoditev lastnosti zajema prej zajetega s kasneje zajetim posnetkom. Predpostavka je v tem, da ustvarimo napoved kasnejšega posnetka, pri katerem so vrednosti takšne, kot bi jih smeli pričakovati, če ni prišlo do nobenih drugih sprememb razen teh, ki jih povzročajo spremembe v sensorju, torej v začetni vrednosti in prirastku. Enačba za opisano se glasi:

$$P(t_2)_{\text{napovedani}} = a \cdot P(t_1) + b . \quad (31)$$

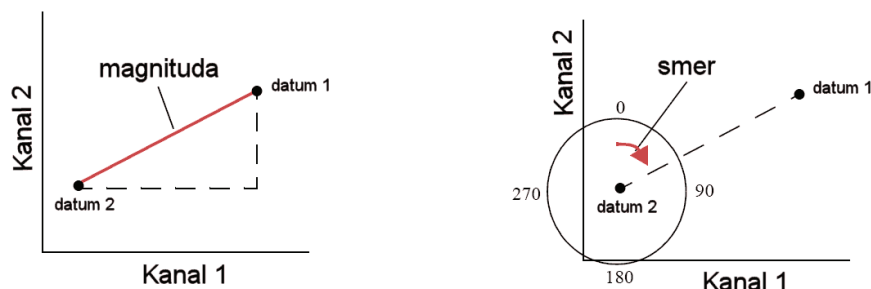
Ob takšni predpostavki lahko v analizo sprememb vključimo dejansko kasnejšo podobo ter napovedano kasnejšo podobo. Vendar bo tehnika učinkovita in bo dala smiseln rezultat le, če sta si obe vhodni podobi podobni po spektralnih in numeričnih značilnostih. Ali z drugimi besedami, da ne predstavljata pogojev in stanja, ki so si zelo različni v obeh datumih zajema (neenakomerna razporeditev meglic, veliko oblakov, različno stanje vegetacije in podobno).

Problem tehnike regresijskega razlikovanja za določanje sprememb je težavna določitev meje za ločevanje sprememb od nesprememb. Več študij uporabe regresijskega razlikovanja je pokazalo, da so rezultati, ob primerni določitvi mejne vrednosti, komaj zaznavno boljši od rezultatov, ki jih dobimo z eno-variantnimi tehnikami razlikovanja (Singh, 1989).

Postopek lahko uporabimo na opisan način ali pa kot predpripravo podob (prilagoditveni postopek za zagotavljanje primerljivosti) za druge tehnike iskanja in določanja sprememb.

4.2.1.4 Vektor sprememb

Pri analizi vektorja sprememb (angl. change vector analysis) se podobno kot pri prejšnjih tehnikah ustvari toliko podob razlik, kolikor je parov ustrežajočih si spektralnih kanalov ali indikatorjev površja (Eastman, 2006; Coppin et al., 2004; Lu et al. 2004). Te podobe razlik, za katere lahko uporabimo poljuben operator (absolutna, relativna razlika), se kvadrirajo in seštevajo. S kvadriranjem dobimo podatek o velikosti (magnitudi) sprememb (slika 13).



Slika 13: Ilustracija določitve smeri in jakosti sprememb z metodo vektorja sprememb.

Figure 13: Illustration of magnitude and azimuth calculation principle with change vector analysis.

Podoba tako prikazuje razdalje v položaju med enim (t_1) in drugim datumom (t_2), v istih enotah kot so vhodne podobe (odboj, radianca, temperatura, DN). Vselej kadar obravnavamo le dva spektralna kanala (tj. dva za vsako od podob prej $P(t_1)$ in po $P(t_2)$), je mogoče ustvariti tudi podobo smeri, ki ponazarja smer spremembe v spektralnem prostoru. Rezultat je podoba azimutov, ki se merijo v smeri ure od vertikale kasnejšega datuma (t_2).

Podoba magnitude sprememb podaja prostorski vzorec sprememb, podoba azimutov pa naj bi podprla samo karakterizacijo sprememb (Eastman, 2006). Slaba stran metode je, da je kljub dobrim namenom precej težko interpretirati informacijo, ki prikazuje smeri sprememb v spektralnem prostoru na zveznih ploskvah.

Prvi samodejni algoritem za določanje sprememb po principu analize vektorjev sprememb so razvili konec 70-tih let prejšnjega stoletja v ZDA (Malila, 1980). Ta algoritem je upošteval prostorske značilnosti območja, in je deloval v treh korakih:

- posnetke je najprej pretvoril v komponente Kauth-Thomasove transformacije,
- nato je določil značilne ali sorodne prostorske vzorce (segmente) s postopkom segmentacije,
- nazadnje je opravil še karakterizacijo premika posameznega segmenta v spektralnem prostoru z vidika zaznane magnitude in azimuta.

Današnji algoritmi, vključeni v programe za obdelavo satelitskih posnetkov, so poenostavljeni do te mere, da na zveznih podatkih ne opravljajo drugega koraka (segmentacije). Zato je tudi interpretacija podobe azimutov težko razumljiva. Nasprotno, če opravljamo analizo na kategoričnih podatkih, lahko uspešno izkoristimo prednosti metode za kategorizacijo sprememb – podobo azimutov.

4.2.1.5 Dvočasovne linearne transformacije podatkov

Za analizo sprememb v dveh datumih lahko uporabimo tudi linearne transformacije podatkov oziroma spektralnih prostorov (Coppin et al., 2004; Lu et al. 2004; Singh 1989). Gre za to, da podatke dveh stanj zložimo v $2n$ -razsežni prostor, kjer n predstavlja število kanalov posnetka. Linearne transformacije zgostijo informacije v med seboj ortogonalne komponente na tak način, da so te med seboj nekorelirane. Najpogosteje uporabljeni linearni transformaciji sta analiza glavnih komponent (PCA) in Kauth-Thomasova transformacija (KTT).

Kakšne oziroma katere informacije se zgostijo v glavnih komponentah, če je analiza PCA uporabljena na enem posnetku, so podane v poglavju 3.8.4.1. Za glavne komponente, uporabljene na kompozitu dveh časovno različnih posnetkov, pa je težje izpeljati splošne lastnosti komponent zgolj na osnovi vizualne ocene. Vsebino glavnih komponent kompozita si lahko razložimo le ob sočasnem proučevanju strukture lastnih vrednosti podatkov (angl. eigen values) in videza komponent (Fung in LeDrew, 1987; Collins in Woodcock, 1994; Coppin et al., 2004). Velja tudi, da vrstni red komponent pri veččasovnih kompozitih ni ustaljen. Običajno je prva komponenta in še ena kasnejša tudi tu povprečje vidnega dela spektra enega in drugega posnetka, dve komponenti prikazujeta IR kanal 4 enega in drugega posnetka, potem pa sledijo še komponente nižjega reda s preostalo vsebino, od katerih nekatere povzemajo tudi razlike med obema posnetkoma. Te komponente je mogoče uporabiti za identifikacijo položaja ali vzorca sprememb, medtem ko same statistike glavnih komponent ni mogoče neposredno uporabiti za analizo vzorcev sprememb. Opozoriti velja, da ni nujno, da so v komponentah, ki povzemajo razlike, razlike sežete v smislu neposredne podobe razlik med kanali (torej odštevanja med kanali). Večinoma gre za bolj zapleteno razmerje, kot na primer razlike v svetlosti tal ali v vlažnosti ali v zelenosti, ki je bližje razmerju kanalov (bližnja IR / rdeča), kot pa odštevanju v zelenem delu spektra (Fung in LeDrew, 1987).

Ker naloga ni enostavna, se glavne komponente kot metoda za empirično določanje sprememb redko uporablja. Če pa dobro poznamo območje in vemo, kje gre pričakovati spremembe, je interpretacija in izbira komponent, ki kažejo na razlike med posnetkoma, lahko dosti lažja in metoda primerna.

Postopek glavnih komponent (PCA) je mogoče učinkoviteje uporabiti na prilagojenem vhodnem nizu podatkov. Gre za nekakšen *selektivni pristop določanja sprememb z glavnimi komponentami*. Pri tem namesto spektralnih kanalov obeh posnetkov v kompozit za analizo PC zložimo podatke vegetacijskega indeksa enega in drugega posnetka ali komponente KTT ali druge indikatorje površja. Več avtorjev je na ta način v glavnih komponentah dosti bolj neposredno prepoznalo spremembe, do katerih je prišlo med obema datumoma. Še več, kaže, da tak pristop omogoča zaznavo kompleksnejših odnosov sprememb, tj. korelacijskih odnosov sprememb. Coppin in Bauer (1994) sta na podlagi pristopa PCA na vegetacijskih indeksih v drugi komponenti prepoznala odličen indikator za spremembe v zmernem gozdnem pokrovu srednje in severne Amerike. Kwarteng in Chavez (1998) sta na podoben način prepoznala spremembe v mestu Kuwait in okolici, in sicer v urbanizaciji, rasti vegetacije in vlažnosti tal priobalnih predelov. Collins in Woodcock (1994) sta na osnovi vpeljanih komponent KTT dveh posnetkov uspešno določila komponente veččasovnih kompozitov svetlosti tal, zelenosti in vlažnosti ter komponento z vzorci sprememb.

4.2.1.6 Analiza prostora časovno večrazsežnih predmetov

Algoritem za analizo prostora časovno večrazsežnih predmetov (angl. multidimensional temporal feature space analysis) uporablja prekrivanje podob, kot tehniko digitalne izboljšave za vizualni prikaz in razlikovanje sprememb na zaslonu (Coppin et al., 2004; Lu et al. 2004; Singh 1989). Gre za to, da v enem koraku združimo največ tri primerljive kanale ali indikatorje površja iz treh različnih datumov. Vzamemo npr. $NDVI(t_1)$, $NDVI(t_2)$, $NDVI(t_3)$ in jih prikažemo kot kompozit v modri, zeleni in rdeči barvi. Korak lahko ponavljamo in vnašamo poljubno kombinacijo kanalov. V dani kombinaciji se spremembe prikazujejo v posameznih oziroma kombiniranih barvah.

Vzorec sprememb, ki ga vidimo na zaslonu, ponuja prostorsko razporeditev sprememb in ob različni kombinaciji kanalov lahko tudi vpogled v součinkovanje spektralnih informacij. Ker je tehnika v prvi vrsti vizualna, dobimo malo informacij v zvezi s kvantitativno in kvalitativno naravo sprememb. Tehnika je priročna za hiter vpogled v lastnosti primerjanih posnetkov ali maskiranje manjših območij sprememb.

4.2.1.7 Hibridne metode

Cilj hibridnih metod je, da bi zmanjšali vpliv in prisotnost napak, zagrešenih s slabostmi posamičnega algoritma za določitev sprememb (Coppin et al., 2004). Hibridne metode iz tega razloga združujejo več različnih pristopov, torej bodisi

- več različnih tehnik za določanje sprememb bodisi
- več sorodnih indikatorjev površja,

nato pa na različne načine integrirajo, analizirajo in povzemajo rezultate vpeljanih algoritmov oziroma podatkov. Ena od možnosti za povzemanje rezultatov je metoda z glasovanjem, kjer na primer postavimo pogoj, da gre za spremembo le, če so vsaj trije od petih algoritmov dani piksel ali območje opredelili za spremenjen/o, v nasprotnem primeru pa prave spremembe ni.

4.2.1.8 Križni preizkus pripadnosti

Če analizo sprememb izvajamo na kvalitativnih ali kategoričnih podatkih je ustrezna tehnika križni preizkus pripadnosti (Coppin et al., 2004; Lu et al. 2004; Singh 1989). Tehnika je poznana tudi pod imenom post-klasifikacijska primerjava (angl. postclassification change detection). Rezultat je večdelen. Preglednica pripadnosti kaže frekvenčno porazdelitev, tj. razrede, ki se niso spremenili (po diagonali) ter razrede, ki so se spremenili (izven diagonale). Logičen predpogoj je, da imata podobi primerljive razrede (po številu in vsebini). Z indeksom ujemanja Kappa dobimo podatek o stopnji ujemanja med podobama, tako za celotno podobo kot za posamezne razrede. Podobo križne pripadnosti lahko nato klasificiramo v podobo sprememb ali podobo ujemanja.

Dobra stran tehnike je enostavna in neposredna interpretacija, zato je med vsemi najbolj priljubljena. Dobimo vpogled v prehajanje, transformacijo in ohranjanje razredov oziroma kategorij (razredi rabe tal / pokrovnosti) tako v atributnem ali vsebinskem smislu kot tudi položajnem (povečanje, zmanjšanje, premikanje meja razredov). Omejitev tehnike je, da je primerna le za opazovanje tistih pojavov in predmetov, ki jih lahko kategoriziramo v nekem absolutnem smislu ali kakovostno (primerljivo za vse vhodne podatke) klasificiramo.

4.2.2 Tehnike za primerjavo več podob

O primerjavi več podob govorimo, kadar primerjamo niz podob oziroma niz parov podob. V tem primeru nas ne zanima samo *kje* in *kaj* se je med enim in drugim datumom spremenilo, marveč želimo opazovati tudi s kakšno dinamiko in/ali odkloni se spremembe v prostoru odvijajo. Pridobiti želimo t.i. krivuljo sprememb, ki jo opredeljujejo profili stanj v obravnavanih časovnih segmentih. Praviloma je pogoj zadosti dolga časovna vrsta ustreznih satelitskih posnetkov, torej primerno dolgo obdobje opazovanja za opazovani pojav.

Ustreznost satelitskih posnetkov gre razumeti predvsem v luči izbire posnetkov (oblikovanja časovne vrste) z vidika periodičnosti in fluktuacije (vegetacijske fenološke lastnosti) znotraj letnih časov in/ali med njimi. Razlika nastopi med tem ali gre za opazovanja enoletnega/ih cikla/ov, oziroma odklonov med enoletnimi cikli, ali za periodična večletna opazovanja razvoja in trendov (Eastman, 2006; Coppin et al., 2004). Da bi obšli problem izbire optimalnih datumov zajema, se predvsem na področju ekosistemskega monitoringa (vegetacijske študije) pogosto uporablja primerjavo na t. i. krivulje ali profile razvoja znotraj posameznih letnih časov (Coppin et al., 2004; Coppin in Bauer, 1994). Določitev takšnih »sezonskih« krivulj zahteva (tudi večletno) analizo časovno dovolj podrobne vrste posnetkov ter analize indikatorjev različnih in značilnih lastnosti površja ali vsaj tistih, ki so predmet opazovanja (npr. iglastega gozda, listnatega gozda, koruznih polj in podobno). Pogosto se takšne, referenčne ali značilne krivulje (profile) oblikuje na osnovi dolgoletnega povprečenja podatkov senzorjev, ki podatke o površju zajemajo dnevno (na primer senzorji AVHRR, SeaWIFS, MODIS, SPOT Vegetation). Pridobitev značilnih krivulj nam nato omogoča:

- letno spremljanje značilnejših odklonov v nastopu izbranih ključnih dogodkov v rasti različnih tipov indikatorjev površja ter
- spremljanje splošnih (večletnih, dolgoročnih) trendov razvoja posamičnih indikatorjev površja.

Coppin et al. (2004) povzemajo, da je zaznava sprememb, ki temelji na takšnih profilih, ustrezna za regionalne študije območij, ki jih prizadevajo klimatske spremembe, fenološke modifikacije ali spreminjanje letne količine biomase.

Ena od prednosti tehnik, ki temeljijo na primerjavi z referenčnimi profili, je zmanjšanje vpliva fenoloških razmer na zaznavo in določitev sprememb, saj so bili podatki zbrani čez celotno obdobje rasti vegetacije. Na ta način lažje razločimo spremembe, ki so neposredno vezane na letne čase, od ostalih sprememb. Velika slabost, omejitev in problem je lahko prostorska ločljivost, ki je pri posnetkih, ki imajo visoko časovno ločljivost (npr. dnevno) in jih rabimo za oblikovanje značilnih krivulj, praviloma majhna (500 m, 1 km, 5 km). Majhna prostorska ločljivost tudi zmanjšuje podrobno kategorij sprememb, ki jih sicer oziroma z drugimi senzorji lahko zaznamo in opazujemo.

Princip krivulj sprememb ali profilov se navkljub opisanim problemom glede fenološke variabilnosti pogosto uporablja kot razširitev dvočasovnih analiz na analizo vrste podob. Značilne krivulje lahko nadomesti tudi stanje posnetka, ki ga izberemo za referenčnega (referenčno stanje). Referenčni posnetek mora odražati najbolj splošno stanje, tako z vidika atmosferskih razmer med zajemom, kot stanja površja. Dobrodošlo, ne pa nujno, je, da z vidika časovne umeščenosti v vrsti posnetkov, predstavlja približno sredino. S tem sta primerjavi stanja pred in po v seriji profilov bolj izenačeni, in je prenos relativnih odklonov (morebitnih napak) uravnotežen na oba konca. Izvajamo lahko bodisi (glej tudi poglavje 5.7.2.1 ter sliko 49):

- primerjavo stanj v postopnem smislu, tj. primerjamo relativne prirastke in upade med časovno zaporednimi pari posnetkov bodisi
- primerjavo stanj v kumulativnem smislu, ko prirastke in upade vselej določamo in primerjamo na referenčni posnetek (referenčno stanje).

Za katerega od pristopov se odločimo, je odvisno od narave opazovanega pojava in namena časovne analize, pa tudi od dosežene kakovosti in učinkovitosti predobdelave (standardizacije) posnetkov. Postopek in vsebina rezultatov ostajajo podobni, pozorni pa moramo biti na porazdelitev navideznih ali nepravih sprememb med obravnavanimi sekvencami.

Analize sprememb na časovnih vrstah torej izhajajo iz primerjave časovnih krivulj oziroma trajektorij ali časovnih profilov enega ali več indikatorjev površja, in sicer postopoma z naraščajočim letnim časom ali leti. Kadar se časovna trajektorija enega ali več indikatorjev površja za dani piksel znatno odmakne od t. i. normalne krivulje (ali povprečne, optimalne, referenčne – odvisno od namena študije), zaznamo spremembo dogodka ali procesa.

Podobno kot je pri dvočasovnih analizah treba določiti mejno vrednost za ločevanje identificiranih sprememb od nesprememb, je treba tudi pri analizi časovne vrste opredeliti ustrezno mejno stopnjo. Tako imenovani parameter spremembe naj bi povzel značilen odklon, deviacijo ali anomalijo od vrednosti normalne krivulje ali vrednosti referenčnega profila. Za vrednosti, ki presegajo parameter spremembe, potem lahko rečemo, da so zaznane spremembe. O določitvi takšnega parametra spremembe, označimo ga z Δ , ni veliko informacij, ena od možnosti izračuna je naslednja (Myneni et al., 1997; Coppin et al., 2004):

$$\Delta = \frac{P(t_i) - P(t_{ref})}{\sigma_{ref}}, \quad (32)$$

kjer je $P(t_i)$ vrednost indikatorja površja v posnetku t_i , $P(t_{ref})$ je ali referenčna vrednost časovne vrste ali neka povprečna vrednost na katero primerjamo stanje opazovanih, ostalih posnetkov ter σ_{ref} standardni odklon referenčne vrednosti časovne vrste.

Več primerov analiz časovnih trajektorij priča, da so uporabne tako za zaznavo in določanje nenadnih sprememb, kot tudi za zaznavo subtilnejših preobrazb površja. Pogosto so v določanju manj izrazitih prehodov in preobrazb celo točnejše od klasičnih dvočasovnih pristopov (Coppin et al., 2004). V nadaljevanju sledi nekaj primerov tehnik za časovno primerjavo vrste posnetkov.

4.2.2.1 Analiza časovnih vrst

Analiza časovnih vrst (angl. time series analysis) ponuja rezultate tako v prostorskem (lokacijskem) kot časovnem smislu (grafii dinamike in dogajanja). Osnovni princip analize je v tem, da analizira celotno vrsto podob na podlagi analize standardiziranih glavnih komponent. Ustvarjen je urejen niz nekoreliranih komponent podob, kjer vsaka izraža neke osnovne informacije o značilnih vzorcih skozi čas (trendi, preskoki, periodičnost, sezonski učinki in podobno), in sicer v podatkih z zaporedoma manjšo magnitudo (v smislu celotne pojasnjene variabilnosti v originalnem nizu podob). Običajno z 10-12 komponentami lahko povzamemo vse bistvene lastnosti časovne vrste podob (Eastman, 2006; Lu et al., 2004).

Rezultat analize časovne vrste pregledamo preko analize podob komponent (prostorski rezultat) v kombinaciji s komponentnimi utežmi (angl. loadings), ki jih štejemo za časovni rezultat (Eastman, 2006). Podoba prve glavne komponente opisuje vzorec, ki razloži največjo stopnjo variacije med podobami. Uteži pa kažejo na stopnjo, s katero so originalne podobe v

korelaciji s to podobo komponent. Značilno je, da je večina podob v močni korelaciji (tj. med 0,93 in 0,98) s podobo prve komponente.

Če območje, ki ga proučujemo, ni zelo majhno, potem prva komponenta najverjetneje predstavlja tipično ali značilno vrednost cele vrste. In ker je vsaka komponenta nekorelirana z drugimi, vse naslednje zaporedne komponente predstavljajo neko spremembo. Postopek analize rezultata je nekakšna zaporedna analiza nadaljnjih ostankov. Visoke pozitivne vrednosti na podobi lahko interpretiramo kot območja, ki so v močni korelaciji s časovnim vzorcem v grafu uteži, visoke negativne vrednosti pa so v močni korelaciji z inverznim grafom.

Tako kot za večje anomalije na podobi verjamemo, da predstavljajo območja, ki so močno povezana (pozitivno in negativno) s časovnimi utežmi, lahko časovna razdobja z visokimi pozitivnimi utežmi smatramo kot tista, ki imajo prostorski vzorec zelo podoben tistemu v komponentni podobi, tista z visokimi negativnimi utežmi pa na enak način v povezavi z inverznim vzorcem (inverzna paleta v inverznem grafu).

Analiza časovne vrste je induktiven postopek, ki skuša izolirati glavne komponente variacij skozi čas. Interpretacija rezultatov, ki nastanejo pri izvedbi analize časovne vrste, zahteva previdnost in potrpežljivost. Ob pravilni interpretaciji se lahko odstrejo številne poučne lastnosti časovne vrste podatkov. Ker vsaka nadaljnja komponenta predstavlja nadaljnji ostanek, se lahko pokažejo t. i. latentne podobe trendov, ki bi jih z drugimi, bolj neposrednimi analizami podatkov zelo težko zaznali (Eastman, 2006)

Analiza časovne vrste je glede vhodnih podatkov in izhodnih rezultatov tudi najbolj splošen postopek. Včasih pa želimo pojave opazovati na drug, bolj specifičen način in takrat bo priročnejši kakšen drug, morda enostavnejši postopek analize vrste. Nekaj primerov takšnih pogledov v podatke navajam v nadaljevanju.

4.2.2.2 Korelacija časovnih vrst

Za primere, ko želimo izpričati nek prav določen časovni pojav (fenomen), lahko na časovni vrsti podob izvedemo korelacijsko analizo (angl. time series correlations). Korelacijska analiza primerja vsak piksel skozi čas, z dano vrednostjo indeksa v časovni vrsti (Eastman, 2006). Vrednost indeksa, za primer, je lahko mera za mesečne temperature morja ali pa mera sončnega obsevanja. Za rezultat dobimo podobo, v kateri vsak piksel vsebuje Pearsonov koeficient korelacije (angl. Pearson product-moment correlation coefficient), ki izraža korelacijo med opazovanim pojavom (npr. NDVI) ter izbranim indeksom, po obeh vrstah (časovni vrsti podob in časovni vrsti indeksa).

4.2.2.3 Časovni profili

Za primere, ko bi želeli proučiti spremembe v vrednostih na specifičnih lokacijah skozi čas, je smiselno uporabiti postopke za izdelavo časovnih profilov (angl. time profiling). Vnaprej določimo izbrana opazovana območja (lokacije in/ali razrede) ter časovni red podob (časovno vrsto). Niz statističnih opisnih parametrov (kot npr. sredina, minimum, maksimum, obseg, standardni odklon) nato služi za podporo grafičnega rezultata (diagram za izbrani par, graf za izbran niz).

4.2.2.4 Odkloni podob

Analiza odklonov podob (angl. image deviation analysis) je pravzaprav razširitev analize primerjave para podob (razlikovanje podob, deljenje podob) na podatke časovnih vrst. Osnovna ideja je v tem, da ustvarimo t. i. značilno podobo za celotno časovno vrsto podob, nato pa od te vsako posamezno podobo odvezamo (odštejemo, delimo) ter proučimo, kako se posamezna podoba razlikuje od ostalega niza oziroma izbrane reference (Eastman, 2006; Coppin et al. 2004; Lu et al., 2004). Najbolj splošno se uporablja kombinacija, pri kateri značilno podobo določimo kot aritmetično sredino vseh podob, proučevane podobe pa od te odštevamo. Kot rezultat dobimo niz podob odklonov, ki jim moramo še smiselno določiti vhodne vrednosti oziroma kriterij za kategorizacijo in karakterizacijo sprememb.

4.2.2.5 Vektor sprememb

Včasih se zgodi, da bi želeli proučiti razliko med dvema vrstama. Na primer, da imamo podobe za vsak mesec in bi želeli med seboj primerjati stanje po mesecih za dve različni leti. V takem primeru lahko uporabimo analizo vektorja sprememb (Eastman, 2006; Coppin et al. 2004; Lu et al., 2004). Izdelamo posamezno podobo spremembe magnitude za vsak mesečni par, nato pa jih seštejemo (zložimo oziroma prekrijemo).

Pri takšnem pristopu se moramo zavedati, da je rezultat zelo odvisen od slabe časovne registracije. Predpostavka opisanega pristopa je, da so definirani režnji časa (npr. meseci) tudi okoljsko smiselni (stanje narave), pa vemo, da to vselej ne drži. Torej moramo pri interpretaciji rezultatov upoštevati, kako so opazovani pojavi (določene faze v rasti določenega tipa vegetacije) lahko odvisni od drugih pojavov (deževna obdobja) ali pa niso.

4.2.3 Napovedno modeliranje sprememb in simulacije

Poznavanje in razumevanje sprememb v preteklosti nam omogoča predvidevati nadaljnji razvoj dogodkov ali procesov, jih, skratka, napovedovati. Tak podaljšek analiz sprememb lahko izvajamo s simulacijami ali napovednimi modeli. Osnovna principa, ki se uporabljata, sta dva (Eastman, 2006), in sicer analiza Markovske verige in princip celularnega avtomata.

4.2.3.1 Markovske verige

Stohastični procesi so procesi, kjer je dinamika oziroma del dinamike pogojena verjetnostno. Markovski proces je stohastični proces brez pomnenja ob menjavi stanj. Poznamo zvezno časovne in diskretne časovne Markovske procese. V časovni sekvenci stanj Markovskega procesa je naslednje stanje določeno samo glede na trenutno stanje in ne na stanja pred njim. Markovske verige so diskretni časovni markovski procesi (Jamnik, 1987). Markovska veriga je zaporedje naključnih spremenljivk. Rang teh spremenljivk (nabor možnih vrednosti) imenujemo prostor stanj. Verjetnost prehajanja med dvema stanjema v časovnih korakih imenujemo prehajanja po Markovski verigi. Analiza Markovske verige (angl. Markov chain analysis) napove stanje sistema v času t_2 iz stanja sistema v času t_1 na podlagi matrike verjetnosti prehajanja (transition probability matrix). Vhodni podatki so praviloma kategorizirane skupine, na primer raba tal, za rezultat pa dobimo naslednje (Eastman, 2006).

Prvič, matriko verjetnosti prehodov, ki izraža verjetnost, da se piksel iz dane rabe tal v času T_1 spremeni v neko drugo rabo tal v času t_2 ali ostane enak. Drugič, matriko območij prehoda, ki izraža celotno število celic za katere se pričakuje, da se bodo spremenile. Tretjič, niz podob pogojne verjetnosti, in sicer za vsako rabo tal. Te podobe prikazujejo verjetnost, da bo dani piksel iz t_1 pripadal napovedanemu razredu v t_2 . Izraz pogojna verjetnost se za te podobe uporablja zato, ker je izračunana verjetnost odvisna od okoliščin in pogojev trenutnega stanja.

4.2.3.2 Princip celičnega avtomata

Ob predpostavki, da so elementi v prostoru v neki soodvisnosti s svojo bližnjo okolico, lahko postavimo, da je dinamika večine dogodkov ali sprememb na lokaciji posledica stanja in lastnosti v njeni okolici. Poenostavljeno povedano to pomeni, da bodo imela posamezna območja dane kategorije lastnosti površja večjo tendenco ostati enaka, če v bližini prevladuje enaka kategorija in obratno, imela bodo večjo tendenco se spremeniti, če je v okolici prevladujoča neka druga kategorija. Gre torej za nekakšen princip širjenja, pronicanja na osnovi postavljenih pravil. Osnovna ideja ni opisovanje kompleksnega sistema s kompleksnimi enačbami, temveč prepustiti, da se kompleksnost razvije kot posledica interakcije enostavnih posameznikov (agentov), ki sledijo enostavnim pravilom.

Navdih za modele prihaja iz naravnih procesov, ki so nadgrajeni z matematičnimi tehnikami za analizo (Eastman, 2006). Glavno vodilo je razumevanje zveze med enostavnimi lokalnimi pravili in globalnimi pojavi. Ponavadi so pravila določena z nekim fizikalnim principom in poskušajo izluščiti vsaj en bistven vidik naravnega procesa. Čeprav so na prvi pogled lahko nerealistični, je obnašanje teh modelov pogosto zelo podobno naravnim pojavom. Cilj, ki ga s principom celičnih avtomatov (angl. cellular automata) želimo doseči, je, da preprosti mehanizmi lahko vodijo k modeliranju in analizi kompleksnih vzorcev.

Princip celičnega avtomata sta v 1940-tih neodvisno razvijala in predstavila J. von Neuman (1966) in S. Ulam (Wolfram, 2007). Kasneje, leta 1970, je popularno izvedenko, znano pod imenom Igra življenja predstavil J. Conway. Celični avtomat je prostorska mreža N celic, pri čemer je vsaka od celic v enem od k stanj v časovnem koraku t . Vsaka celica sledi enakemu enostavnemu pravilu za posodobitev svojega stanja. Vsaka celična enota neodvisno menja svoje stanje glede na določeno pravilo, njeno stanje v časovnem koraku $t+1$ pa je odvisno tako od njenega prejšnjega stanja kot stanj njenih neposrednih sosedov (sosednje celice).

Razlika med napovedovanjem s celičnim avtomatom in Markovskimi verigami je predvsem v vpeljavi pravil prehajanja, ki upoštevajo prvotno stanje in stanje sosedstva. Kakšna so ta pravila, določimo z algoritmom, v praksi pa lahko izvedemo s filtrom oziroma premičnim oknom, v katerem opredelimo velikost vplivnega sosedstva in pravilo prehoda. Primer takega enostavnega pravila večine in manjšine je na primer: če je v oknu 9×9 šest celic enake rabe tal kot obravnavana (sredinska) celica, ta ostane enaka in če je enakem oknu 5 celic neke druge rabe tal, naj obravnavana celica preide v to drugo rabo tal. Dobra stran je, da lahko poljubno določamo prehode in meje za prehode (mehkost prehoda) za različne bolj in manj verjetne kombinacije tranzicije površja. Problematična stran je lahko določitev uteži v bolj kompleksnih situacijah.

Celični avtomat je diskretna simulacijska metoda (Wolfram, 2007). Posledično sta tudi prostor in čas definirana v diskretnih korakih. Kljub zelo preprostim pravilom lahko celični

avtomati simulirajo množico pojavov, ki imajo lastnosti kaotičnega obnašanja, naključja ali kompleksnosti. Odprto vprašanje pa je ali uspemo za opazovani pojav (indikator/je površja) v zadostni meri tudi opredeliti tranzicijska pravila, da opišemo tako njihove kompleksne notranje (lastne) trende kot medsebojne odnose oziroma preplet zaznanih trendov.

4.3 Sklep

Širok razpon študij sprememb površja z različnimi podatki daljinskega zaznavanja in pester spekter tehnik za določanje sprememb, dokazujejo uporabnost pristopov za različne namene. Kljub temu je na podlagi obstoječe literature in drugih virov očitno, da gre pri izbiri algoritma za določanje sprememb najpogosteje za eno od različic razlikovanja podob.

Z ovrednotenjem rezultatov in neposredno primerjavo tehnik za določanje sprememb se ukvarja šest vidnejših študij. Sunar (1998) je primerjal naslednje algoritme: analizo prostora časovno večrazsežnih predmetov, enovariantno razlikovanje podob, glavne komponente in kompozitne analize za potrebe določitve in razlikovanja sprememb v rabi tal v ekosistemih z močnimi in intenzivnimi razvojnimi pritiski. V študiji se ni mogel opredeliti za eno, najbolj optimalno metodo, češ da ima vsak algoritem z vidika zahtevnosti izpeljave, vsebinske razsežnosti ter interpretacije svoje prednosti in slabosti. Do podobnega zaključka so prišli tudi Coppin in Bauer (1994), Ridd in Liu (1998) ter Cohen in Fiorella (1998), ki so primerjali enostavno razlikovanje podob s selektivno metodo glavnih komponent, regresijo in kompozitnimi analizami. Tudi ti avtorji niso uspeli potrditi, da bi bila ena metoda v večini pogledov bistveno boljša ali slabša od drugih. Yuan in Elvidge (1998) sta opravila najobsežnejšo študijo, v kateri sta sistematično obdelala in ovrednotila praktično vse obstoječe, vizualne in statistične metode, tehnike in operatorje. Tudi onadva sta zaključila, da na podlagi rezultatov po večini ocenjevalnih kriterijev, predvsem pa glede na končno natančnost rezultatov, veliko govori v prid tehnikam razlikovanja podob, a vendar so tudi ostale tehnike lahko povsem primerne.

Na splošno lahko zaključimo, da so tehnike razlikovanja podob verjetno najbolj robustne, z vidika zahtevnosti izpeljave povsem sprejemljive ter dajejo dovolj dobre rezultate za različne namene in študije opazovanih sprememb. Kljub temu velja izpostaviti, da prav tiste študije, kjer so avtorji dobili dobre rezultate določitve in/ali karakterizacije sprememb tudi z drugimi algoritmi, izpričujejo dejstvo, da je izbira algoritma in kakovost rezultata zelo odvisna od namena opazovanja (predmet opazovanja, tipologija sprememb) in samih podatkov.

Spremembe se v osnovi določajo na principu primerjave. Primerjavo pa najbolj naravno izvajamo in razumemo, če uporabimo enostavne aritmetične parametre, kot so odštevanje količin, razmerje med količinami, delež od količine in podobno. Tako opažam tudi, da praktično vsi metodološki okviri za določanje in analizo sprememb satelitskih posnetkov izhajajo prav iz tega naravnega principa primerjave. Do razlik prihaja predvsem z vidika uporabljenega aritmetičnega operatorja ter načina oblikovanja časovne vrste. V zvezi s slednjim je precej očitno, da se analiza sprememb, pa naj gre za primerjavo enega para posnetkov ali primerjavo vrste posnetkov, vselej izvaja po principu primerjave para (stanj, profilov, indikatorjev). Pri tem srečamo dve situaciji. Ali primerjamo in razvijamo (relativno) zaporedje stanj pred- in po- ali primerjamo odklone različnih časovnih oddaljenosti (niz posnetkov) od izbrane referenčne vrednosti (referenčnega posnetka dane časovne vrste).

5 ANALIZA SPREMEMB NA POVRŠJU S SATELITSKIMI POSNETKI LANDSAT

Poglavje prikazuje raziskavo, ki je bila opravljena v okviru praktičnega dela doktorske disertacije. Opiše in analizira pripravo podatkov za analizo sprememb, in sicer po posameznih fazah vse od opredelitve ciljev, izbire posnetkov, oblikovanja časovnih vrst, popravkov satelitskih posnetkov in pretvorbe spektralnih lastnosti v različne usmerjene informacije (indikatorje) o lastnostih površja. Nato predstavi raziskavo analize sprememb z izbranimi tehnikami in za različne namene opazovanja sprememb do katerih je prišlo v opazovanem času in prostoru.

5.1 Namen in cilji raziskave

V praktičnem delu disertacije sem želela dobiti vpogled v prav vsak korak v procesu analize sprememb, saj le tako lahko »krotimo« daljinsko zaznane podatke in razumemo vsebino, to je interpretiramo različne informacije o površju Zemlje, kot jih podajajo satelitski posnetki. Zato sem si za ključni princip v *fazi priprave podatkov* zadala, da na vsakem koraku (vsaki vrsti popravka ali pretvorbe podob) vselej testiram več tehnik ter preverim in ocenim, na kakšen način »delujejo« na podatke. To na eni strani predvsem pomeni oceniti kolikšen je doprinos grobih napak, kje na posnetku se te pojavljajo in kako jih je mogoče odstraniti ali vsaj omejiti. In na drugi strani, kako posamezen postopek predobdelave učinkuje na spektralne lastnosti podob. Na ta način sem lahko za večji del predobdelave podatkov sestavila nekakšno sled transformacije spektralnih lastnosti podob, pomagalo pa mi tudi je pri izbiri posamezne najprimernejše tehnike za potrebe analize sprememb.

Najustreznejša metodologija je v primeru analize sprememb stremljenje k doseganju čim večje primerljivosti oziroma izenačitve splošnih lastnosti med posnetki. Glede na to, da so podatki po svoji naravi zvezni ter da smo pri modeliranju prostorskih podatkov dolžni podati končno oceno natančnosti, se mi je zdel to najbolj utemeljen pristop, ki lahko nadomešča sicer zapletene postopke analize prenosa napak (angl. error propagation) za zvezne podatke (glej Heuvelink, 1998).

Poleg skrbne analize postopkov v predobdelavi, je z vidika uporabnosti rezultatov analize sprememb, velikega pomena *pretvorba izvornih spektralnih lastnosti v nove spektralne kategorije*, ki poudarijo izbrane lastnosti površja. V primežu konceptualno podprtega modeliranja sprememb, za katerega se zavzemam, je pretvorba spektralnih lastnosti lahko ključna za uspeh in za razumen obseg interpretacije. V raziskavi sem zato izbrala nekaj bolj znanih pretvorb ter s tem prišla do nekakšnega mozaika analiz različnih lastnosti ali

indikatorjev lastnosti površja. Tak način omogoča, da tako rezultate kot učinkovitost izbrane tehnike analize sprememb medsebojno primerjamo in ovrednotimo (ali dajejo podobne indice za spremembe, dopolnjujoče, ali nič od tega). Interpretacija pa ostaja odprta tako za ločeno obravnavo (izbrana lastnost površja), kot povezano obravnavo (na primer korelacija med stanjem vegetacije in vlažnostjo površja).

Pripravo podatkov sem večinoma (tj. do radiometrične standardizacije časovne vrste) opravila za celotne posnetke. Radiometrično standardizacijo ter testiranje in ovrednotenje tehnik za analizo sprememb pa sem izvajala na *treh testnih območjih*, za katere lahko pričakujemo zaznavo več različnih procesov v času in prostoru. In sicer (slika 14): območje Kras, območje Celjska kotlina ter območje Ljubljana–Kranj z okolico.



Slika 14: Testna območja za analizo sprememb na mozaiku posnetkov Landsat v kombinaciji kanalov TM 321.

Figure 14: Study areas for change detection analysis and Landsat TM 321 mosaic composite.

S tem sem želela izkusiti tudi *kompleksnost interpretacije* na različno velikih območjih in na območjih z različnimi naravnimi okoliščinami, danostmi, procesi. Le tako lahko podrobno proučimo in spoznamo obnašanje različnih tehnik za zaznavo sprememb ter pridobimo izkušnjo o uporabnosti posamezne tehnike za določen namen, in na drugi strani, v kakšnih okoliščinah tehnika ni učinkovita. V okviru ovrednotenja sem uporabila različne statistične metode, pri čemer me je posebej zanimal način ali mera za odkrivanje kritičnih točk (meje

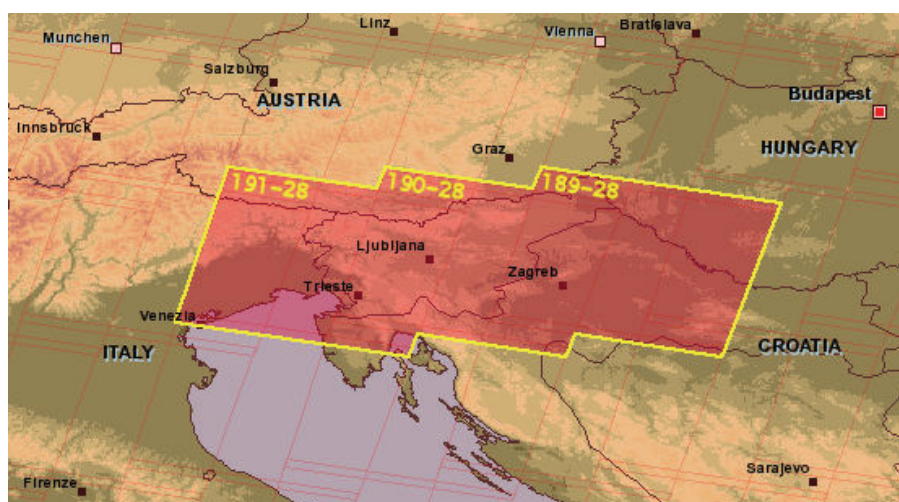
vrednosti, angl. threshold value) dokazovanja spremembe oziroma »zasledovanja« spremembe preko niza časovno razporejenih posnetkov.

Splošni cilj raziskave na več testnih območjih je tudi (na podlagi opravljenih raziskav) ovrednotiti celotno metodologijo, s posebnim ozirom primernosti za *analize površja Slovenije s posnetki Landsat*. Namen takšne metodološke sistematizacije je pridobiti vpogled v izbiro ustreznih in potrebnih postopkov v fazi priprave in obdelave podatkov, da bo analiza sprememb dala zelene in kakovostne rezultate.

5.2 Izbira in predstavitev podatkov

5.2.1 Posnetki Landsat

Satelitski opazovalni sistem namenjen opazovanju kopnih površin Zemlje v civilne namene, Landsat, ponuja sistematično pokritost s posnetki že vse od leta 1972. Takrat je NASA izstrelila prvi satelit ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), ki se je kasneje preimenoval v Landsat 1. Sledilo mu je še pet uspešnih (Landsat 2 do 5, Landsat 7) in ena neuspešna (Landsat 6) misija. Program je na začetku vodila NASA, leta 1983 pa ga je prevzela NOAA. Dve leti kasneje so ga komercializirali in tako ponudili podatke za najrazličnejše civilne in raziskovalne aplikacije (NASA, 2007; Jensen, 1996; Oštir, 2006).



Slika 15: Shema poti snemanja satelita Landsat E/TM z označbo poti in vrstice tirnice ter prikaz pokritosti Slovenije.

Figure 15: Landsat E/TM Path-Row coverage of Slovenia.

Vsi sateliti Landsat se nahajajo v skoraj polarnih, sončno sinhronih tirnicah. Prvi trije sateliti (Landsat 1 do 3) so krožili okrog Zemlje na višini približno 900 km (glej tudi preglednico 6), s časom ponovnega obiska 18 dni in zato snemali z manjšo prostorsko ločljivostjo (približno 60 x 80 m). Skenerji MSS so podatke zajemali v 4 kanalih, zelenem, rdečem in dva v IR spektru, s 6-bitno radiometrično ločljivostjo (zapisali so lahko 64 svetlostnih vrednosti). Vsi

naslednji sateliti pa letijo (so leteli) nižje, na višini približno 700 km. Njihov čas ponovnega obiska je 16 dni, prostorska ločljivost kanalov 1–3, 5 in 7 pa je 30 x 30 m. Senzor Thematic Mapper (TM), nameščen na satelitu Landsat 4, je nasledil in v celoti nadomestil senzor MSS. TM in ETM+ imata kar nekaj prednosti v primerjavi s starejšim MSS. Glavne so: boljša prostorska ločljivost, natančnejša radiometrična ločljivost (8-bitni zapis omogoča zapis 255 svetlostnih vrednosti), ožji spektralni kanali, sedem za razliko od štirih kanalov (zajema tako vidno kot bližnje infrardeče in termalno območje spektra) ter večje število senzorjev na kanal. Najnovejši senzor (ETM+) zbira še podatke za pankromatski sloj, ki ima prostorsko ločljivost 15 m. Sateliti Landsat ekvator prečkajo dopoldne, s čimer skušajo doseči najbolj ugodne razmere za snemanje; Slovenijo »obiščejo« okrog desete ure (NASA, 2007; Oštir, 2006).

Landsati 4–7 podatke zajemajo v pasu širokem približno 185 km (smer skeniranja) krat 170 km (v smeri tirnice). Za pokritje Slovenije rabimo dobre tri scene, in sicer od zahoda proti vzhodu, scene z oznakami (pot-vrstica tirnice; angl. orbit path, row; slika 15): 191-28, 190-28 ter 189-28 ter delček 189-27 (za pokritje Goričkoga).

Preglednica 6: Značilnosti spektralnih kanalov senzorjev Landsat MSS, TM in ETM+.

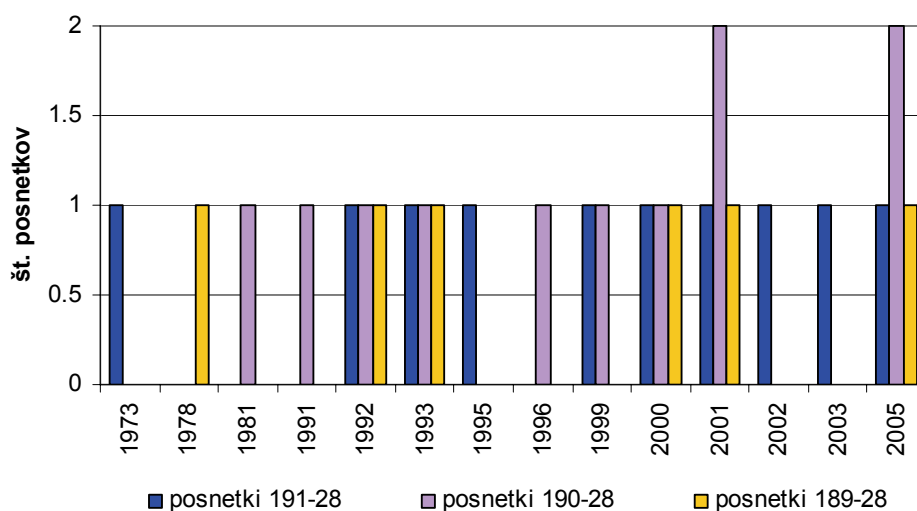
Table 6: Landsat MSS, TM and ETM+ spectral bands characteristics.

Spektralni kanal	Valovna dolžina (µm)	Spektralni kanal	Ločljivost (m) TM / ETM+		UPORABA
TM1/ETM+1	0.45 – 0.52	modra	30	30	ločevanje prsti in vegetacije, kartiranje tipov gozdov, identifikacija izgrajenih objektov; merjenje globine voda in kartiranje obal
TM2/ETM+2	0.52 – 0.60	zelena	30	30	kartiranje zelene vegetacije (meri vrh odboja); ločevanje med vegetacijskimi skupinami, identifikacija izgrajenih objektov
MSS4	0.5 – 0.60		57 x 79		
TM3/ETM+3	0.63 – 0.69	rdeča	30	30	ločevanje vegetacije in nevegetacije, prepoznavanje posameznih vrst rastlin (absorpcija klorofila); identifikacija izgrajenih objektov
MSS5	0.60 – 0.70		57 x 79		
TM4/ETM+4	0.76 – 0.90	bližnja IR	30	30	določanje vrst rastlin, zdravosti, količine biomase; označevanje vodnih teles; merjenje vlage
MSS6	0.70 – 0.80		57 x 79		
MSS7	0.80 – 1.10				
TM5/ETM+5	1.55 – 1.75	bližnja IR	30	30	merjenje vlage v prsti in vegetaciji; ločevanje snega in oblakov
TM6/ETM+6	10.4 – 12.5	termična IR	120	60	termično kartiranje (urbane in vodne površine); stanje vegetacije, določanje vlažnosti prsti v povezavi s termičnim sevanjem
TM7/ETM+7	2.08 – 2.35	bližnja IR	30	30	določanje mineralov in tipov kamnin; merjenje vlažnosti vegetacije
ETM+8 (PAN)	0.52 – 0.90	pankromatsko	/	15	izboljšanje ločljivosti; prepoznavanje vegetacije

Dobra stran sistema Landsat je tudi, da snema skoraj v zenitu (inklinacijski kot je $98,2^\circ$), zaradi česar so popačenja zaradi stranskega pogleda precej zmanjšana. Landsat posnetki MSS, TM in ETM+ so za analize sprememb na površju primerni iz več razlogov:

- zanimiva in pestra kombinacija senzorjev s kanali, ki so posebej primerni za opazovanje površja Zemlje,
- dobra prostorska ločljivost (zaradi dobrega prekrivanja med posnetki je vselej mogoče izdelati tudi mozaik večjih območij površja),
- dobra časovna pokritost površja oziroma čas ponovnega obiska, ki omogoča precejšnjo izbiro kar najbolj ustreznih posnetkov za izbrano/e optimalno/e sezono/e opazovanja,
- obsežen, več kot tridesetleten arhiv posnetkov: pri čemer je misija satelitov Landsat zagotovila primerljivost tudi med podatki različnih senzorjev MSS, TM, ETM+.

Po prostorski ločljivosti se sistem Landsat uvršča med sisteme srednje ločljivosti, kar pomeni, da so posnetki Landsat primerni za študije večjih (v merilu Slovenije lokalnih, regionalnih) območij. Za razumevanje spektralnih razsežnosti satelitskih posnetkov Landsat, si pogledimo značilnosti spektralnih kanalov senzorjev Landsat MSS, TM in ETM+ ter možnosti in načine uporabe posamičnih kanalov (preglednica 6).



Slika 16: Časovna in prostorska pokritost Slovenije s posnetki razpoložljivimi v času raziskave.

Figure 16: Spatio-temporal distribution of available imagery covering Slovenia.

Opisane lastnosti posnetkov Landsat torej omogočajo pridobitev raznolikih informacij o lastnostih površja v razmeroma dobri prostorski in časovni ločljivosti. Zadnji, nikakor pa ne nepomemben razlog, da sem za raziskave v okviru doktorske disertacije izbrala prav posnetke Landsat, je tudi njihova dostopnost. Pri tem imam v mislih predvsem razpoložljivost za raziskave površja Slovenije. To so namreč najpogosteje uporabljeni satelitski posnetki v Sloveniji. Pridobila sem jih iz več slovenskih institucij, dopolnila pa sem jih tudi s posnetki, ki so prosto razpoložljivi na spletu. Vseh skupaj sem jih zbrala 33, od tega 11 s spleta. V časovnih analizah nisem uporabila vseh, zaradi različnih razlogov. Eden je ta, da sem analize

izvajala na testnih območjih, zato so posnetki scene 198-28 in 189-29 večinoma izpadli, izločila sem tudi posnetke z večjimi radiometričnimi napakami ter vse tiste posnetke s spleta, ki so bili dostopni tudi v originalnem zapisu. Prečiščen seznam posnetkov, glede na njihovo časovno razporeditev in skupaj s prostorskim pokrivanjem Slovenije, prikazuje slika 16.

5.2.2 Oblikovanje časovnih vrst in izbira testnih območij

Zbrane posnetke sem urejala glede na:

- prostorsko pokritost: zahodni, osrednji, vzhodni del Slovenije ter prekrivanje,
- datum zajema: glede na datum sem posnetke razvrstila v tri letne čase (zimskih posnetkov ni), in sicer: pomlad (april, maj junij), poletje (julij, avgust) ter jesen (september, oktober) ter
- posebnosti posnetkov: način obdelave v sprejemnih postajah: ortorektifikacija (da / ne), tehnika prevzorčenja (NN / BI), prisotnost napak v radiometriji (manjkajoče vrstice, zamaknjene vrstice), stopnja šuma (prisotnost oblakov in meglic), kontrast, meteorološki pogoji pred in med zajemom, in podobno.

Seznam posnetkov in njihovih lastnosti podajam v Prilogi B. Tekom raziskave sem posamezne posnetke tudi izključevala, če so se pokazali za neuporabne ali če jih ni bilo mogoče dovolj dobro uskladiti s pripadajočo časovno vrsto.

Preglednica 7: Oblikovanje časovnih vrst glede na prostorsko pokritost Slovenije in letni čas zajema.

Table 7: Imagery time-series design based on spatial coverage of Slovenia and season of acquisition.

posnetki scene 191-28 (zahodni del)	posnetki scene 190-28 (osrednji del)	posnetki scene 189-28 (vzhodni del)
1973-08-06-L1-206-28-w		1978-08-23-L2-204-28-w
	1981-06-15-L2-205-28-w	
	1991-09-10-L5-190-28-w	
1992-08-18-L5-191-28	1992-08-27-L5-190-28	1992-08-20-L5-189-28
1993-08-21-L5-191-28	1993-05-26-L5-190-28	1993-06-20-L5-189-28sp+zg
1995-07-26-L5-191-28		
	1996-06-03-L5-190-28	
1999-09-15-L7-191-28	1999-08-07-L7-190-28	
2000-08-16-L7-191-28-w	2000-09-10-L7-190-28-w	2000-08-02-L7-189-28-w
2001-08-03-L7-191-28	2001-07-11-L7-190-28	2001-05-01-L7-189-28
	2001-05-24-L7-190-28	
2002-05-18-L7-191-28		
2003-03-18-L7-191-28		
2005-06-19-L5-191-28	2005-05-27-L5-190-28	2005-06-21-L5-198-28
	2005-07-30-L5-190-28	

Preglednica 7 prikazuje časovne vrste za posamezno prostorsko pokritost. V rumenih poljih sledimo posnetkom zajetih v poletnem letnem času, v zeleni barvi so posnetki zajeti v pomladnem času in v rjavi barvi so jesenski posnetki. V rdečem tisku sta posnetka, ki imata

velike radiometrične napake (neuskklajenost med vrsticami – znane napake v delovanju senzorja Landsat 7 ETM+), ki jih ni bilo mogoče zadovoljivo odstraniti. Zapis posameznega posnetka v preglednici ima naslednjo strukturo: prvi trije členi opredeljujejo datum zajema in sicer leto-mesec-dan, četrti člen »L1 ... L7« satelit »Landsat 1–7« in s tem senzor, peti in šesti člen opredeljujeta sceno (pot in vrstico tirnice), »w« na koncu označbe (sedmi člen) označuje posnetke s spleta, ki se od ostalih razlikujejo v tem, da so grobo ortorektificirani. Na primer za posnetek

1992-08-18-L5-191-28 preberemo

leto = 1992, mesec = 08, dan = 18, satelit = Landsat 5, pot = 191 in vrstica = 28.

Ureditev vrste na posamične letne čase je, z vidika razlik v spektralnih lastnostih površja poraščenih območij (rast vegetacije, fenološke lastnosti skozi letne čase), nujna. Seveda obstajajo razlike tudi znotraj letnega časa. Na spektralne lastnosti pa vplivajo še meteorološki pogoji v dneh pred in med zajemom (na primer močan dež) ter vsebnost in razporeditev aerosolov in vodne pare v ozračju.

Za opredelitev območij testiranja sem postavila naslednja izhodišča:

- zaobjeti povsem urbano, povsem ruralno in mešano območje (geografska raznolikost),
- območja naj bodo različnih velikosti, zaradi obsega in obvladljivosti interpretacije,
- območja morajo biti izbrana tako, da bodo imela tudi zadostno časovno pokritost s posnetki,
- na izbranih območjih naj gre pričakovati spremljanje tako bolj izrazitih (intenzivnih v prostorskem pomenu, npr. zaraščanje travnikov z gozdom ali obratno pogozdovanje, krčenje naravnih površin zaradi urbanizacije, izgradnje cest) kot tudi manj izrazitih procesov spreminjanja (npr. gradnja v že urbaniziranih središčih, redčenje gozda).

Izbrana so bila naslednja tri območja (slika 14):

- *Območje Kras*, ki ima razvidne naravne meje in predstavlja primer ruralnega območja z izrazitejšimi vegetacijskimi procesi. To območje pokrivajo posnetki scene 191-28.
- *Območje Celjska kotlina* kot primer izrazitejših procesov v urbanem okolju. To območje pokrivajo posnetki 190-28.
- Območje Ljubljana–Kranj z okolico kot primer kombinacije nekaterih večjih posegov v prostor in postopnega razvoja, tj. za opazovanje mešanih procesov. To območje pokrivajo posnetki 191-28 in 190-28, s čimer si lahko obetamo tudi časovno najdaljšo in najbolj razdrobljeno vrsto.

5.3 Predobdelava posnetkov: priprava podatkov

Poglavje predstavi uporabljene postopke predobdelave satelitskih posnetkov.

Satelitski posnetki, s katerimi sem začela delati, so bili v surovi obliki. To pomeni, da so bili kvečjemu grobo georeferencirani. Do razlik na tej stopnji je prihajalo predvsem z vidika

metode interpolacije, opravljene v sprejemnih postajah (del posnetkov je prevzorčen z metodo najbližjega sosedu, del pa z bilinearno interpolacijo) in grobe ortorektifikacije. Priprava podatkov je potekala v naslednjem vrstnem redu:

- georeferenciranje in poravnava v skupno masko,
- pridobivanje metapodatkov za radiometrične pretvorbe,
- pretvorba v radiance in odboj površja,
- atmosferski popravki,
- popravki osvetlitve scene oziroma topografska normalizacija,
- radiometrična standardizacija ter
- pretvorba spektralnih vrednosti v poudarjene lastnosti (indikatorje) površja.

5.3.1 Georeferenciranje in poravnava v skupno koordinatno mrežo

Georeferenciranje je za kvantitativne prostorske analize, še posebej pa za analize sprememb zelo pomembno. Če posnetki niso položajno dobro usklajeni, med njimi ne moremo primerjati vsebine. Zato je osnovna zahteva za študije sprememb, da položajno odstopanje med posnetki ne presega velikosti 1 piksla. Townshend s sodelavci (1992) je dokazal, da pikselno odstopanje pri analizi sprememb na kategoričnih podatkih povzroči vsaj 10 % napako pri določanju obsega in vrste sprememb. Na podlagi izkušenj z ročnim georeferenciranjem in samodejnimi postopki registracije, ki sem jih tekom podiplomskega študija pridobila z georeferenciranjem in registracijo satelitskih posnetkov (Veljanovski in Oštir, 2004; Veljanovski, 2003), sem sklenila, da bom zaradi velikega števila posnetkov in zadostne učinkovitosti izbranega samodejnega algoritma AutoSync v programu Erdas Imagine 9, posnetke poravnavala s samodejnim postopkom. Posnetki, ki so pri tem služili za referenco (1992-08-18-L5-191-28, 1992-08-27-L5-190-28 in 1992-08-20-L5-189-28), so bili ročno natančno georeferencirani na skanogram državne topografske karte TK 1 : 25 000 (GURS) ter njihovi spektralni kanali 1–4 združeni v mozaik Slovenije.

V omenjeni študiji (Veljanovski in Oštir, 2004; Veljanovski, 2003) sem namreč ugotovila, da:

- je ročna poravnava natančnejša od samodejne le, če zagotovimo veliko število, po posnetku enakomerno razporejenih parov kontrolnih ali veznih točk (nad 100), je pa ob taki zahtevi ročna registracija časovno bistveno bolj obsežna (vsaj 10 krat);
- so za posnetke Landsat povsem ustrezne globalne tehnike transformacije oziroma prekartiranja posnetka (npr. afina, polinomska 1. ali 2. reda), saj večjih lokalnih geometričnih deformacij na posnetkih praviloma ni in so zato samodejni algoritmi na posnetkih Landsat povsem učinkoviti v koraku iskanja kontrolnih točk;
- tako s kakovostno ročno kot s kakovostno samodejno poravnavo lahko dosežemo natančnost poravnave znotraj enega piksla, s čimer zadostimo zahtevi za analize sprememb.

Za samodejno poravnavo sem uporabila modul AutoSync v programu Erdas Imagine 9. Praviloma je algoritem za polno sceno (celoten posnetek) našel med 200 in 400 kontrolnih točk, slabše pare sem ročno odstranila ali popravila, nato pa sem uporabila polinomske transformacije 2. reda in bilinearno interpolacijo za prevzorčenje posnetka. Dobljena položajna natančnost registriranih posnetkov, ki jo ocenimo na podlagi odklonov v smeri x in

y (napaka RMSE, angl. root-mean square error; preglednica 8), je podpikselska, in se v povprečju suče okoli 0,45 piksla, pri čemer je poravnava v horizontalni smeri x praviloma malenkost slabša kot v vertikalni smeri y . Sklepam, da je to predvsem posledica smeri skaniranja površja. Nekoliko slabša v primerjavi z Landsat TM/ETM+ je bila poravnava Landsat MSS posnetkov, predhodno prevzorčenih v 30 m ločljivost, vendar glede na ocenjeno položajno odstopanje RMSE še vedno ni bistveno preseгла ranga 15 m (0,5 prevzorčenega piksla).

Dodatno sem kakovost poravnave posnetkov kontrolirala tudi vizualno preko podobe razlik in preko statistike podobe razlik. Enostavno podobo razlik PR sem izračunala kot razliko med referenčnim (georeferenciranim) posnetkom P_{ref} in posnetkom, ki sem ga nanj poravnala P_i :

$$PR = P_{ref} - P_i. \quad (33)$$

V primeru majhnih odstopanj se sredina podobe razlik suče okoli vrednosti nič, vsekakor pa za digitalne vrednosti (0-255), kot sem na podlagi analize podobnosti s korelacijskim koeficientom na umetno simuliranih položajnih odstopanjih ugotovila v študiji o prenosu napak (Veljanovski, 2002), ne sme bistveno presegati vrednosti 10, če želimo podobi še smatrati za statistično značilno podobni. Ob tem velja poudariti, da je takšna ocena relevantna le, če sta poravnavani posnetek in referenčni posnetek zajeta v enakem letnem času in imata tudi sicer podobne lastnosti (npr. sta brez oblakov in meglic).

Ne glede na omenjeno dejstvo lahko podobo razlik vselej uporabimo za vizualno oceno odstopanj. Pri vizualni oceni kakovosti poravnave posnetkov na podlagi podobe razlik sem bila pozorna na:

- obrise linij, saj bi prisotnost kontur cest, rek in podobno pomenila, da je prisotno več kot pikselsko položajno odstopanje,
- enakomernost oziroma razporejenost odstopanj po podobi, tj. ali so določeni predeli posnetka opazno slabše poravnani kot drugi ter
- stopnjo odstopanj, ki sem jo ocenila na podlagi temnosti podobe razlik (majhna odstopanja se prikažejo v temnih obrisih, pri večjih absolutnih odstopanjih je podoba razlik svetlejša).

Pregled rezultatov kakovosti registracije posameznih posnetkov prikazuje preglednica 8. V prvem stolpcu so naštetih posnetki (v okrepljenem tisku so označeni referenčni posnetki), v drugem števílo kontrolnih točk na katerih je bila opravljena transformacija, v tretjem stolpcu sledi ocena (skupnega) položajnega odstopanja v pikslih (t. i. napaka RMSE), v četrtem in petem stolpcu je povprečje absolutnih odstopanj v smeri x oziroma y , prav tako v pikslih, v šestem stolpcu pa je sredina podobe razlik, in sicer po spektralnih kanalih. Statistični kazalec sredine podobe razlik v primeru, ko odštevamo posnetek iz drugega letnega časa ali posnetek na katerem so prisotni oblaki, razumljivo, kaže večja odstopanja in v tej situaciji ni primeren za oceno kakovosti registracije. Podobe razlik so v takšnih primerih uporabne le za vizualno oceno grobih položajnih odstopanj ter prostorske razporeditve odstopanj.

Če poravnan posnetek ni ustrezal naštetim zahtevam, sem postopek poravnave ponovila tako, da sem prvi del kontrolnih točk določila ročno, drugi del pa s samodejnim postopkom in po potrebi spremenila parametre transformacije. Na ta način sem dosegla, da so vsi posnetki

vklučeni v študijo poravnani približno na enak način, torej sistematično ter s statistično podpikselsko natančnostjo položajnega odstopanja.

Preglednica 8: Pregled rezultatov kakovosti samodejne registracije posameznih posnetkov.

Table 8: Accuracy assesment of imagery automatic registration procedure.

Posnetek	Št. KT	RMSE (xy)	odstopanje abs(x)	odstopanje abs(y)	PR Sredina			
					spektr.	kanal	TM/ETM	1 2 3 4
1973-08-06-L1-206-28-w	231	0,44	0,30	0,19				
1978-08-23-L2-204-28-w	219	0,57	0,37	0,28				
1981-06-15-L2-205-28-w	283	0,517	0,38	0,21				
1991-09-10-L5-190-28-w	410	0,47	0,32	0,22	9	6	7	32
1992-08-18-L5-191-28	298	0,37	0,19	0,15	2	2	2	5
1992-08-18-L5-191-28-w	341	0,43	0,35	0,10	7	8	5	9
1992-08-20-L5-189-28	297	0,35	0,20	0,14	6	4	6	25
1992-08-27-L5-190-28	361	0,45	0,31	0,20	7	4	7	32
1992-08-28-L4-189-28-w	311	0,39	0,26	0,18	8	4	6	28
1993-05-26-L5-190-28	307	0,45	0,28	0,24	17	7	9	13
1993-06-20-L5-189-28sp	96	0,47	0,32	0,21	7	5	7	12
1993-06-20-L5-189-28zg	114	0,44	0,27	0,23	7	6	11	11
1993-08-21-L5-191-28	372	0,46	0,32	0,20	6	4	5	9
1995-07-26-L5-191-28	290	0,47	0,32	0,22	5	3	4	6
1996-06-03-L5-190-28	312	0,46	0,30	0,21	5	4	4	7
1999-08-07-L7-190-28	357	0,48	0,33	0,24	10	34	12	14
1999-09-15-L7-191-28	320	0,47	0,29	0,25	10	21	16	16
2000-08-02-L7-189-28-w	207	0,44	0,28	0,23	7	5	10	12
2000-08-16-L7-191-28-w	237	0,48	0,36	0,19	10	22	17	13
2000-09-10-L7-190-28-w	399	0,46	0,29	0,23	7	25	11	29
2001-05-24-L7-190-28	366	0,42	0,28	0,21	8	36	14	12
2001-08-03-L7-191-28	298	0,47	0,30	0,24	27	30	31	11
2002-05-18-L7-191-28	293	0,44	0,29	0,22	26	24	20	16
2003-03-18-L7-191-28	299	0,46	0,27	0,25	6	25	23	17
2005-05-27-L5-190-28	333	0,47	0,27	0,28	5	4	6	11
2005-06-19-L5-191-28	343	0,45	0,26	0,25	5	3	4	10
2005-06-21-L5-198-28	185	0,49	0,31	0,27	7	5	9	12
2005-07-30-L5-190-28	254	0,43	0,27	0,22	9	6	10	17

Ker po registraciji ostanejo manjša odstopanja med legami istoležnih pikslov med posnetki, sem vse posnetke položila v (po koordinatnih dimenzijah) skupen model (okvir). Na ta način sem dosegla tudi natančno poravnavo pikselskega sistema v rastrski mreži (center piksla na center piksla).

5.3.2 Pridobivanje metapodatkov za radiometrične pretvorbe

Podatke, ki jih rabimo za vzpostavitev svetlostnih ali digitalnih vrednosti (DN) v absolutne količine elektromagnetnega valovanja (radiance, odboj, temperaturo), praviloma najdemo v metapodatkih, ki spremljajo posnetek. Žal se nasploh pri starejših posnetkih pogosto zgodi, da tega dokumenta ni, ali pa je nepopoln. Za radiometrično kalibracijo rabimo za vsak posnetek naslednje podatke:

- LMIN in LMAX oziroma GAIN in OFFSET,

- položaj Sonca glede na površje med snemanjem: zenitni kot in azimut Sonca,
- razdaljo med Soncem in Zemljo v astronomskih enotah.

Ker vrednosti LMIN in LMAX, ki ponazarjajo tudi doseženo občutljivost senzorja med snemanjem (za senzorje pa vemo, da s časom izgubljajo svojo občutljivost), in se jim zato daje prednost pri radiometričnih korekcijah, nisem uspela zbrati za prav vse posnetke, sem sklenila postopek poenotiti do te mere, da sem pri vseh posnetkih uporabila splošne vrednosti, kot jih podajajo uradne preglednice za pretvorbo količin (glej NASA, 2007 za ETM+; Chander in Markham, 2007, 2003 za TM; Markham in Barker, 1987, 1986 za MSS posnetke).

Manjkajoče podatke o položaju Sonca sem zbrala s preiskovanjem metapodatkov o posnetkih v različnih bazah oziroma katalogih za nakup posnetkov. Razdaljo med Soncem in Zemljo v času snemanja, ki je niti metapodatki niti katalogi posnetkov ne podajajo, sem določila s programom JPL HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi#results>). Program generira efemeride za planetarna telesa v osončju na podlagi natančnega časa in geografske lokacije opazovalca ter med drugim podaja tudi razdaljo med Soncem in Zemljo.

5.3.3 Pretvorba v radiance

Sledila je pretvorba v radiance, sevanje površja Zemlje, kot ga zazna senzor nad atmosfero. Pretvorbo v radiance sem opravila predvsem zato, ker večina atmosferskih korekcij, ki za odpravljanje atmosferskih vplivov uporabljajo informacije v posnetku, izhaja iz odnosov med vrednostmi radianc. Pa tudi zato, da sem preverila, kako se radiance, kot podatki o lastnostih površja, obnesejo pri analizah sprememb.

Za kalibracijo digitalnih vrednosti v radiance sem uporabila postopek in račune podane v poglavju 3.8.1. Ker sem pri tem uporabila ustrezne tabelarične vrednosti za MSS, TM in ETM+ posnetke (upoštevala sem tudi spremembo v kalibracijskih parametrih glede na datum zajema; Chander et al., 2007), sem na osnovi posnetkov, za katere sem imela na razpolago tako metapodatke kot tabelarične vrednosti, preverila tudi, kakšno je odstopanje v spektralnih lastnostih podobe, če za kalibracijo uporabimo koeficiente iz uradnih preglednic in ne tistih, podanih v metapodatkih.

Ugotovila sem, da značilnih razlik ni: kontrast podobe, porazdelitev vrednosti v histogramu in statistika sredine ter standardnega odklona podob so skorajda identični. Razumljivo pa pride do manjših razlik v minimalni in maksimalni vrednosti, vendar zaradi majhne številčnosti pikslov, ki vsebujejo ti dve skrajni vrednosti, te nimajo značilnega vpliva na lastnosti podob radianc. Glede na to, da razlike med enimi in drugimi koeficienti niso znatne, je tudi test razlike podob na več primerih pokazal, da značilnih odstopanj zaradi uporabe tabelaričnih vrednosti koeficientov ni. Srednja vrednost podobe razlik $M(L_{TAB \lambda} - L_{META \lambda}) \approx 0$, za vse spektralne kanale. Odstopanja pa so tudi prostorsko, tj. po posnetku, porazdeljena enakomerno.

5.3.4 Atmosferski popravki in pretvorba v odboj površja

Ker nisem imela dostopa do programov za odpravljanje atmosferskih učinkov na podlagi radiacijskih modelov prenosa energije in sestave atmosfere, zadeva pa je za lastno

programiranje preveč zapletena, sem preizkusila enostavnejše tehnike atmosferskih korekcij. Te izhajajo iz pridobitve potrebnih parametrov za atmosferske popravke kar iz podatkov v samem posnetku. Dejstvo je tudi, da odpravljajo zlasti vpliv atmosferskega odboja. Po drugi strani pa tudi radiacijski modeli prenosa energije ne dajejo kakovostnih in zanesljivih rezultatov, če nimamo dovolj dobrih podatkov za izpeljavo modeliranja. Preverila sem učinkovitost naslednjih štirih atmosferskih korekcij:

- popravki po principu minimuma v histogramu: pri čemer sem preizkusila različne temne predmete, in sicer: sence, vodo, gosto vegetacijo,
- popravki z uporabo linearne regresije med vidnimi (TM 1–3) in IR kanalom (TM 4),
- popravki na podlagi ujemanja histograma ter
- popravki s Chavezovo metodo vidljivosti.

Popravki po principu minimuma histograma in z uporabo linearne regresije sodijo med *tehnike odštevanja temnega predmeta* (angl. dark object saturation, DOS). Metoda temnega predmeta je resda najbolj enostavna in najhitrejša, vendar sem ugotovila, da so rezultati zelo odvisni od lastnosti temnega predmeta, ki ga izberemo za določitev deleža atmosferskega odboja v podatkih ter ga nato od podobe odštejemo. Metodo sem preizkusila na treh temnih predmetih: globoki in čisti vodi (Bohinjsko jezero), globoki senci (Julijske Alpe) ter gosti vegetaciji (iglasti gozd na Pokljuki).

Pokazalo se je, da so sence z vidika pričakovanih razlik med spektralnimi kanali (upadanje deleža atmosferskega odboja sorazmerno z večanjem valovnih dolžin) najbolj zanesljive, nato gosta vegetacija, voda pa najmanj, kljub temu, da se jo v literaturi največkrat omenja kot primeren temen predmet. Nadalje se je pokazalo, da v primeru senc in goste vegetacije oba pristopa (minimum histograma in linearna regresija) dajeta podobne rezultate, tj. podobne vrednosti, ki jih nato v posameznih kanalih odštejemo. Do razlik pride predvsem v IR kanalu 4. Slednje je razumljivo, saj v goratem svetu, na severnih pobočjih in na večjih nadmorskih višinah (kar so lastnosti uporabljenih globokih senc) praviloma ne zasledimo strnjene gozda. Kanal 4 pa je tisti, ki je odgovoren za določanje vrst rastlin ter zdravosti in količine biomase. Vrednosti, ki jih dobimo na primeru vode, so praviloma (vsaj za kanal 1) precenjene, zato v popravljeni podobi pridobivamo tudi negativne vrednosti, kar ni sprejemljivo.

Poudarila bi tudi, da so se izbrana območja temnih predmetov razlikovala tudi po naklonu. Jezero in gozd sta na praktično ravnem terenu, kar je gotovo dobrodošlo, globoke sence pa se razprostranjajo na precej nagnjenem površju. Vendar ravno s tem, da sta gozd in sence dala podobne rezultate, pridemo do zaključka, da naklon na določanje deleža atmosferskega odboja, kot kaže, nima tako odločujočega vpliva.

Sence pa so ugodne še iz drugih razlogov. Zastopanost lastnosti površja je tam bolj pestra (odprtost, grmičevje, trava, posamezna drevesa) kot v primeru ene izbrane kategorije (voda ali gozd). Pestrost pa je tudi nasploh lastnost satelitskih posnetkov še sploh, če so zajeti v različnem času, zato se v atmosferskem odboju določenemu na podlagi senc bolj realno zrcali delež atmosferskega odboja celotnega posnetka. Zaradi prisotnosti različnih tipov površja je ocena deleža atmosferskega odboja na podlagi senc realnejša tudi z vidika zastopanosti atmosferskega odboja glede na valovno dolžino (tj. manj podvržena trenutnim fenološkim značilnostim vegetacije).

Na podlagi primerjave vplivov različnih temnih predmetov na kakovost atmosferske korekcije ugotavljam, da je metoda DOS za odpravljanje atmosferskega odboja na več posnetkih vseeno problematična. Razlogi so naslednji: (1) daje spremenljive rezultate (problem izbire tipa temnega predmeta), (2) na različnih scenah (npr. med 191, 190 in 189) morda ne bomo mogli vselej zagotoviti primerljivega temnega predmeta in (3) učinek enostavnega odštevanja ima korenit vpliv na premik sredine kanala, zato je uporaba tako popravljenih posnetkov, brez radiometrične standardizacije, lahko za analize sprememb vprašljiva. Uporabljene tehnike zaradi naštetih problemov, predvsem velike spremenljivosti rezultatov, niso najbolj primerne za sistematične korekcije več posnetkov.

Z metodo *ujemanja histograma* nisem dobila zelenih rezultatov, ne, v primeru ko sem jo izvajala na izbranih manjših območjih, ki naj bi služila kot vzorčna, ne s prilagajanjem histograma celotne podobe. Tudi ta metoda torej ni primerna za sistematične popravke več posnetkov.

Zadnja metoda, ki sem jo testirala, *Chavezova metoda vidljivosti* (imenovana tudi COST model) je nadgradnja metod DOS. Nadgrajena pa je:

- v metodologiji določanja temnih predmetov (vzamemo povprečje skupine in ne posameznih najnižjih vrednosti v vsakem kanalu),
- upošteva 1 % odboj temnih predmetov (kar je bolj realna ocena za delež atmosferskega odboja na podlagi informacij v posnetkih, kot smo lahko videli že na primeru DOS na podlagi vode) ter
- z upoštevanjem izvenatmosferskih solarnih konstant v različnih spektralnih kanalih, položaja Sonca ter razdalje med Zemljo in Soncem, radiance pretvori v odbojnost površja, kot jo zabeleži senzor (torej odbojnost površja nad atmosfero).

Rezultat so podobe, obnovljene v absolutne vrednosti odboja površja in popravljene za učinek atmosferskega odboja. Tako popravljene podobe imajo, kot atmosfersko popravljene podobe nasploh, tudi nekoliko izboljššan kontrast.

Metoda COST je najbolj splošna. V aplikacijah daljinsko zaznanih podatkov se tudi najbolj pogosto uporablja, če ni možnosti odpravljanja atmosferskih učinkov z radiacijskimi modeli prenosa energije. Prav zaradi opisanih izboljšav jo je mogoče sistematično uporabiti na več posnetkih. Kritika metode pa je predvsem v tem (Liang, 2004), da naj s tistim posplošenim 1 % ne bi dovolj realno opredeljevala deleža atmosferskega odboja v vseh spektralnih kanalih.

Model COST sem zaradi naštetih prednosti navsezadnje uporabila za odpravljanje atmosferskega odboja v posnetkih. Vrednosti po popravkih naj bi se gibale med 0 in 1. Tiste posamezne vrednosti, ki so presegle zgornjo mejo (saturacija signala), sem prepisala v 1.

Atmosferski popravki, ki upoštevajo solarne konstante, kot je to v primeru metode COST, lahko značilno spremenijo razmerja med spektralnimi kanali. To dejstvo je treba upoštevati pri obravnavi podatkov za časovne analize.

5.3.5 Popravki osvetlitve scene – topografska normalizacija

Na odbojne lastnosti površja ima velik vpliv dejstvo ali je obsijano s soncem ali ne. Razlike v osvetlitvi so lahko zelo moteče v študijah analize sprememb, zato so ti popravki zelo

pomembni. Sonce na različnih posnetkih, predvsem, če so posnetki iz različnih letnih časov, površje osvetljuje tako pod različnim višinskim kotom (kot sonca nad ekvatorialno ravnino: 90° - zenitni kot), kot iz različne smeri (azimut). Posledica so različne smeri in dolžina senc na posnetkih. Cilj topografske normalizacije je dvojen:

- obnoviti spektralne lastnosti v senčnih predelih tako, da bodo primerljive z lastnostmi na osončenih predelih, in sicer upoštevaje naklon in usmerjenost površja ter
- odstraniti vpliv nagnjenega reliefa in s tem pridobiti vrednosti, ki bi ustrezale matematičnemu horizontu površja (učinek je ta, da se podobe po odpravi razlik v naklonu zdijo sploščene, tj. ne več tri- temveč dvorazsežne).

Testirala sem štiri tehnike topografske normalizacije, vse sodijo v skupino kosinusnih metod, in sicer:

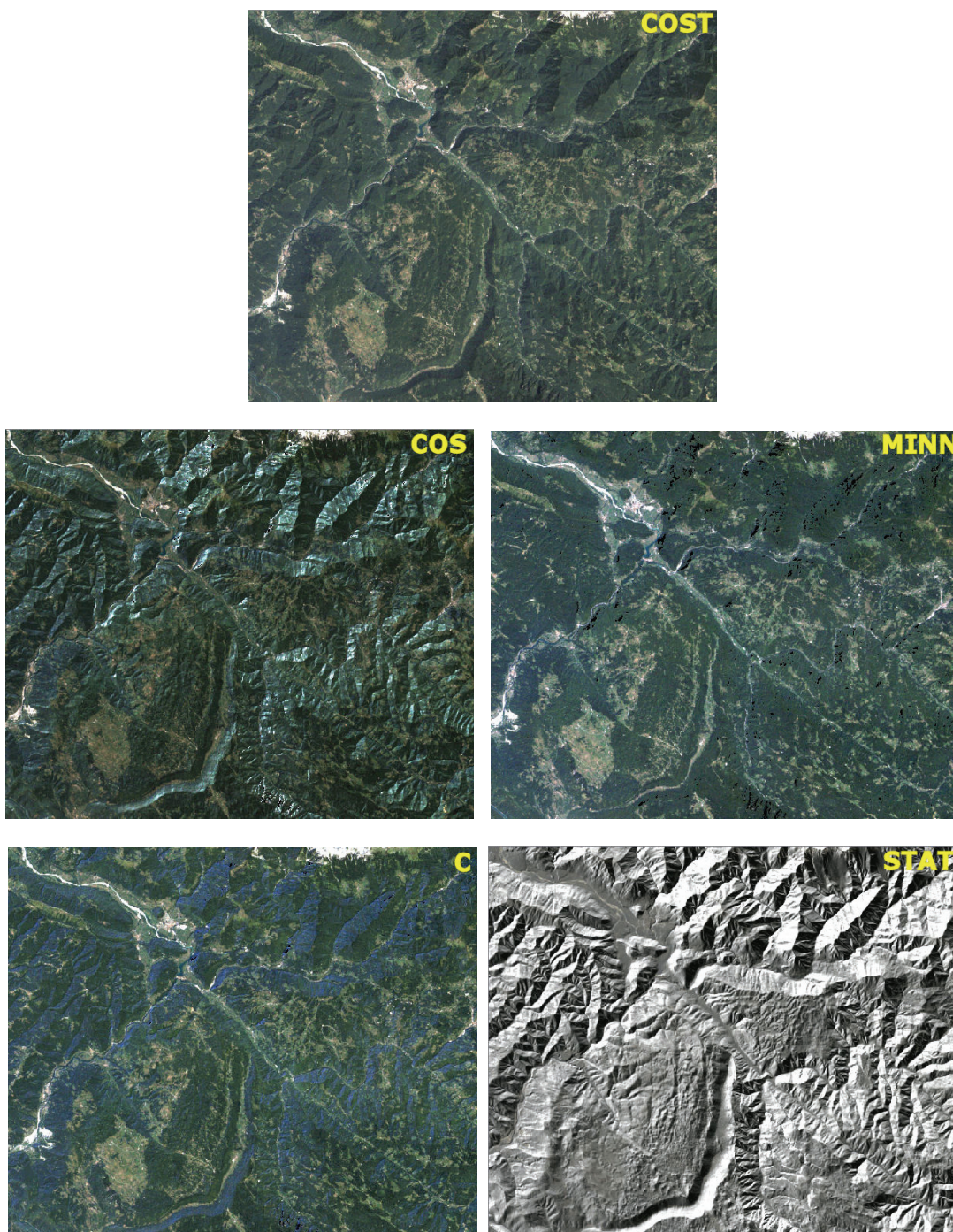
- kosinusno metodo (COS),
- Minnaertovo metodo (MINN),
- c-faktor metodo (c) ter
- statistično metodo (STAT).

Za vse sem razvila lastne modele (glej Prilogo C) na osnovi enačb podanih v poglavju 3.6.2 in jih testirala na primeru referenčnega posnetka 1992-08-18-L5-191-28, obrezanega na območje Slovenije. Rezultate sem ovrednotila s statističnimi testi in z vizualnim pregledom, kako dobro dosegajo zastavljena cilja (izravnave osvetlitve in naklona površja; glej sliko 17).

Kosinusna metoda je, v skladu s pričakovanji, vrednosti v osojnih legah premočno popravila oziroma precenila (osojne lege so opazno svetlejšje od prisojnih), tudi nakloni površja oziroma trirazsežni izgled površja je še vedno precej prisoten.

Minnaertova metoda je najbolj kompleksna, pokazalo se je, da tudi najbolj stabilna ter da daje razmeroma malo »podivjanih« ali ekstremnih vrednosti. S statističnega vidika je dala najboljše rezultate (osojna pobočja pridobijo približno enake vrednosti kot prisojna). Tudi vizualno so rezultati najboljši z vidika »izravnosti« podobe po obeh kriterijih (osvetlitve in naklona površja). Rezultati niso najbolj optimalni z vidika barvne integritete, saj so podobe po opravljeni topografski normalizaciji nekoliko modrikaste. Slaba stran metode so tudi, kot tudi pri ostalih treh, mesta, ki jih topografska normalizacija ne zmora popraviti in se na podobi kažejo kot »luknje«. Pri tem gre za situacijo, ko je vpadni kot Sončevih žarkov na površje $\geq 90^\circ$. Topografska normalizacija, ki deluje na osnovi trigonometričnih funkcij tega ne zmora popraviti, ker je z matematičnega vidika tam, kjer je kosinus vpadnega kota manjši od 0, logaritem nedefiniran oziroma neskončno velik.

C-faktor metoda je v statističnem pogledu dala nekoliko slabše rezultate kot Minnaertova, prav tako v vizualnem ovrednotenju. Osenčena pobočja v splošnem ostajajo temnejša od njihove osojne strani, poleg tega so v modrem kanalu vrednosti v območjih, ki so predmet popravkov, precenjene. Še vedno je prisoten tudi vtis razgibanosti površja. Tudi pri tej metodi so prisotne ekstremne vrednosti, ki se praviloma nahajajo na robovih t. i. praznih con, lukenj. Problem ekstremnih vrednosti lahko rešimo tako, da po topografski normalizaciji povečamo obseg praznih con. Slaba stran metode je tudi, da ima podoba zaradi poudarjenega modrega kanala v osojnih legah nenaraven videz, navkljub temu, da izven teh območij razmeroma dobro ohranja naravni videz površja.

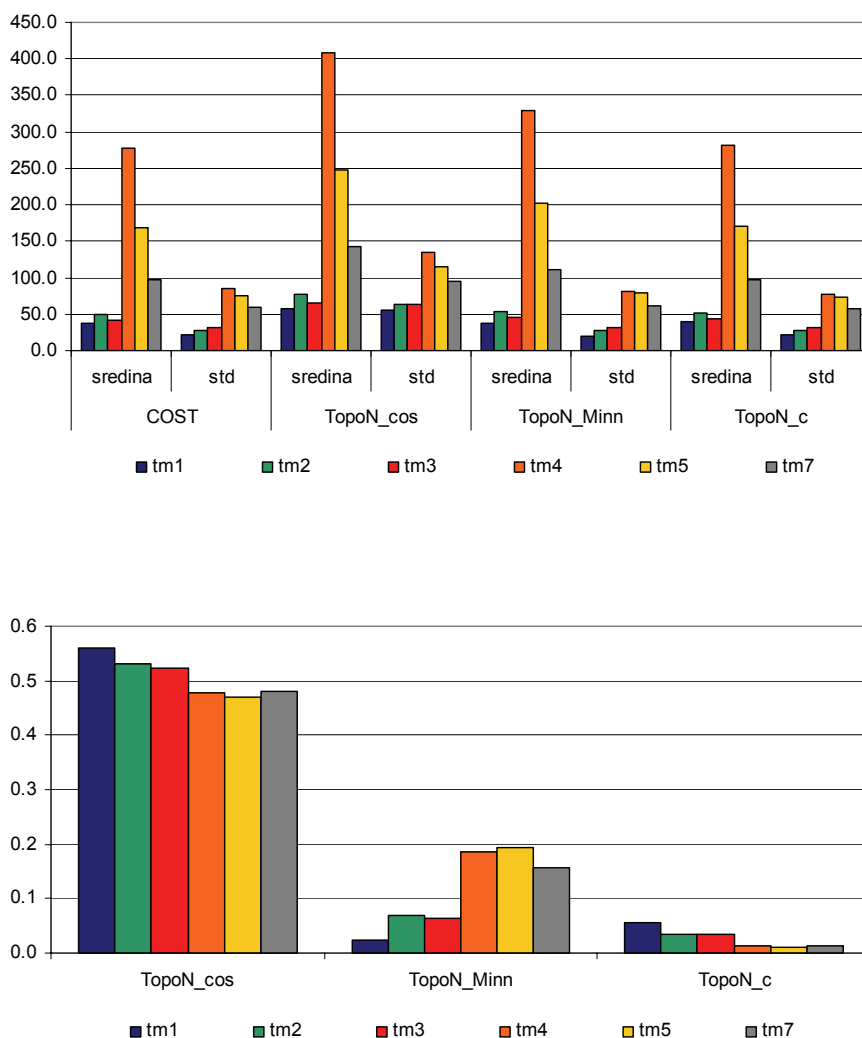


Slika 17: Primeri rezultatov štirih modelov topografske normalizacije (COS, MINN, C in STAT) v kombinaciji kanalov 321 v barvnem prostoru RGB na izseku posnetka 1992-08-18-L5-191-28 ter enak izsek posnetka še pred topografsko normalizacijo, a po atmosferski korekciji z modelom COST.

Figure 17: Examples of four topographic normalisation models results (COS, MINN, C and STAT) in TM 321 as RGB composite, and same 1992-08-18-L5-191-28 image subset before topographic normalization, but after atmospheric correction with COST model.

Statistična metoda je dala z vidika barvne integritete neuporabne rezultate. Ne glede na to, je mogoče prepoznati značilnost, da tudi ta metoda vrednosti v osovini legah v vseh spektralnih kanalih močno preceni. Očitno je tudi, da je učinek razgibanosti reliefa še zelo prisoten.

Primere rezultatov uporabljenih štirih metod na izseku posnetka 1992-08-18-L5-191-28 prikazuje slika 17. Na vrhu je izsek posnetka po atmosferski korekciji z modelom COST in pred topografsko normalizacijo, sledijo topografsko normalizirani izseki posnetka s kosinusno metodo (COS), Minnaertovim modelom (MINN), c-faktor metodo (C) in statistično metodo (STAT).



Slika 18: Zgoraj: Učinki topografskih popravkov na sredino spektralnih kanalov. Primerjava med uporabljenimi modeli topografske normalizacije, na primeru posnetka 1992-08-18-L5_191-28 po atmosferski korekciji COST. Spodaj: relativni prirastek v spektralnih kanalih uporabljenih modelov topografske normalizacije glede na vhodne podatke.

Figure 18: Above: Effects of topographic correction on spectral bands. Comparison between different topographic normalization techniques applied, based on 1992-08-18-L5-191-28 atmospherically corrected COST image. Below: Relative gain in spectral bands after topographic techniques used.

Podrobneje pogledjmo še statistično ovrednotenje lastnosti tehnik, torej kje in na kakšen način prihaja do razlik med testiranimi tehnikami. Slika 18 prikazuje globalne spremembe po izpeljavi topografske normalizacije na (z atmosfersko korekcijo COST popravljene) posnetku 1992-08-18-L5-191-28, in sicer preko statistike sredin spektralnih kanalov. Sprememba vrednosti v osojnih legah (popravek) se namreč kaže tudi na račun premaknjene sredine vrednosti. Če je uporabljena tehnika uspešno obnovila osojne lege, potem lahko pričakujemo rahel dvig vrednosti sredine (ob predpostavki da je osojnih in prisojnih leg približno enako).

Skrajno levo na sliki 18 zgoraj so prikazane srednje vrednosti spektralnih kanalov 1–5 in 7 posnetka po atmosferski korekciji, torej vhodni podatki za topografsko normalizacijo. Takoj zraven so rezultati po kosinusnem modelu topografske normalizacije, sledijo rezultati po Minnaertovem in c-faktor modelu. Rezultatov statističnega modela ne prikazujem, saj tehnika ni dala uporabnih rezultatov. Razvidno je sledeče:

- Kosinusni model najbolj poveča vrednosti sredin, kar samo še potrjuje ugotovitve o precejšenih vrednostih na osojnih legah na podlagi vizualnega ovrednotenja.
- Minnaertov model rahlo poviša vrednosti sredin v vseh kanalih, najmanj v kanalu 1 (modri). Ta podatek očitno vpliva na to, da so podobe po topografski normalizaciji nekoliko modrikaste. Opazimo pa lahko tudi, da so relativni prirastki v IR kanalih (kanalih 4, 5 in 7) približno enkrat večji kot v vidnih kanalih.
- C-faktor model ni učinkovit, relativni prirastek v spektralnih kanalih je minimalen.

Na opisan način sem tehnike ovrednotila na več posnetkih, zgornje ugotovitve veljajo tudi zanje. Na koncu sem sklenila, da za pripravo podatkov uporabim Minnaertov model, saj se je v največ, predvsem pa v najbolj ključnih pogledih odrezal najbolje.

Problema povečane modrikavosti in večjega prirastka vrednosti v IR kanalih se bosta zaradi sistematično enake obdelave posnetkov porazdelila v lastnosti vseh posnetkov na približno enak način. Ostaja tudi problem »lukenj«. V literaturi se te pomanjkljivosti topografske normalizacije skorajda ne omenja. Kar nekaj časa smo s sodelavci inštituta posvetili razvijanju lastne metode za »obnovo lukenj«. Vendar rešitev še ni dovolj učinkovita, da bi prazna mesta obnovili z informacijo primerljivo soseščini »lukenj« in prirejeno na matematični horizont. V nadaljnji obdelavi bodo ta mesta zato izključena iz obravnave. Glede na to, da testna območja ne ležijo v goratem svetu, bo delež izgube podatkov ostal relativno majhen (največ 1 % testnega območja).

5.3.6 Radiometrična standardizacija

Navkljub vsem doslej opravljenim korekcijam posnetkov so med posnetki ostale določene razlike. Ker večina tehnik za analizo sprememb temelji na neposredni primerjavi vrednosti, je bilo nujno posnetke med seboj »prilagoditi« oziroma njihove spektralne kanale »uskladiti«. Uporabila sem standardizacijo z enostavno linearno regresijo, ki se v literaturi za ta namen najpogosteje uporablja. Za razliko od doslej uporabljenih tehnik priprave podatkov, je radiometrično standardizacijo smiselno izpeljati le na območjih, ki so predmet zanimanja, torej na testnih območjih. Tako dosežemo tudi bistveno boljše prilagajanje.

V statističnem pogledu je dala nadvse zadovoljive rezultate. Postopek je v kratkem naslednji. Za izbrana testna območja v scenah 191-28, 190-28 izberemo referenčni posnetek (območje) časovne vrste, na katerega z linearno regresijo med ustreznimi pari kanalov, prilagodimo ostale posnetke (območja). Pri izbiri reference sem pazila na to, da je posnetek čist, tj. da ni prisotnih meglic in oblakov ter da ima dober kontrast. Za poletni letni čas je bil izbran posnetek 1992-08-18-L5-191-28, za spomladanski 2005-05-27-L5-190-28 ter za jesenski letni čas 2000-09-10-L7-190-28.

Če radiometrično standardizacijo izvajamo na manjših območjih, se deloma lahko izognemo motečim vplivom prisotnosti oblakov, pa tudi koeficienti regresije so statistično boljše določeni.

Statistična primerjava sredin ustrežajočih si kanalov med referenco in prilagojeno podobo območjem pokaže, da je standardizacija z linearno regresijo uspešna, saj so odstopanja v sredinah med ustreznim parom spektralnih kanalov $TM_{\lambda}(t_1)$, $TM_{\lambda}(t_2)$, povsem odpravljena.

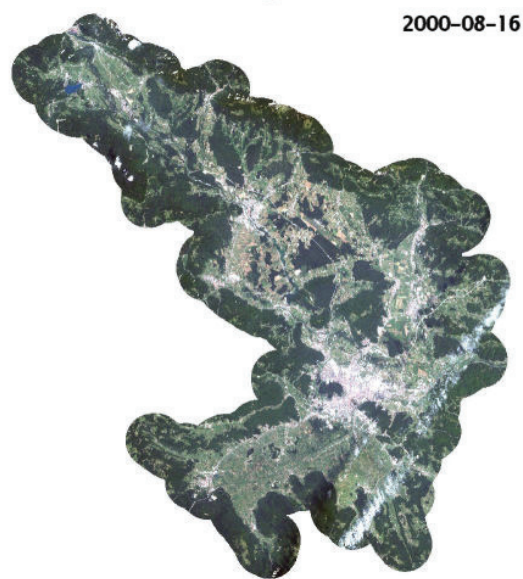
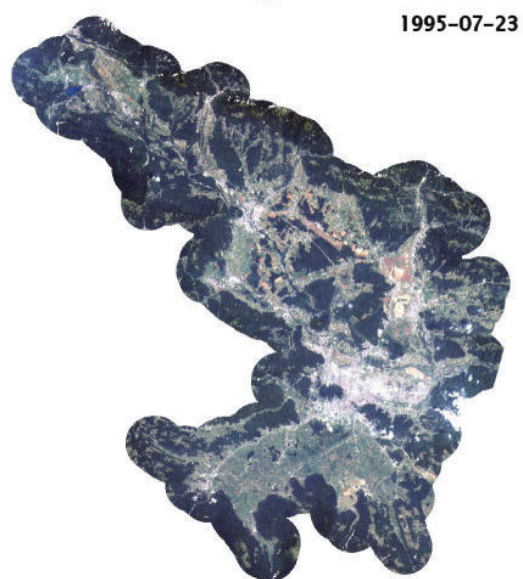
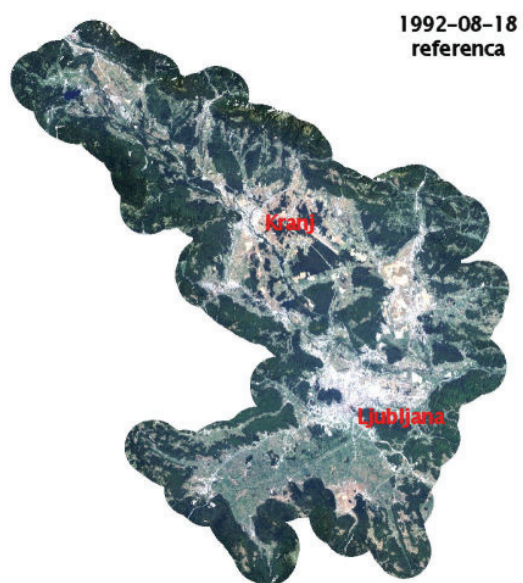
Matematično to lahko izrazimo kot: $M(TM_{\lambda})_{t_1} \approx M(TM_{\lambda})_{t_2}$.

Pri radiometrični standardizaciji s postopkom linearne regresije gre za nekakšen premik »ploskve« prilagajane posnetka, in sicer na tak način, da se sredina vseh vrednosti prilagajane podobe kar najbolj ujame s sredino vseh vrednosti referenčne podobe. To dosežemo preko aditivne in multiplikativne konstante, določene za vsak kanal. Aditivni koeficient (regresijski koeficient premika od izhodišča) premakne ploskev, multiplikativni (regresijski koeficient naklona) jo zasuka oziroma nagne. Zaradi opisane narave postopka je razumljivo, da v statističnem pogledu lahko dosežemo dober rezultat. Ker pa gre zgolj za iskanje globalno najbolj prilagojenega približka celotne ploskve, si je mogoče razložiti tudi razmeroma slabo učinkovitost prilagoditve barvne integritete podobe. Pokaže namreč se, da postopek nima večjih vplivov tudi na globalen izgled podob (v smislu lokalnih barvnih uravnoveženj med prilagajano in referenčno podobo). Opisano potrjuje tudi porazdelitev vrednosti v histogramu. Radiometrična standardizacija sicer bolj ali manj ohrani obliko histograma, spremeni (premakne) pa se lega oziroma izhodišče histograma.

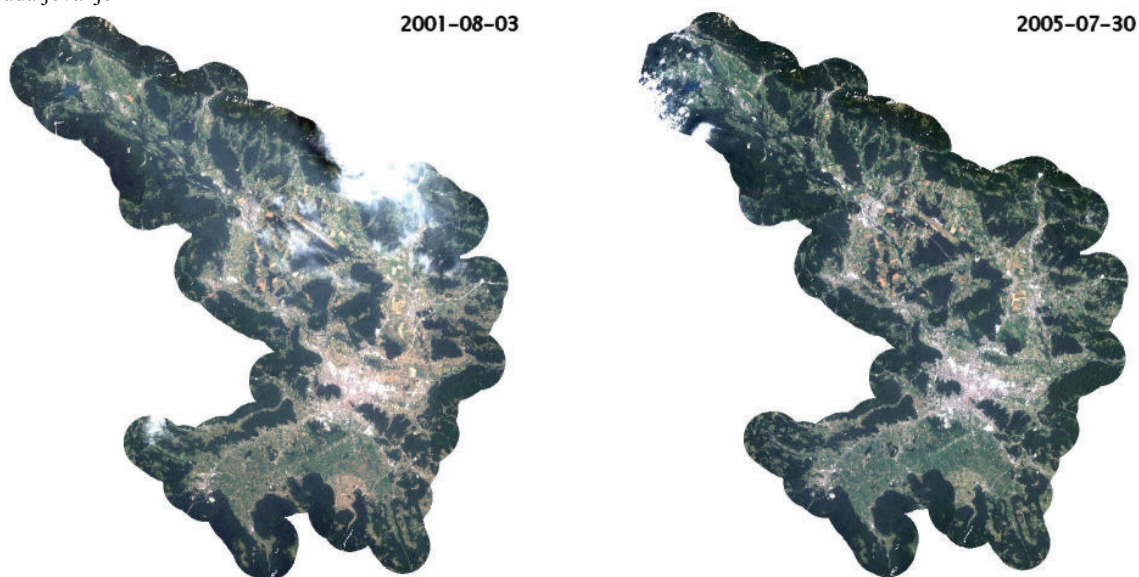
Na sliki 19 je za ilustracijo prikazana časovna vrsta posnetkov za testno območje Ljubljana–Kranj z okolico, v poletnem letnem času.

Vidimo lahko, da so med izrezi posnetkov (tudi po celoviti pripravi podatkov) še prisotne določene radiometrične razlike, ki se kažejo predvsem v barvni integriteti, manj pa v globalni statistiki podob. Vendar so te bistveno manjše, kot če postopka predobdelave podob ne izvedemo. Predvsem se je treba zavedati, da so odstranjena številna lokalna topografska neskladja, ki bolj otežujejo primerjavo stanj med različnimi datumi (povzročanje navideznih sprememb) kot preostala globalna radiometrična neskladja.

Od te faze priprave podatkov naprej sem vse nadaljne postopke, tj. pretvorbe spektralnih vrednosti in analize sprememb na površju opravljala le še na izbranih testnih območjih.



... nadaljevanje



Slika 19: Časovna vrsta izrezov posnetkov za testno območje Ljubljana–Kranj z okolico, v poletnem letnem času, po opravljeni predpripravi podatkov. Predpriprava podatkov je zajela atmosfersko in topografsko korekcijo ter radiometrično standardizacijo.

Figure 19: Time series dataset for Ljubljana–Kranj and surrounding study area in summer season, after data preprocessing is shown. In preprocessing steps atmospheric and topographic corrections were applied as well as radiometric standardisation.

5.3.7 Pretvorba spektralnih vrednosti v poudarjene lastnosti površja

Ker je eden od zastavljenih ciljev raziskave tudi primerjava vpliva med vsestranskim spektralnim prostorom posnetkov in izbranimi poudarjenimi lastnostmi površja, sem sklenila primerjati analizo sprememb na naslednjih količinah:

- radiance (RAD) in odbojne vrednosti površja (ODB): primerjava šest spektralnih kanalov: 1-5, 7,
- normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI): primerjava enega sloja,
- glavne komponente (PC): primerjava ene do največ treh komponent ter
- Kauth-Thomasove komponente (KTT): primerjava treh komponent.

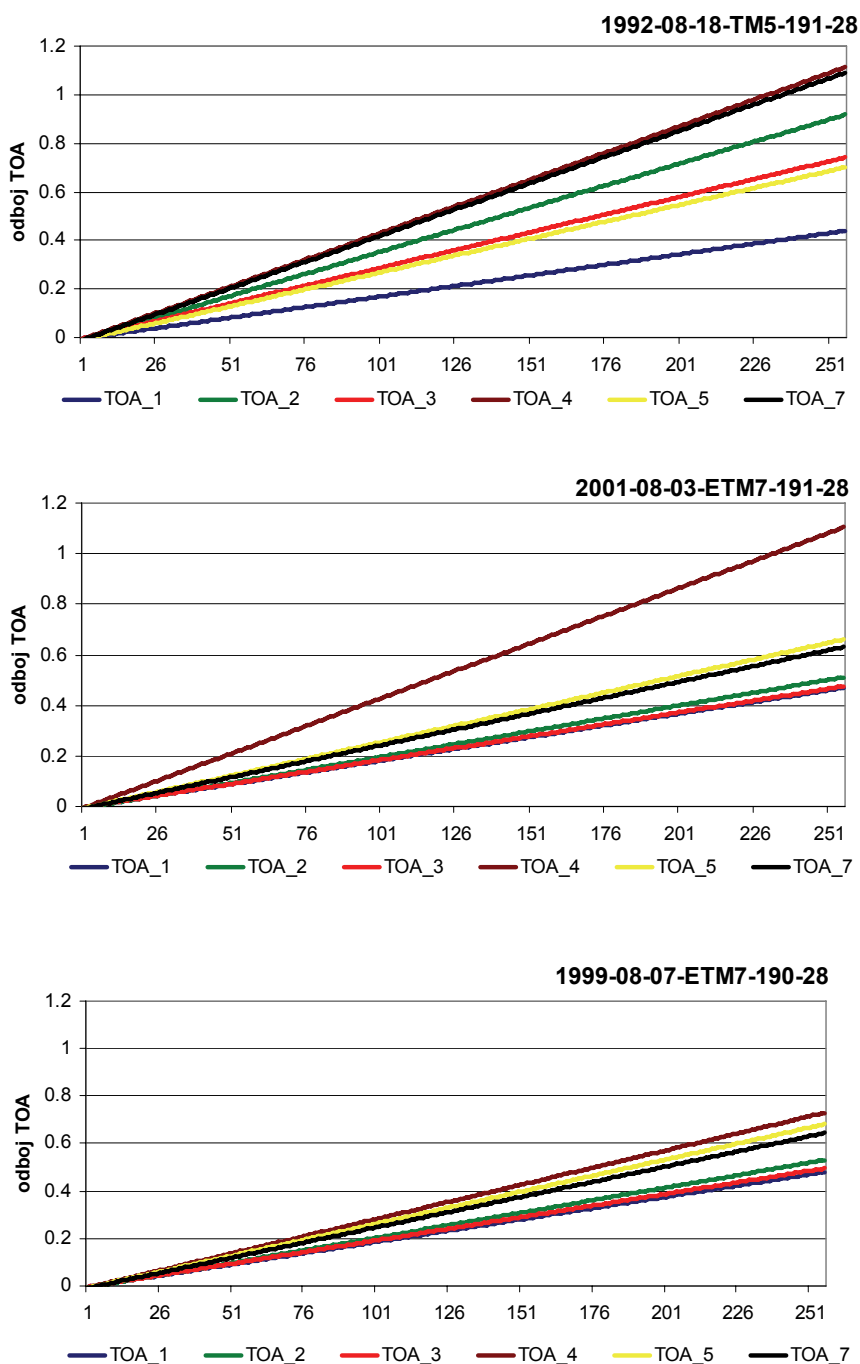
Izračun in uporabljeni koeficienti so predstavljeni v poglavju 3.8. Pretvorbo v glavne komponente sem opravila z vgrajenim modulom v programu Erdas Imagine 9, za ostale pretvorbe sem modele sestavila v modelirniku istega programa.

5.4 Analiza učinkov predobdelave na lastnosti posnetkov

V tem poglavju so predstavljeni pomembnejši rezultati analize učinkovanja posameznih tehnik na lastnosti podob, ki sem jih uporabila v fazi priprave podatkov.

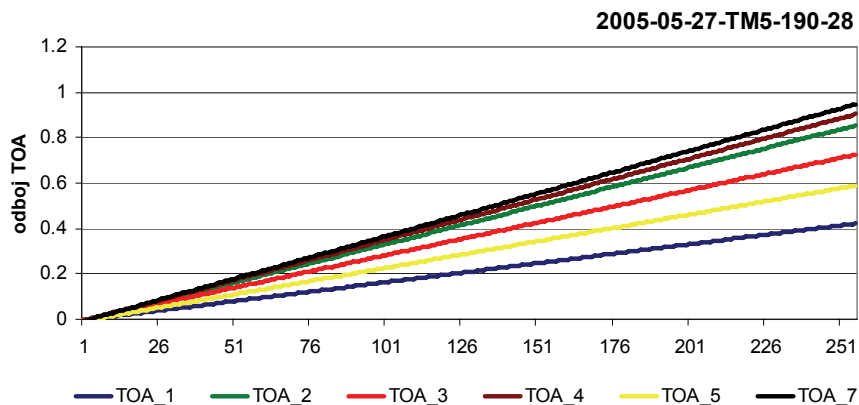
5.4.1 Učinki in vplivi atmosferskih popravkov z modelom COST

Model COST zaradi vpeljave izvenatmosferskih solarnih koeficientov in postopka pretvorbe digitalnih vrednosti (DN) preko radianc (L) v absolutne vrednosti odboja (ρ) lahko korenito spremeni sliko relativnih razmerij in sliko razpona vrednosti med spektralnimi kanali. Analize, ki sledijo, se nanašajo na posnetke obrezane na območje Slovenije s trikilometrskim ovojem. Na sliki 20 so prikazani štirje primeri pretvorbe posnetkov v odbojne vrednosti (tj. kot jih zazna senzor nad atmosfero, TOA) z odstranjenim vplivom atmosferskega odboja (z modelom COST).



se nadaljuje...

... nadaljevanje



Slika 20: Primerjava spremenjenih razmerij med spektralnimi kanali v podobah odboja po opravljeni atmosferski korekciji COST.

Figure 20: Comparison of spectral bands relationships among reflectances after COST atmospheric correction applied.

Vidimo lahko, da so nakloni različnih spektralnih kanalov različni ter da so odnosi med njimi med različnimi posnetki prav tako lahko različni. Praviloma za *vidni del spektra* velja, da ima modri kanal E/TM 1 najmanjši naklon, nekoliko večjega ima rdeči kanal E/TM 3, in največjega med njimi zeleni kanal E/TM 2. Naklon premice odraža tudi kakšen je lahko razpon vrednosti v obravnavanem kanalu. Modri kanal ima najmanjši razpon vrednosti, kar je posledica, da je korak ali prehod v lestvici radiometričnih enot (tj. prirastek ali gain) največji oziroma najbolj grob. Zanimivo je, da ima zeleni kanal teoretično »odobren« večji razpon vrednosti kot rdeči. To si morda lahko razložimo tudi preko kalibracije senzorjev in njihovih lastnosti optimalnega zajema informacij tudi glede na lastnosti odboja površja v različnih delih spektra. V *IR delu spektra* so odnosi med IR kanali (nakloni premic) med posnetki bistveno bolj spremenljivi. Na podlagi opisane empirične določitve velja le, da ima IR kanal 4 vselej in med vsemi spektralnimi kanali največji naklon, torej tudi največji razpon vrednosti.

Opažena spremenljivost med nakloni premic spektralnih kanalov odboja TOA narekuje potrebo po vpeljavi radiometrične standardizacije, pa tudi previdnost pri časovnih analizah, kjer se uporablja tudi IR del spektra.

Obnašanje metode COST lahko preverimo tudi tako, da proučimo vlogo koeficientov, ki jih uporablja izračun (s tem ocenimo robustnost metode glede na različne pogoje) ter ocenimo vizualen doprinos (kako uspešno odpravlja stranske učinke atmosferskega odboja). Poglejmo, kakšno vlogo v računu imata velikost deleža vidljivosti kot parameter za oceno stopnje atmosferskega odboja ter odkloni v zenitnem kotu Sonca.

Robustnost Chavezove metode vidljivosti COST na različne pogoje

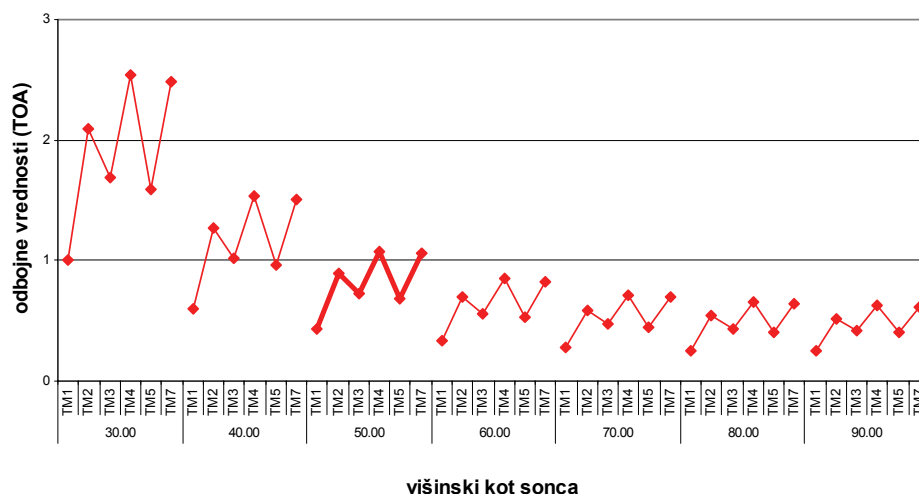
Po Chavezovem modelu odpravljanja vpliva atmosferskega odboja v posnetkih, so maksimalne odbojne vrednosti površja, kot jih zazna senzor nad atmosfero (TOA odboj), odvisne od razdalje med Soncem in Zemljo D , solarne konstante S_{exo} , maksimalne radiance $LMAX$ in višinskega kota Sonca S_{elev} . V funkcijski obliki to lahko zapišemo:

$$\rho_{MAX} = TOA_{MAX} = f(D, S_{exo}, LMAX, S_{elev})$$

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot D^2 (L_{\lambda} - L_{haze_{\lambda}})}{S_{EXO \lambda} \cdot \cos^2(90 - S_{elev})} \quad (34)$$

Model COST uporablja kosinus zenitnega kota Sonca, kot prvi približek prenosa energije skozi ozračje v suhih in polsuhih klimatskih območjih. V različnih situacijah zajetih posnetkov Landsat se v enačbi 34 spreminjata predvsem koeficienta D in S_{elev} . Razdalja med Soncem in Zemljo v astronomskih enotah manj, višinski kot Sonca pa lahko kar znatno. Iz tega razloga zato velja preveriti predvsem vpliv višinskega kota Sonca na določitev odboja TOA v modelu COST.

Vpliv položaja Sonca (višinski kot sonca) na odbojne vrednosti površja, kot jih zazna senzor nad atmosfero, in po spektralnih kanalih, sem testirala s simulacijo velikosti višinskega kota na primeru posnetka 1992-08-18-L5-191-28 (slika 21).



Slika 21: Simulacija vpliva položaja Sonca (višinskega kota) na odbojne vrednosti površja kot jih zazna senzor nad atmosfero (odboj TOA).

Figure 21: Simulation of Sun position (Sun elevation) on TOA reflectance.

Če upoštevamo predpostavko za razpon TOA odboja, po kateri naj bi vrednosti zasedale interval med 0 in 1, se pokaže, da z metodo COST lahko odpravljamo atmosferski odboj le na posnetkih zmerne geografske širine. Za situacije, ko je višinski kot sonca majhen, na primer od 10° do 30° nad ekvatorjem, se vrednosti gibajo med 10 in 20 oziroma med 1 in 2,5, kar znatno presega teoretični interval vrednosti TOA. Pri višinskem kotu 45° bodo posamezne vrednosti na posnetku (tj. zelo svetli predmeti, kot so oblaki, sneg plaža), lahko presegle vrednost 1, medtem ko za vse višinske kote večje od 50°, takšnih presežkov ne bi več smeli dobiti, če na posnetku ni prisotnega šuma (naključno ali sistematično razpršeni saturirani piksli; zelo svetli predmeti).

Na sliki 21 se vidi, da je vpliv višinskega kota na odbojne vrednosti TOA res velik za majhne višinske kote ter manj radikalen za večje višinske kote (nad 50°). S poudarjeno črto je ponazorjena situacija za dani posnetek 1992-08-18, kjer višinski kot Sonca znaša 48,98°. V

razmerah, ko je višinski kot Sonca med 60 in 90°, bodo razlike majhne, vrednosti TOA odboja pa z večanjem višinskega kota na splošno počasi upadajo.

Model COST je torej primeren le za posnetke, kjer je višinski kot Sonca v času zajema podatkov večji od 45°.

Nadalje me je zanimal *vpliv določitve t. i. temnega predmeta na ocenjeni delež atmosferskega odboja*. Pri Chavezovi metodi vidljivosti moramo ročno identificirati najbolj temne predmete na posnetku. Za uporabljeni model COST sem v vsakem spektralnem kanalu identificirala skupino vsaj nekaj deset do sto pikslov, ki so tudi v prostorskem smislu tvorili razpoznavno skupnost (torej ne izbiramo posameznih najmanjših vrednosti, niti ne prav določenih tipov predmetov, kot je npr. globoka voda ali senca); izbira je še vedno razmeroma subjektivna. Na ta način identificirani temni predmeti so lahko različni v različnih spektralnih kanalih, predstavljajo pa teoretično radianco temnih predmetov, ki naj bi imeli 1 % odboj. Praviloma so identični v vidnem delu spektra, v IR in med IR deli spektra pa to ni več nujno. Dobra stran je, da vselej poiščemo najtemnejšo skupino na posnetku (torej neke značilne vrednosti). Ker so vrednosti pikslov na posnetku nasploh, pa tudi tako izbrane vrednosti, podvržene različnim okoliščinam v ozračju in drugim pogojem, me je zanimalo predvsem ali izbira t. i. najnižje vrednosti DN lahko znatno vpliva na rezultat atmosferske korekcije z modelom COST.

Pred tem si pogledjmo, kako model COST določa in obravnava delež atmosferskega odboja L_{haze} (enačba 35):

$$L_{haze} = f(L1\%, L_{DN_{MIN}}, D, S_{EXO}, S_{elev}),$$

$$L_{\lambda}1\% = 0,01 \cdot \frac{S_{EXO \lambda} \cdot \cos^2(90 - S_{elev})}{\pi \cdot D^2},$$

$$L_{MIN \lambda_{haze}} = L_{MIN} + DN_{MIN} \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255},$$

$$L_{\lambda_{haze}} = L_{MIN \lambda_{haze}} - L_{\lambda}1\%.$$
(35)

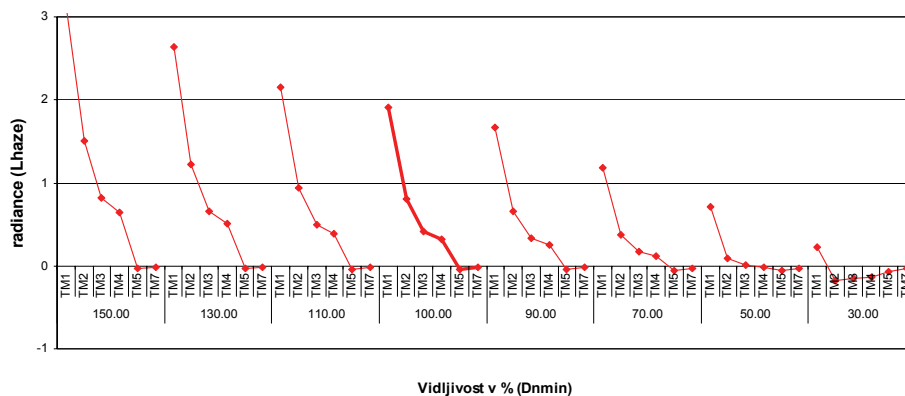
Pri tem so:

- $L_{\lambda}1\%$ teoretična radianca temnega predmeta, ki naj bi imela po predpostavki modela COST 1 % odboj (in ne nič odstotni),
- $L_{MIN \lambda_{haze}}$ je najmanjša vrednost DN, DN_{MIN} , ki smo jo določili z identifikacijo temnega predmeta, pretvorjena v radianco temnega predmeta,
- simbol λ označuje valovno dolžino oziroma spektralni kanal.

Vpliv izbire najnižje vrednosti temnega predmeta (deleža atmosferskega odboja v danem spektralnem kanalu) sem, upoštevaje predpostavko o 1 % odboju temnih predmetov, simulirala tako, da sem v modelu povečevala in pomanjševala izhodiščne podatke DN_{MIN} . Opisani učinek na ocenjeni delež atmosferskega odboja, podan v radiancah, kaže slika 22.

Poudarjene so vrednosti, ki so bile dejansko določene za obravnavani posnetek. Vidimo, da se ocenjeni delež radianc (kot prispevek atmosferskega odboja) giblje med 0 in 1, kar je pri danem možnem razponu vrednosti radianc malo. Če bi izbrali še nižje vrednosti kot »predstavnice« atmosferskega odboja, bi bil njihov vpliv že zanemarljiv v določitvi končnega

odboja TOA površja. Sklepna ocena je, da sama izbira temnega predmeta, če ni povsem zgrešena, v modelu COST nima pomembnejšega vpliva na izračun končnih odbojev TOA.



Slika 22: Simulacija vpliva izbire najnižje vrednosti temnega predmeta (DNmin) na ocenjen delež atmosferskega odboja izražen v radiancah vidljivosti (Lhaze) v modelu COST.

Figure 22: Simulation of dark object minimum value selection on estimated part of path reflection in Lhaze radiance units within COST model.

Vpliv letnih časov na odbojne vrednosti površja

Vpliv letnega časa na razlike v odbojnosti površja za posnetke Landsat TM in ETM+ prikazuje slika 23. Posnetki so zloženi po časovnem zaporedju zajetja, ne glede na to, katero sceno (območje) pokrivajo. Namen takšnega prikaza je opazovati:

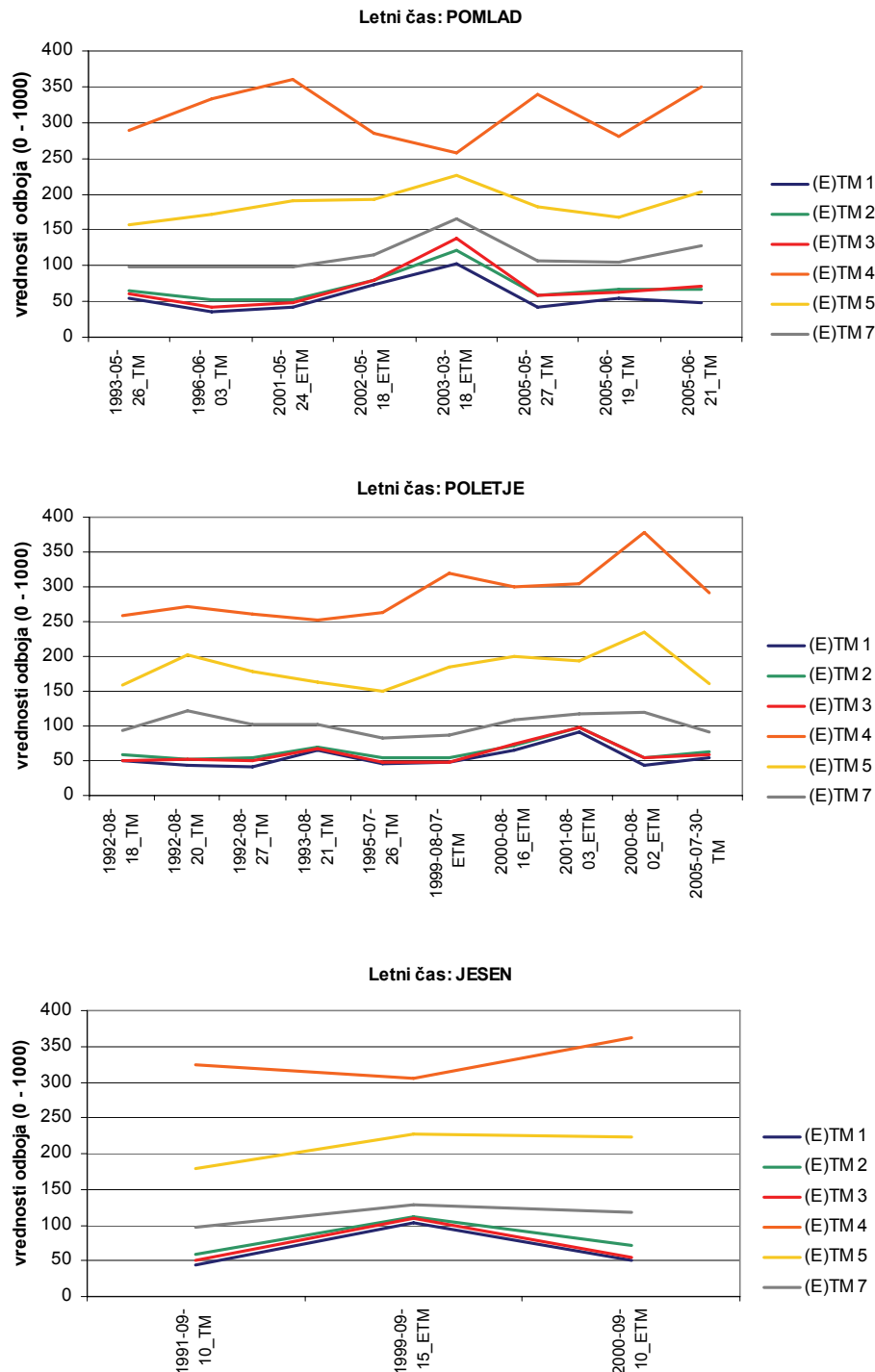
- razlike v obliki »krivulj« med letnimi časi ter
- notranjo stopnjo variabilnosti v odbojnih vrednostih med posnetki približno enakega letnega časa.

Takoj lahko opazimo razmeroma visoko homogenost med *vidnimi kanali* (E/TM 1–3). Praviloma zavzemajo podobne odbojne vrednosti, razpon vrednosti med različnimi posnetki je najmanjši in je med najnižjimi, in sicer med 50 in 100. V pomladnem letnem času v svoji vrsti posnetkov izstopa posnetek 2003-03-18 tako po višini odbojnih vrednosti kot razslojenosti med kanali 1–3. To je razumljivo glede na to, da je zajet zelo zgodaj spomladi, ko vegetacija še miruje. V poletnem času je tak posnetek 2001-08-03 in v jesenskem 1999-09-15. Višje vrednosti v vidnem delu spektra so posledica dejstva, da sta nazadnje omenjena posnetka precej prekrita z oblaki. Posnetke, ki v kakršnem koli pogledu značilno odstopajo od svoje vrste, bo v časovnih analizah treba obravnavati previdneje.

Če primerjamo stanje med različnimi letnimi časi, so razlike v višini odbojnih vrednosti največje v IR kanalu 4. Spomladi in jeseni, ko se v vegetacijskem pokrovu odvijajo največje spremembe, so zato tudi višje kot poleti. Druga dva IR kanala (kanal 5 in 7) sta, kot kaže, manj podvržena lastnostim, ki jih s sabo prinaša letni čas.

Nobena od vrst različnih letnih časov ni optimalno homogena. Na podlagi precejšnje razgibanosti krivulj tako znotraj dane časovne vrste kot med vrstami, lahko znova potrdimo, da so posnetki dejansko odraz številnih dejavnikov in različnih okoliščin v času zajema. Zato

je za analizo sprememb skozi čas, ki temelji na neposredni primerjavi vrednosti, še toliko bolj pomembno poiskati način za najboljšo normalizacijo oziroma standardizacijo posnetkov.



Slika 23: Primerjava razlik v vrednostih odboja glede na različne letne čase: pomlad (zgoraj), poletje (na sredini) jesen (spodaj).

Figure 23: Comparison of season effects on imagery with respect to spring (top), summer (middle) and autumn (down).

Vpliv topografskih lastnosti območja ter senzorja na odbojne vrednosti površja

Nehomogenost med krivuljami posnetkov Landsat je lahko tudi odraz različnih lastnosti (strukture in oblike) površja in/ali odzivnosti senzorja. Posnetki zahodnega dela Slovenije (191-28) zajemajo precej goratega sveta, posnetki osrednje Slovenije (190-28) manj, posnetki vzhodnega dela pa praktično nič, zato je časovno oblikovane vrste smiselno (pa čeprav v grobem) pogledati s perspektive razgibanosti reliefa.

Primer variabilnosti, lahko rečemo tudi stopnje nehomogenosti med posnetki glede na območje scene in glede na letne čase prikazuje slika 24. Pokaže se, da je nehomogenost med spektralnimi kanali posnetkov za območje 191-28 največja, manjša pa za ostali dve območji.

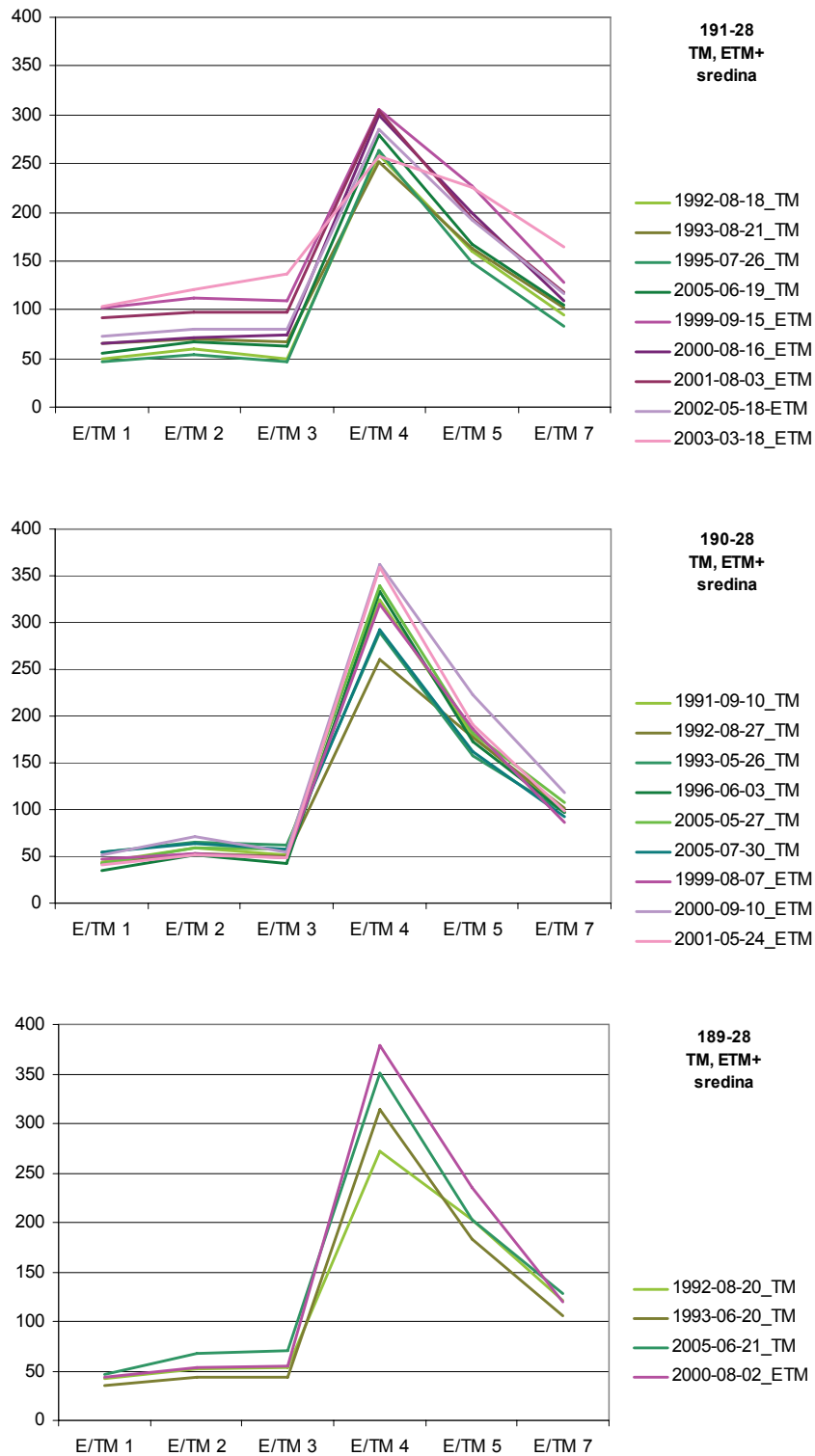
Glede na to, da je relief v Sloveniji povsod precej razgiban, dajejo ti podatki slutiti le, da gre del variabilnosti na posnetkih 191-28 lahko na rovaš vpliva ekstremnejše razgibanosti reliefa. V kakšni meri se razgibanost površja zrcali v odbojnih lastnostih, bi lahko določili natančneje šele, ko bi primerjali odbojne vrednosti za različne morfološke ali reliefne tipe površja.

Nadalje se pokaže tudi, da večji del te nehomogenosti v območju scene 191-28 odpade na posnetke senzorja ETM+ (v vijoličnih odtenkih). Posnetki senzorja TM (v zelenih odtenkih) so z vidika variabilnosti v odbojnih vrednostih v različnih spektralnih kanalih celo precej bolj homogena skupina. Navedeno velja tem bolj, če upoštevamo tudi razlike v letnih časih. Drugi prav tako nezanimljiv del nehomogenosti, kot kaže primer, je torej mogoče pripisati tudi razlikam v senzorju.

Na koncu lahko povzamemo, da je po opravljeni atmosferski korekciji z modelom COST na posnetkih še vedno prisotnih veliko drugih vplivov in okoliščin zajema. Treba se je zavedati, da do razlik ne prihaja zgolj zaradi različnih letnih časov in meteoroloških pogojev, temveč je določen del tudi posledica razlik v odzivnosti senzorja (TM, ETM+) in razgibanosti površja.

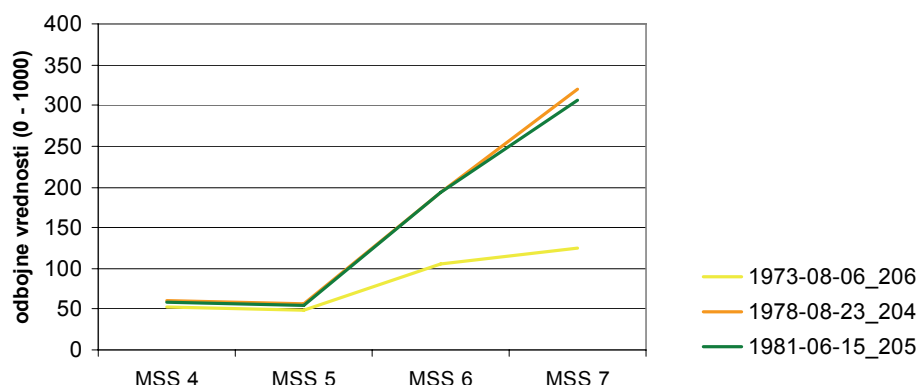
Rezultate po COST korekciji na primeru posnetkov Landsat MSS kaže slika 25. Ugotovimo lahko, da imata kanala MSS 4 in 5, ki sta po spektralnih lastnostih najbližje kanaloma 2 in 3 pri posnetkih E/TM, podobne odbojne vrednosti kot posnetki senzorjev TM in ETM+. V IR delu spektra prihaja do precejšnjih razlik tako med posnetki MSS iz enakega letnega časa (1973 nasproti 1978), kot v primerjavi z IR delom spektra E/TM posnetkov. Glede primerjave z drugima senzorjema je razlike mogoče pojasniti, saj se IR kanali na MSS posnetkih ne prekrivajo tudi s pasovi IR kanalov pri E/TM posnetkih.

Opozoriti velja tudi na to, da posnetek 1973-08-06 pokriva območje zahodne Slovenije, vendar ne seže do Ljubljane (206-28), posnetek 1981-06-15 večino, predvsem pa širši osrednji del Slovenije (205-28) in posnetek 1978-08-23 vzhodno polovico Slovenije (204-28). Nadalje tudi to, da so bili posnetki zajeti v jasnem vremenu, tako da prisotnost oblakov v tem primeru ne moti spektralnih razmerij. Kljub vsemu vpliv reliefa in letnih časov ne more zanesljivo pojasniti odstopanja posnetka 1973-08-06 v IR delu spektra. Glede na vse skupaj lahko le zaključimo, da je za načrtovane časovne analize površja potencialno uporaben samo vidni del spektra, torej kanala MSS 4 in MSS 5.



Slika 24: Variabilnost med Landsat posnetki na enakem območju (191 ali 190 ali 189) in med senzorjema TM oziroma ETM+ po COST korekciji.

Figure 24: Variability of Landsat imagery on spatially coincided imagery (191 or 190 or 189) and with regard to different sensors TM and ETM+, respectively, after COST correction.



Slika 25: Spektralne lastnosti posnetkov Landsat MSS po atmosferski korekciji z modelom COST.

Figure 25: Landsat MSS imagery spectral characteristics after COST atmospheric corrections.

Vizualno ovrednotenje posnetkov popravljenih z modelom COST

Če izhajamo iz predpostavke, da atmosfersko sipanje povzroča megličavost podob in da ima to za posledico slabši kontrast, posnetki pa zato delujejo svetlejši, potem velja posnetke popravljene z modelom COST ovrednotiti s tega zornega kota. Videz posnetkov se spremeni in sicer na tak način, da delujejo nekoliko bolj izostreni in malenkost temnejši. Poudarijo se tudi razlike med svetlejšimi predmeti, poveča se diferenciacija v urbanih predelih, podobno lahko velja tudi za kmetijske površine, ki so svetlih tonov. Model COST torej uspešno odpravlja negativne posledice atmosferskega sipanja na posnetkih. Seveda pa to ne pomeni tudi, da odpravlja in obnavlja podobo površja pod meglicami in oblaki. Ti so še naprej prisotni in moteči.

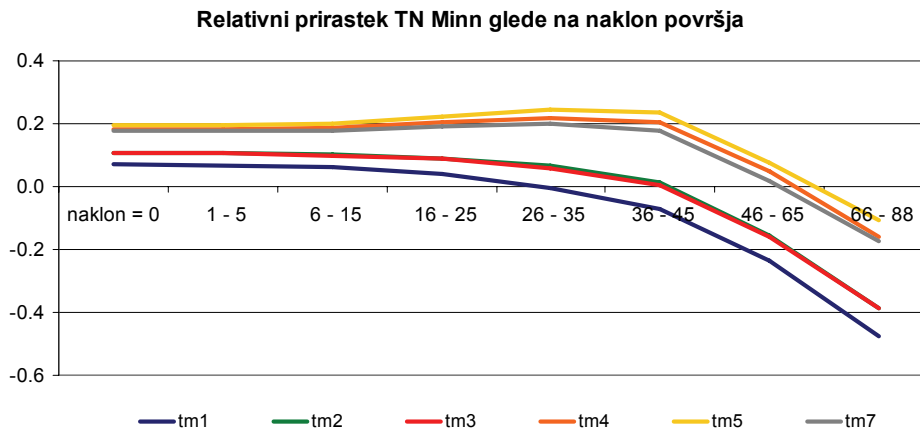
5.4.2 Učinki topografske normalizacije (Minnaertov model) na spektralne lastnosti podob

Učinki topografske normalizacije na lastnosti in videz popravljenih podob

S topografsko normalizacijo odpravljamo vpliv nagnjenosti terena in osvetlitve. Zato obnašanje tehnik/e najbolj nazorno spoznamo, če si učinkovitost popravkov pogledamo iz teh dveh vidikov. Pri tem nas zanima prostorska razporeditev učinkov ter spremembe v spektralnem prostoru podob. Analize se nanašajo na posnetke obrezane na območje Slovenije s tri kilometriskim ovojem.

Slika 26 prikazuje učinek »izravnave« naklona površja v osmih naklonskih razredih (v stopinjah), na primeru posnetka 1992-08-18-L5-191-28. Prirastek topografske normalizacije (Minnaertov model) je izračunan na podlagi relativne primerjave med posnetkom pred (TM) in po (TN) topografski normalizaciji:

$$\text{relativni prirastek} = \frac{TN - TM}{TM}. \quad (36)$$

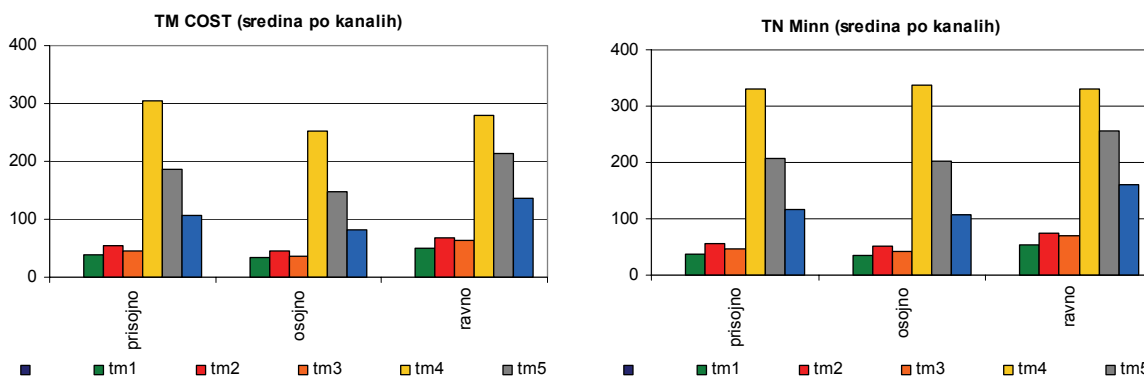


Slika 26: Učinek »izravnave« naklona površja po TN z Minnaertovim modelom po izbranih naklonskih razredih, na posnetku 1992-08-18-L5-191-28.

Figure 26: Effects of Minnaert model slope elimination on slope classes of 1992-08-18-L5-191-28 image.

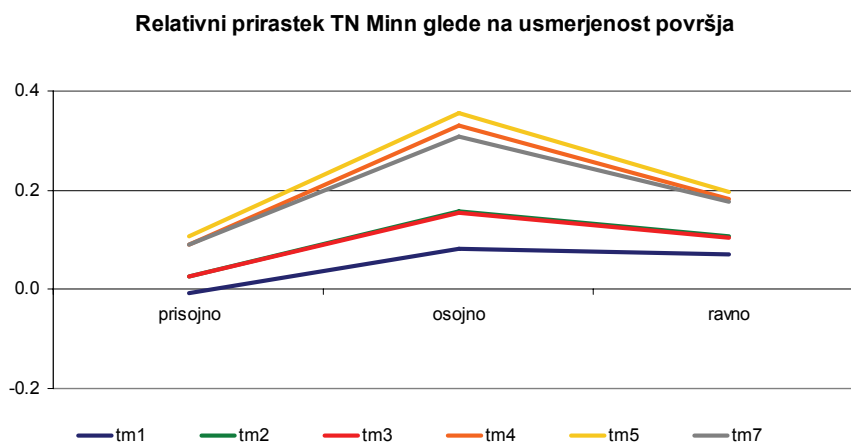
Ugotovimo lahko, da je učinek topografske normalizacije v tem, da se velikim naklonom zmanjša vrednost, manjšim pa le rahlo poveča. Kar podpira predpostavko same narave in prvega cilja postopka topografske normalizacije.

Slika 27 na podoben način obravnava drugi cilj topografske normalizacije: popravke zaradi različne osvetlitve površja. V grafu na levi strani zgoraj so prikazane sredine spektralnih kanalov posnetka po atmosferski korekciji z modelom COST, a pred topografsko normalizacijo, in sicer glede na to ali gre za osojne lege, prisojne ali lege na ravnem. Razlika med prisojnimi in osojnimi legami je očitna. Na desnem grafu zgoraj je prikazana situacija po topografski normalizaciji z Minnaertovim modelom. Vidimo, da so vrednosti v vseh treh obravnavanih razredih osvetlitve površja skoraj izenačene. Največji prirastek vrednosti zasledimo v osojnih legah. Tudi ta analiza podpira predpostavko same narave in potrjuje učinkovitost tehnike glede drugega cilja postopka topografske normalizacije.



se nadaljuje...

... nadaljevanje

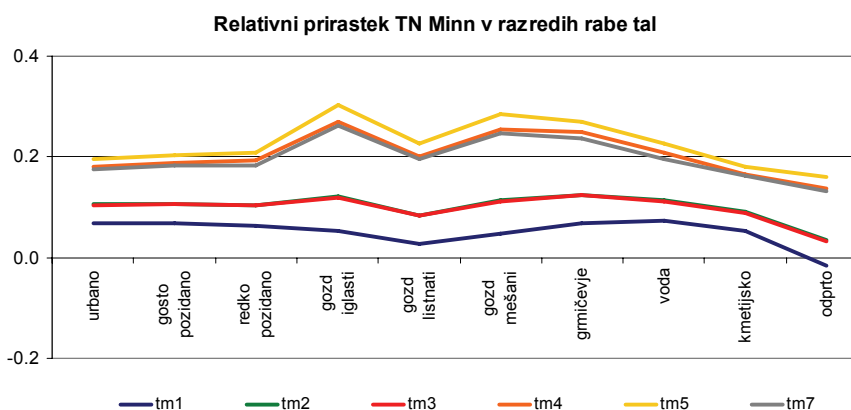


Slika 27: Učinek »izravnave« usmerjenosti površja po topografski normalizaciji z Minnaertovim modelom glede na prisojne in osojne lege ter ravno, na istem posnetku.

Figure 27: Effects of Minnaert model illumination elimination on exposed, non exposed and flat surfaces on the same area, same image.

Ker vemo, da na odboj površja vplivajo tudi lastnosti pokrova površja (različni predmeti svetlobo odbijajo različno), sem pogledala učinke topografske normalizacije še v luči velikosti relativnega prirastka v različnih razredih rabe tal / pokrovnosti. Slika 28, ki slednje prikazuje, potrди zgolj to, da do razlik prihaja. Če pa bi želeli natančneje ugotoviti v kakšnem odnosu so učinki topografske normalizacije na različne razrede rabe tal / pokrovnosti, bi morali sočasno upoštevati vsaj še prevladujočo usmerjenost in nagnjenost površja.

Na splošno torej lahko ugotovimo, da izbrana tehnika topografske normalizacije (Minnaertov model) v soglasju z naravo in splošnimi cilji postopka, zadovoljivo odpravlja razlike v osvetlitvi in nagnjenosti površja.



Slika 28: Učinek topografske normalizacije (relativni prirastek) v različnih razredih rabe tal / pokrovnosti.

Figure 28: Effects of topographic normalization (relative gain) in different land use / cover classes.

Glede na to, da po topografski normalizaciji z Minnaertovim modelom na popravljene podobe ostanejo *s podatki nezapolnjena mesta*, si na tem mestu pogledimo še, za kakšen delež izgubljenih podatkov sploh gre. Delež je v prvi vrsti odvisen od razgibanosti reliefa, kjer je več goratega sveta, je delež razumljivo večji, ter od položaja Sonca. Za zahodni del Slovenije, ki ga prekrivajo posnetki 191-28, znaša delež med 1,2 in 1,4 %. Za osrednji del Slovenije, ki ga pokrivajo posnetki 190-28 je delež manjši, približno 0,8 do 1 %. Problem je seveda pomembnejši za gorato površje, in sicer, če vzamemo nekoliko širše območje Julijskih Alp, nanese delež dobrih 5 %, če pa bi proučevali res samo visokogorje Julijskih Alp, bi delež zavzel kar 10 % podatkov.

Vpliv izbire reprezentativnega območja na rezultate topografske normalizacije

Ker regresijske parametre za Minnaertov model določamo na izbranem območju, praviloma za to nalogo izberemo manjše reprezentativno območje, sem proučila še vpliv izbire tega na rezultate topografske normalizacije, in sicer v statističnem pogledu, v vizualnih učinkih ter stabilnosti regresije (spremenljivosti regresijskih koeficientov).

Vplive lastnosti reprezentativnega območja sem analizirala na sedmih območjih, ločeno za posnetke 191-28 (območja 10_1, 10_2, 10_3 in 10_4) ter posnetke 190-28 (območja aoi_1, aoi_2, aoi_3). Na koncu sta bili izbrani območji 10_1 in aoi_3. Preglednica 9 (1. sklop) podaja *topografske lastnosti teh območij*. Zaradi preglednosti podajam za posnetke 191-28 le rezultate izbranega referenčnega območja 10_1. Ugotovimo, da se najbolj obnesejo območja, ki so v vseh topografskih pogledih blizu povprečju Slovenije (srednja nadmorska višina znaša 556 m, srednji naklon 15°, srednja usmerjenost površja pa 183°), da torej v topografskih lastnostih niso ekstremna. Glede pestrosti v tipu pokrovnosti je bolje, da je območje bolj homogeno, vendar to ne pomeni, da naj bo zastopan en sam ali dva sorodna razreda. Večja raznolikost (večja nehomogenost) ima negativen vpliv predvsem na velikost koeficienta korelacije, ne pa toliko na samo uspešnost drugih rezultatov topografske normalizacije.

Sledi (preglednica 9, 2. sklop) analiza vpliva *lastnosti območij na določitev regresijskih koeficientov (a, b)* in uspešnost (*R*) linearne regresije. Pokaže se, da je regresija v izbranih dveh območjih glede Pearsonovega koeficienta korelacije *R* v povprečju boljša od regresije v ostalih območjih. Razlike v vrednostih teh koeficientov med območji niso velike, vidi pa se, da naraščajo z večjo valovno dolžino. Če rezultate povzamemo v skupno povprečje vseh spektralnih kanalov vseh posnetkov, dobimo: povprečen $R = 0,71$, povprečen naklon $a = 0,34$ in povprečno izhodišče $b = -2,42$. Izbira reprezentativnega območja torej vpliva na višino koeficientov regresije. Večja variabilnost v vrednostih *R* se kaže v vidnih kanalih, v IR delu spektra pa je manj zaznavna in bolj izenačena. Variabilnost v vrednostih koeficientov (*a, b*) je prisotna, a manj izrazita. Za koeficient *a* je znova mogoče opaziti, da je večja v kanalih vidnega dela in manjša v kanalih IR spektra. Na koeficient *b* pa skoraj nima vpliva.

Preglednica 9 se nadaljuje z analizo *učinka regresijskih parametrov na statistične in vizualne lastnosti* topografsko normalizirane podobe (3. sklop). Razlike med skupnimi povprečji vseh posnetkov glede na reprezentativna območja so majhne, kaže pa da obe izbrani območji povzročata nekoliko večje odklone v porazdelitvi vrednosti (standardni odklon). Kakovost rezultata topografske normalizacije v tem pogledu lažje ocenimo na podlagi videza popravljenih podob. Ta tudi odgovori, zakaj je bilo območje aoi_2 izključeno iz izbora za posnetke 190-28, navkljub dobrem rezultatom regresijskih koeficientov. Učinka »izravnave« naklonov in osvetlitve sta namreč bila v tem primeru pogosto slabo prisotna. Skupno vsem

posnetkom popravljenih s topografsko normalizacijo je poudarjena izpostavljenost pregibov površja (grebeni, soteske, ožje doline). Ta učinek lahko razložimo z očitno močno povezanostjo z vsemi ekstremnimi nakloni površja.

Kadar topografsko normalizacijo opravljamo na več posnetkih, je nezanemarljiv pogoj pri izbiri reprezentativnega območja tudi *možnost ali pogostost prekritosti z oblaki*, saj v tem primeru regresije ni mogoče določiti (4. sklop, preglednica 9). Pri izbiri se je torej smotno izogibati predelom v bližini visokih hribov ali drugih orografskih pregrad. Primeri prisotnosti oblakov v testnih območjih so bili redki, čeprav so na več posnetkih prisotni. Nazadnje sem preverila tudi, kakšen vpliv imajo *letni časi zajema posnetkov na določitev regresijskih koeficientov*. Najprej sem primerjala spektralne lastnosti izbranih reprezentativnih območij v različnih letnih časih (pomlad, jesen, poletje). Pokaže se, da letni časi nimajo večjega vpliva na samo sredino v spektralnih kanalih vidnega spektra (variabilnost je razmeroma majhna), nekoliko več variabilnosti opazimo pri kanalih IR spektra (med vsemi največjo variabilnost pa ima, pričakovano, kanal 4). Obratno lahko rečemo za velikost regresijskega koeficienta: večja variabilnost je prisotna med kanali vidnega dela spektra, manjša v kanalih IR spektra. Letni časi imajo še najbolj značilen vpliv na regresijske koeficiente naklona a . Najvišje vrednosti koeficientov a dajo spomladanski posnetki, nekoliko nižje poletni in najnižje jesenski. V splošnem pa velja, da vse vrednosti, tj. vsi regresijski parametri naraščajo z večanjem valovne dolžine (torej IR kanali dosegajo višje koeficiente korelacije R in večje vrednosti koeficienta a).

Preglednica 9: Vpliv topografskih in spektralnih lastnosti reprezentativnih območij na rezultat topografske normalizacije (Minnaertov model).

Table 9: Effects of topographic and spectral characteristics of representative areas on topographic normalization results (Minnaert model).

		območje za računanje linearne regresije				
		10 1	aoi 1	aoi 2	aoi 3	
Topografske lastnosti	velikost območja (piksel=30x30 m)	176 x 148	104 x 44	147 x 55	90 x 71	
	nadmorska višina (meter)	sredina	560	940	1089	425
		odklon	117	204	221	67
		min	261	487	724	267
		max	923	1370	1596	606
	usmerjenost površja (stopinja)	sredina	180	188	208	202
		odklon	97	50	111	109
		min	1	3	1	1
		max	359	358	360 (361)	359
	nakloni površja (stopinja)	sredina	27	32	32	23
		odklon	8	8	11	7
		min	0	0	0	0
		max	50	51	63	39
	raba tal 1992 (%)	neklasificirano	0	0	0	0
		urbano	0	0	0	0
		gosto pozidano	0	0	0	0
		redko pozidano	0	0	0	0
		gozd iglasti	0	7	64	36
		gozd listnati	93	79	26	54
		gozd mešani	0	3	5	5
grmičevje		1	0	0	1	
voda		0	0	0	0	
kmetijsko		4	3	1	1	
odprto		1	8	4	3	

se nadaljuje...

... nadaljevanje

Parametri linearne regresije	Pearsonov korelacijski koeficient - R (povprečje vseh TM/ETM podob)	TM1	0,53	0,43	0,71	0,66	
		TM2	0,66	0,57	0,75	0,78	
		TM3	0,58	0,48	0,72	0,74	
		TM4	0,88	0,68	0,72	0,66	
		TM5	0,87	0,65	0,73	0,68	
	naklon regresijske premice - a (povprečje vseh TM/ETM podob)	TM1	0,18	0,22	0,34	0,18	
		TM2	0,32	0,33	0,46	0,33	
		TM3	0,30	0,33	0,46	0,29	
		TM4	0,53	0,47	0,55	0,53	
		TM5	0,58	0,47	0,55	0,52	
	izhodišče regresijske premice - b (povprečje vseh TM/ETM podob)	TM1	-3,21	-3,47	-3,63	-3,26	
		TM2	-3,04	-3,10	-3,23	-3,02	
		TM3	-3,26	-3,36	-3,47	-3,29	
		TM4	-0,85	-0,94	-1,20	-1,01	
		TM5	-1,57	-1,64	-1,88	-1,63	
Učinek regresijskih parametrov na TN podobo	statistična ocena - sredina M (povprečje vseh TM/ETM podob; celotna TN podoba)	TM1	48,05	47,95	48,38	46,64	
		TM2	61,00	63,19	62,65	61,80	
		TM3	56,61	55,83	56,60	54,36	
		TM4	346,09	353,42	362,61	363,75	
		TM5	211,21	200,77	197,61	204,12	
	statistična ocena - stand. odklon STD (povprečje vseh TM/ETM podob; celotna TN podoba)	TM1	32,81	27,93	32,42	28,15	
		TM2	41,75	35,78	40,91	36,23	
		TM3	45,51	40,00	46,00	40,45	
		TM4	94,19	83,08	85,35	85,45	
		TM5	83,34	67,65	64,87	68,02	
	vizualna ocena	TM1		OK (pregibi terena so poudarjeni - korelacija z naklonom)	OK (pregibi terena so poudarjeni - korelacija z naklonom)	rezultati so spremenljivo dobri (regresija ni stabilna)	OK (pregibi terena so poudarjeni - korelacija z naklonom)
		TM2					
		TM3					
		TM4					
		TM5					
Drugo	pogostost oblakov		1 (9)	0 (9)	0 (9)	1 (9)	

Topografska normalizacija z Minnaertovim modelom se obnaša skladno s cilji, ki naj jih rešuje. Za popravke osvetlitve in nagnjenosti terena je tehnika učinkovita in stabilna za razmeroma širok razpon okoliščin (letne čase posnetkov, na različne položaje Sonca, izbiro reprezentativnega območja za linearno regresijo). Slaba stran tehnike so območja, ki ostanejo nedefinirana ter območja, ki jih v njihovi okolici tehnika močno preceni – tudi te je smiselno izločiti (model kalibriramo). V vizualnem pogledu tehnika dobro dosega svoj cilj, drži pa, da so izrazitejši pregibi terena (grebeni, doline) nekoliko precenjeni ter da podoba po topografski normalizaciji nekoliko pomodri. Vendar sta oba slaba učinka sistematične narave.

5.4.3 Učinki radiometrične standardizacije

Namen radiometrične standardizacije je standardizirati spektralne lastnosti kanalov med posnetki. Kakovost standardizacije najenostavneje preverimo s statističnim testom primerjave sredin parov kanalov (tj. med referenco in prilagojeno podobo). Analize se tako kot radiometrična standardizacija nasploh nanašajo na izbrana testna območja.

Preglednica 10 zgoraj prikazuje variabilnost v sredinah med spektralnimi kanali pred radiometrično standardizacijo (RS) na primeru posnetkov območja Ljubljana–Kranj z okolico, poletni letni čas (glej tudi sliko 19). V zadnjem stolpcu so prikazane vrednosti sredin za

posamezne kanale referenčnega posnetka te časovne vrste (posnetek 1992-08-18). Preglednica 10 spodaj prikazuje statistiko sredin kanalov iste časovne vrste po radiometrični standardizaciji. Vidi se, da je radiometrična standardizacija učinkovito uskladila statistične lastnosti podob, saj je povsem izravnala odklone med sredinami po celotni časovni vrsti.

Preglednica 10: Primerjava sredin parov spektralnih kanalov (med referenčno in prilagojeno podobo) pred in po radiometrični standardizaciji, za območje Ljubljana–Kranj z okolico, poletni letni čas.

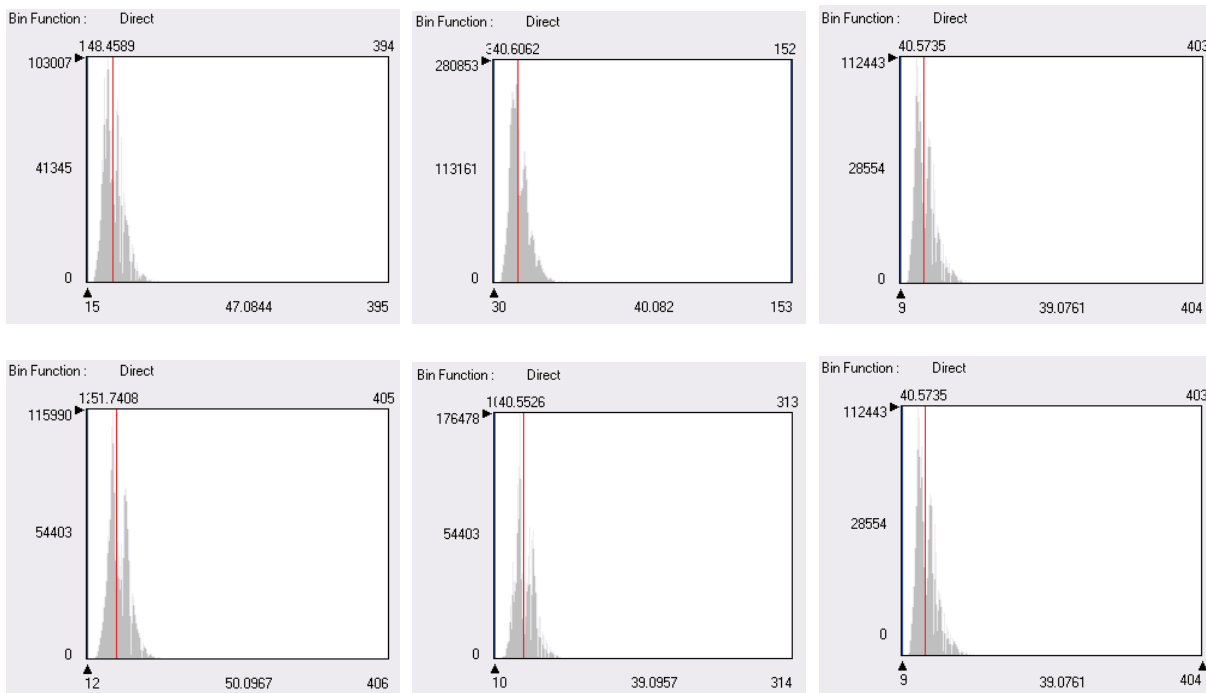
Table 10: Comparison of mean values between spectral bands (reference vs. adjusting image) before and after radiometric standardisation for Ljubljana–Kranj study area, summer season.

pred RS	1992-08-27	1993-08-21	1995-07-23	1999-08-07	2000-08-16	2001-08-03	2005-07-30	1992-08-18 (REF)
TM1	50,44	51,77	44,78	54,84	51,09	51,56	48,47	40,57
TM2	62,52	60,95	55,81	62,31	64,27	57,88	58,27	57,86
TM3	57,11	58,21	49,05	57,56	63,61	57,44	52,24	50,10
TM4	301,20	303,64	323,19	345,03	386,42	315,48	307,37	318,60
TM5	211,44	200,42	188,88	214,27	237,37	196,23	174,14	210,50
TM7	124,23	117,80	103,11	103,21	116,38	98,69	98,53	122,72

po RS	1992-08-27	1993-08-21	1995-07-23	1999-08-07	2000-08-16	2001-08-03	2005-07-30	1992-08-18 (REF)
TM1	40,58	40,55	40,54	40,66	40,59	40,58	40,61	40,57
TM2	57,85	57,88	57,89	57,96	57,86	57,87	57,92	57,86
TM3	50,10	50,09	50,14	50,25	50,11	50,11	50,16	50,10
TM4	318,60	318,60	318,56	318,83	318,60	318,60	318,66	318,60
TM5	210,50	210,49	210,54	210,84	210,50	210,50	210,65	210,50
TM7	122,72	122,73	122,76	122,99	122,74	122,72	122,84	122,72

Učinek radiometrične standardizacije na spektralne lastnosti podob je mogoče preveriti s primerjavo histogramov. Radiometrična standardizacija s postopkom linearne regresije učinkuje predvsem na zamik histograma, ne pa tudi na obliko. Če bi se oblika histograma znatno spremenila, na primer, da bi imela podoba najprej en značilen vrh, potem pa kar dva, potem bi bile znatno spremenjene tudi spektralne lastnosti podobe. Da to ne drži, naj za ilustracijo pokažeta primera na sliki 29. Levo zgoraj je histogram spektralnega kanala 1 izseka posnetka 2005-07-30-L5-190-28 po topografski normalizaciji, na sredini zgoraj je histogram kanala 1 istega izseka po radiometrični standardizaciji, desno zgoraj pa histogram kanala 1 istega območja referenčnega posnetka (1992-08-18-L5-191-28). Spodaj je na enak način predstavljena situacija za posnetek 1993-08-21-L5-190-28 ter referenca.

Vidimo, da je dejansko prišlo predvsem do zamika vrednosti sredine histograma na horizontalni osi (iz 47 na 40 v primeru 2005 ter iz 50 na 40 v primeru 1993). Splošna oblika histograma (porazdelitev vrednosti podobe) se je ohranila. Zožitev ali nasprotno razširitev (standardni odklon) je posledica multiplikativnega koeficienta (naklona) v regresijski enačbi. V primeru, da je manjši od 1 učinkuje tako, da se histogram zoži, razpon vrednosti med minimalno in maksimalno vrednostjo na podobi se zato zmanjša (posledica pa je ta, da izgubimo nekaj kontrasta; primer podobe 2005). Če pa je večji od 1, se bo histogram na eno in drugo stran od sredine razširil. V primeru 1993 se ohranja tudi širina izvornega histograma podobe, ni pa to splošno pravilo.



Slika 29: Vpliv radiometrične standardizacije z linearno regresijo na prilagajane podobe (lastnosti porazdelitve vrednosti). Levo zgoraj je histogram kanala 1 izseka podobe 2005 pred prilagajanjem, na sredini po prilagoditvi, na desni pa je histogram referenčne podobe 1992. Spodaj je identičen primer za izsek podobe 1993.

Figure 29: Impact of linear regression radiometric standardisation procedure on adjusted images (distribution characteristics, histogram shape).

Za časovne analize več posnetkov je uskladitev odstopanja med ustrežajočimi si pari spektralnih kanalov med posnetki nujna. V globalnem statističnem smislu to lahko dosežemo z radiometrično standardizacijo, vendar se moramo zavedati, da lahko na ta način izgubimo določen razpon vrednosti v prilagojenih kanalih in s tem tudi kakšen detajl, prehod. Opisan negativen učinek lahko deloma odpravimo s klasično standardizacijo vrednosti, tj. pretvorbo vseh vrednosti v standardizirano obliko, kjer so lastnosti porazdelitve $P \sim N(0, \sigma)$, $P \sim N(0, 1)$. To dosežemo z naslednjim preračunom:

$$DN_z = \frac{DN - M}{\sigma}, \quad (37)$$

kjer je DN_z standardizirana digitalna vrednost, DN posamezna digitalna vrednost (svetlostna vrednost piksla), M sredina ter σ standardni odklon danega spektralnega kanala.

Izboljšana globalna primerljivost večine podatkov (sredina vrednosti) vsekakor odtehta morebitno zmanjšanje nivoja detajla. Globalna primerljivost namreč prispeva k zmanjševanju šuma oziroma zaznavanju t. i. navideznih sprememb v časovnih analizah površja.

5.5 Analiza sprememb

Poglavje začnem z obrazložitvijo pristopa, ki sem ga v praktičnem delu doktorske disertacije izbrala za analizo določanja sprememb.

Najprej velja poudariti, da v doktorski disertaciji ne iščem najustreznejše tehnike za analizo prav določenega tipa sprememb, temveč spremembe obravnavam kot splošen pojav, z vsemi razsežnostmi v vsebinskem (različne spremembe različnih predmetov), časovnem (preskoki, postopen razvoj) in prostorskem (sprememba položaja, obsega) pogledu. Drugi razlog za pristop, ki sem ga izbrala za analizo sprememb, je, da sem na podlagi študije različnih tehnik za določanje sprememb prišla do spoznanja, da so enostavne tehnike razlikovanja podob praviloma dovolj, če ne celo bolj učinkovite od kompleksnejših algoritmov. Slednje izhaja predvsem iz dejstva, da ob že tako zapletenih procesih, ki jih na posnetkih opazujemo, in lastnostih podatkov, ki jih pri tem uporabljamo, ter njunem součinkovanju, ne želimo obremenjevati interpretacije v končnem koraku – razumevanju izvlečka informacij. Zato sem se analize sprememb lotila z vidika analize vpliva različnih izhodišč podatkov na določanje sprememb in ne kot analize vseh možnih tehnik za določanje sprememb.

Najprej sem analizirala vlogo izbire operatorja na prepoznavanje sprememb ter ob tem iskala optimalne mejne vrednosti kot kazalec in kriterij za njihovo razločevanje (poglavje 5.5.1). Ko sem se do teh dveh parametrov opredelila, sem opravila analize sprememb na različnih vhodnih podatkih (poglavja 5.5.2 do 5.5.4). Namen teh je ugotoviti ali so kateri vhodni podatki bolj ali manj dovzetni za zaznavo sprememb glede na posamezne procese in dogodke v prostoru ter oceniti, kakšna je (bila) njihova sposobnost za doseganje optimalne primerljivosti skozi čas. Nato obravnavam analizo časovnih vrst in predstavim težave povezane z njimi in uporabljenim pristopom (poglavje 5.6). Temu sledi iskanje ustrežnejšega načina določanja sprememb (poglavje 5.7). Poglavje se zaključi z obširnejšo diskusijo (poglavje 5.8).

Na tem mestu pa velja povedati še, da nekaterih posnetkov v analizo nisem vključila. To so bili vsi posnetki senzorjev MSS. V preliminarni študiji se je namreč pokazalo, da jih ni mogoče vključiti v časovno vrsto z ostalimi. Zaradi razlik v širini spektralnih kanalov njihova vsebina ni primerljiva s posnetki senzorjev TM in ETM. Opustila sem tudi analizo na komponentah Kauth-Thomasove transformacije, saj so splošne ugotovitve podobne ugotovitvam na drugih zveznih podatkih. Dodaten razlog pa sta tudi ta, da je zaradi uporabe različnih koeficientov za različne senzorje, podatke treba dodatno usklajevati.

5.5.1 Izbira operatorja za določanje sprememb in kriterija za ločevanje sprememb

Ko so podatki za časovne analize pripravljene, se lahko lotimo določanja in analize sprememb stanj na posnetkih. To, upoštevaje lastnosti podatkov in namen časovne analize, pomeni naslednje:

- izbrati ustrezen operator za določanje sprememb ter
- določiti kriterij za ločevanje sprememb od nesprememb in/ali prehode.

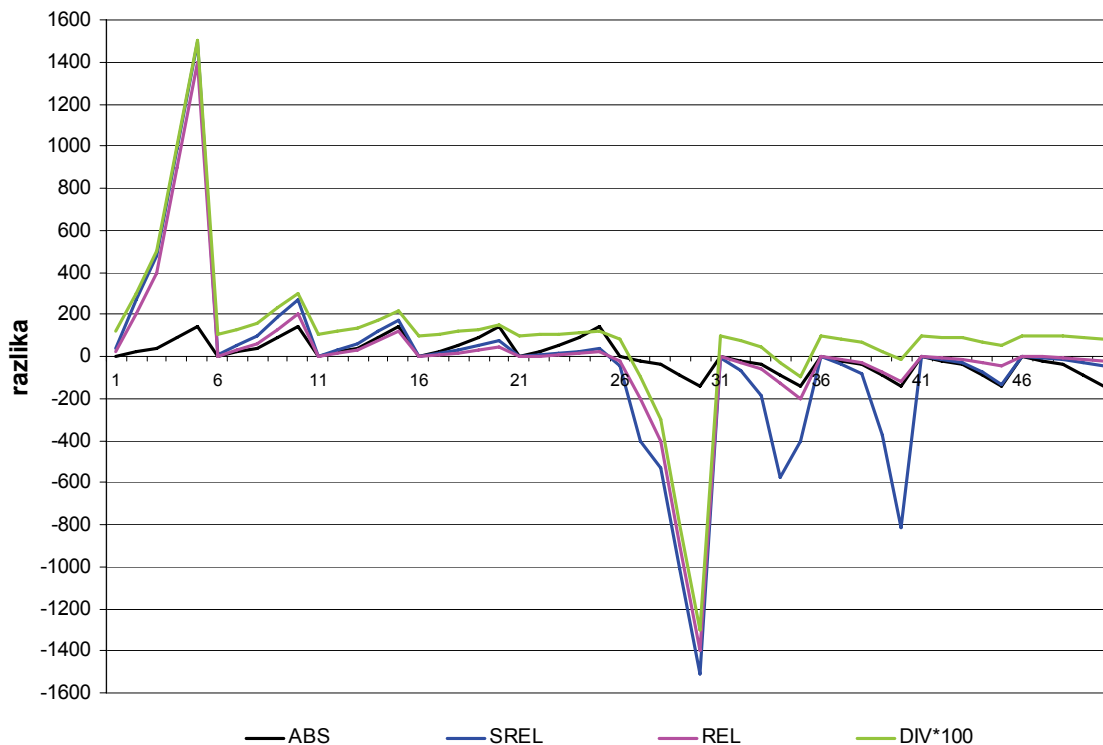
Analizo učinkov operatorja in učinkov mejne vrednosti (angl. threshold value) na določanje sprememb sem testirala na dvojih vhodnih podatkih: na časovni vrsti odbojnih vrednostih

površja (ODB, šest spektralnih kanalov) ter na časovni vrsti normaliziranega vegetacijskega indeksa (NDVI).

Poglejmo najprej učinke *operatorjev*. Primerjala sem naslednje operatorje:

$$\begin{aligned}
 \text{absolutna razlika:} \quad & ABS = t_2 - t_1, \\
 \text{simetrična relativna razlika:} \quad & SREL = \frac{t_2 - t_1}{|t_1|} + \frac{t_2 - t_1}{|t_2|} \cdot 100, \\
 \text{relativna razlika (delež):} \quad & REL = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100 \text{ in} \\
 \text{razmerje:} \quad & DIV = \frac{t_2}{t_1}.
 \end{aligned} \tag{38}$$

Pri tem t_1 predstavlja zgodnejši posnetek (pred) in t_2 kasnejši posnetek (po). V kakšnem medsebojnem odnosu so operatorji ter kako se odzivajo na izračun na majhnih številih in velikih številih ter na ekstremne pogoje, sem preverila s simuliranimi situacijami (slika 30).



Slika 30: Odziv štirih operatorjev za določanje sprememb na simuliranih situacijah (odziv izračuna operatorjev na majhnih in velikih številih ter v ekstremnih situacijah).

Figure 30: Behaviour of four change detection operators in simulated conditions (small numbers, big numbers and extreme situations).

Ena »kaskada« predstavlja vselej enake pozitivne razlike ali prištevekke (+2, +20, +40, +90, +140) na dano število. Prva kaskada je prištevek na majhno število (10), sledijo štiri kaskade z vselej večjim vhodnim številom (70, 120, 300 in 700) na katerega prištevamo zgornje prištevekke. To so pozitivne razlike ali prirastki. Nato sledi enaka situacija, le da vhodnim številom (10, 70, 120, 300 in 700) prištevamo negativne razlike ali odštevekke (-2, -20, -40, -90, -140). To so negativne razlike ali primanjkljaji.

Vidimo, da operator absolutnih razlik *ABS* da vselej (za vsako kaskado) enak odgovor, kar je za tako simulirane situacije pravilno. Na sredini se obrne le predznak (kaskade v negativnem so preko ničle zrcalne kaskadam v pozitivnem). Vsi ostali trije operatorji, *SREL*, *REL* in *DIV*, ki so po svoji naravi različne relativne mere, se na pozitivne razlike odzivajo podobno in sicer tako, da upoštevajo relativna razmerja med števili (enaka absolutna razlika na majhnih številih pomeni nekaj drugega kot enaka absolutna razlika na velikih številih). *REL* in *DIV* sta si v pozitivnem in negativnem območju razlik tudi vsaka svojemu operatorju primerno zrcalno simetrična. Na primeru negativnih razlik se pokaže, da *SREL*, kar bi glede na poimenovanje sicer pričakovali, ni povsem simetrična svojim dvojnikom v pozitivnem delu. Opazimo dvojce: ni stanovitna v upadanju kaskad (npr. peta, šesta, sedma kaskada), kar je posledica menjave predznaka v kasnejšem delu podatkov, pa tudi magnituda v negativnem delu ni zrcalno simetrična svojemu pozitivnemu delu.

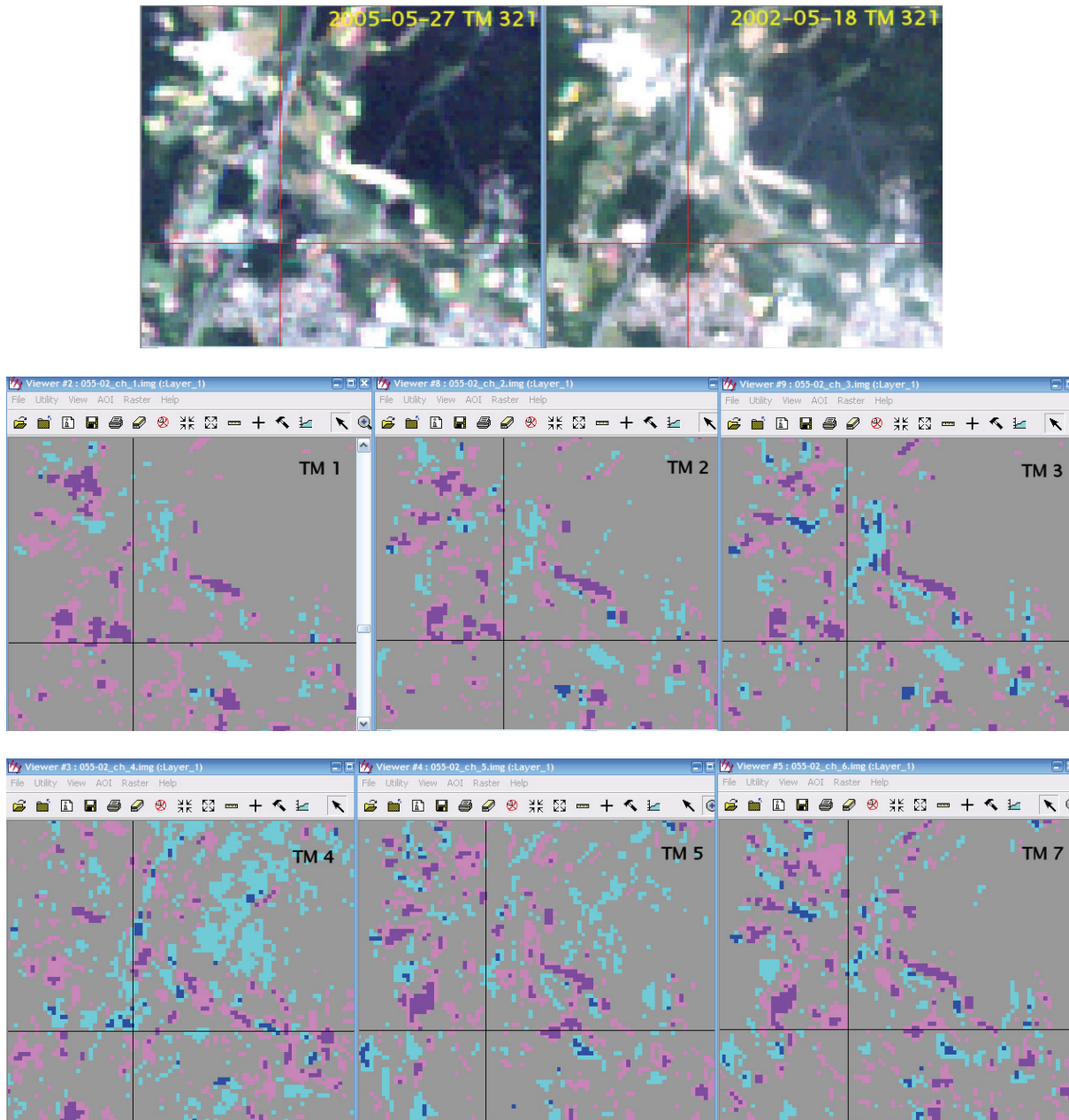
Glede na zgoraj opisane in preostale splošno znane problematične lastnosti operatorjev (npr. problem absolutnih razlik) sem se odločila, da operatorjev *ABS* in *SREL* ne bom vključila v analize sprememb. Uporabljala pa sem jih še za testiranje določitve mejne vrednosti.

Na podlagi testov obnašanja operatorjev na časovni vrsti posnetkov ODB in NDVI, območje Ljubljana–Kranj z okolico, pomladni in poletni letni čas, sem lahko potrdila še naslednje:

- Vsi štirje operatorji dajejo v prostorskem pogledu razmeroma podobne rezultate. To pomeni, da so vzorci sprememb približno enako razporejeni, ne pa tudi enako zamejeni, kar sem lahko določila na podlagi primerjave površin za posamezne kategorije sprememb.
- Porazdelitev vrednosti v podobi razlik z uporabo operatorjev *ABS*, *SREL* in *REL* je približno simetrična in ima približno normalno porazdelitev, če med posnetki ni veliko šuma (oblakov). Sicer je porazdelitev lahko tudi bimodalna, z glavnim in sekundarnim vrhom, sredina pa se znatno odmakne od ničle.
- Porazdelitev vrednosti v podobi razlik z uporabo operatorja *DIV* ni simetrična okoli sredine (za pozitivne spremembe ima širši razpon kot za negativne), ima pa tako kot ostale, če ni veliko šuma, en sam vrh.
- Vzorci sprememb na podatkih ODB so različni med vidnimi kanali in IR kanali (slika 31), pri čemer vidni kanali vsaj v grobem prostorskem vzorcu dajejo sorodne informacije, za IR kanale pa to vselej ne drži (različni spektralni odzivi predmetov v različnih območjih IR spektra lahko rezultirajo v povsem različno opredelitev narave sprememb – glej primer urbanega prirastka na sliki 31).

Vijolični odtenki na sliki 31 predstavljajo pozitivne spremembe, modri negativne, siva pa so območja brez sprememb. Temnejše barve pri tem zastopajo t.i. pretvorbe ali velike spremembe predmetov. Če se osredotočimo na bližino izhodišča križa (glej zgornji levi kvadrant), lahko vidimo, da vidni kanali TM 1–3 podobno opredelijo spremembo iz zelenega v pozidano in to kot velik prirastek v odboju. IR kanal TM 4 jo opredeli kot veliko negativno

spremembo v odboju, peti IR kanal TM 5 spremembe skoraj ne zazna, sedmi IR kanal TM 7 pa jo tudi zazna kot prirastek v odbojnih vrednostih.



Slika 31: Analiza sprememb stanja 2005-2002, ODB, pomlad, Ljubljana-Kranj z okolico. Zgoraj: izsek posnetkov 2005 in 2002 v kombinaciji kanalov 321. Na sredini je izsek iz podob razlik za vidne kanale (TM 1-3) in spodaj je izsek za IR kanale (TM 4-5, 7), ki prikazujejo različne opredelitve kategorije sprememb v vidnem delu spektra in IR delu spektra za primer prirastka v urbanizaciji zelenih površin.

Figure 31: An example of change detection of 2005-2002 reflectance imagery, spring, Ljubljana-Kranj with surroundings for urban gain over vegetated areas. At top: subset of 2005 and 2002 images in RGB 321 colour composition. At the middle are subsets of image difference in visible spectra (TM 1-3) and below are subsets of image difference in IR spectra (TM 4-5, 7).

Rezultate operatorjev sem preverila še v luči analize vrednosti podobe razlik za (z vsemi štirimi operatorji določenimi) štiri prepoznane oblike sprememb (tj. štiri prepoznane pretvorbe predmetov), in sicer: pozitivna pretvorba kmetijske površine, negativna pretvorba kmetijske površine, pretvorba iz pozidanega v zeleno ter pretvorba iz zelenega v pozidano, za vsako kategorijo na štirih območjih. Rezultate na spomladanskih podatkih NDVI, kot primer največjih razponov razlik, prikazuje preglednica 11. V drugem stolpcu je podana statistika podobe razlik dobljena z danim operatorjem, v stolpcih 3–8 pa so dane srednje vrednosti analiziranih območij pretvorb.

Preglednica 11: Primer statistične analize pretvorb štirih predmetov (pozitivna pretvorba kmetijske površine, negativna pretvorba kmetijske površine, pretvorba iz pozidanega v zeleno ter pretvorba iz zelenega v pozidano), določenih z različnimi operatorji, na NDVI podatkih za pomladni letni čas med posnetkoma 1996-1993 na območju Ljubljana–Kranj z okolico.

Table 11: An example of statistical analysis of four transformation types (positive transformation or change of agricultural land, negative transformation of agricultural land, transformation from build to green, and transformation from green to build), based on different operators used for change detection, on NDVI data between 1996-1993 images, spring season, on Ljubljana–Kranj with surroundings area.

NDVI (-1,-1)	ABS	kmet+	kmet-	urbano/zazidano v zeleno	zeleno v urbano/zazidano
pomlad 96-93 Ljubljana–Kranj	Mean = 0,001	0,352	-0,283	0,259	-0,398
	STD = 0,075	0,237	-0,376	0,302	-0,302
	Min = -0,581	0,365	-0,305	0,282	-0,338
	Max = 0,534	0,395	-0,325	0,299	-0,363
	povprečje	0,34	-0,32	0,29	-0,35

NDVI (-1,-1)	REL	kmet+	kmet-	urbano/zazidano v zeleno	zeleno v urbano/zazidano
pomlad 96-93 Ljubljana–Kranj	Mean = 0,878	101,928	-47,548	71,548	-55,889
	STD = 13,964	47,563	-47,742	72,215	-52,693
	Min = -79,201	88,738	-42,924	76,014	-53,736
	Max = 207,000	106,743	-42,022	71,798	-58,011
	povprečje	86,24	-45,06	72,89	-55,08

NDVI (-1,-1)	SREL	kmet+	kmet-	urbano/zazidano v zeleno	zeleno v urbano/zazidano
pomlad 96-93 Ljubljana–Kranj	Mean = -0,064	152,034	-110,837	112,001	-192,894
	STD = 27,911	79,716	-140,816	113,329	-164,778
	Min = -460,000	135,152	-118,813	118,387	-178,445
	Max = 274,420	157,995	-115,905	113,317	-235,153
	povprečje	131,22	-121,59	114,26	-192,82

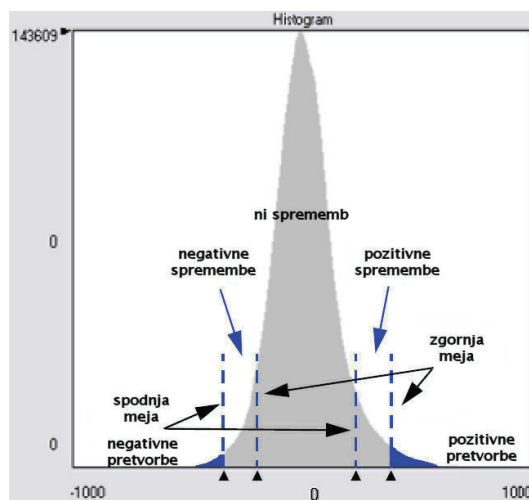
NDVI (-1,-1)	DIV	kmet+	kmet-	urbano/zazidano v zeleno	zeleno v urbano/zazidano
pomlad 96-93 Ljubljana–Kranj	Mean = 1,009	2,019	0,425	1,715	0,441
	STD = 0,140	1,476	0,525	1,722	0,489
	Min = 0,208	1,887	0,571	1,760	0,463
	Max = 3,070	2,067	0,580	1,718	0,420
	povprečje	1,86	0,53	1,73	0,45

Podobno ugotovitvam na simuliranih situacijah se pokaže, da operatorji *ABS*, *REL* in *DIV* za opazovane pretvorbe predmetov v podobnih razmerjih določajo relativno spremembo (rang

pozitivnih pretvorb nasproti rangu negativnih pretvorb v podobi razlik je približno enak). Medtem ko tega ne moremo potrditi za rezultate z operatorjem *SREL*.

Te ugotovitve so zlasti pomembne pri izbiri in določitvi *mejnih vrednosti* ali pretvorbe (transformacija predmeta) ali prehodov (tranzicije). Najpogosteje uporabljeni meri za določitev mejne vrednosti sta odstotek maksimalne razlike ter delež oziroma faktor standardnega odklona. Tako enoten delež standardnega odklona (STD) kot enoten odstotek maksimalne razlike (%) lahko za pozitivne spremembe ali prirastke in negativne spremembe ali primanjkljaje neposredno uporabimo le v primeru, ko je porazdelitev razlik v histogramu približno normalna in simetrična okoli sredine. Sicer moramo mejne vrednosti opredeliti posebej za pozitivne spremembe in posebej za negativne spremembe ali pa te ne bodo uravnotežene. Ker je pri velikem številu primerjav posnetkov to lahko zelo zamudno opravilo in obenem razmeroma subjektivno, je edino smiselno poiskati takšno kombinacijo operatorja in mere za mejne vrednosti, da bo mogoče na enak način opredeliti obe strani razlik. Ker pogoja simetričnosti okoli sredine porazdelitev razlik operatorja *DIV* ne izpolnjuje, sem za kasneje načrtovane analize sprememb sklenila opustiti tudi operator *DIV*. Ostal je operator *REL*, ki se je v vseh pogledih in testiranjih ustrezno odrezal, poleg tega pa je to tudi najbolj intuitivna relativna mera, ki se tudi nasploh najpogosteje uporablja.

Nadalje sem s testiranjem skušala opredeliti optimalen prag za razlikovanje območij, kjer sprememb ni ter kjer so. Za odstotek maksimalne razlike, kriterij %, se za ločnico med spremembo in pretvorbo običajno vzame kriterij polovice maksimalne razlike v dani podobi razlik. Ta mera se mi zaradi odvisnosti od šuma prisotnega v posnetkih (oblaki, saturirani piksli) za daljinsko zaznane podatke ne zdi najprimernejša. Na drugi strani je kriterij STD dosti manj občutljiv na t. i. ekstremne vrednosti, če le teh ni veliko, saj izhaja iz porazdelitve celotne populacije (glej sliko 32, ki ilustrira princip uporabe STD za določitev pragov različnih kategorij sprememb).



Slika 32: Princip uporabe standardnega odklona za določitev pragov jakosti sprememb.

Figure 32: Change boundary thresholds based on standard deviation principle.

Na tej osnovi sem sklenila, da bom za določitev mejnih vrednosti testirala le kriterij STD, in sicer tako, da sem izmenično premikala spodnjo in zgornjo mejo (npr. za 0,5, 1, 2 STD ter razne odstotke STD) ter opazovala prostorske učinke (spremembe v obsegu, premiku mej) na različnih predmetih in različnih podatkih (ODB, NDVI). To je bil precej interaktiven postopek primerjave podobe razlik in vhodnih podatkov (posnetkov), preko katerega sem skušala ujeti optimalno spodnjo in/ali zgornjo mejo za opredelitev:

- dopuščene notranje (ali lastne) variabilnosti pojavov – t. i. območje, kjer ni sprememb za dane podobe razlik,
- prag za območje večjih sprememb – t. i. območje transformacij ali pretvorb predmetov ter
- vmesno območje, kjer so prisotne spremembe in kjer so predmeti ali lastnosti površja v neki fazi prehajanja – t. i. območje tranzicije.

Po vsestranskem preizkušanju sem se opredelila za naslednji kombinaciji, ki ju tudi kasneje uporabljam v splošni analizi sprememb na različnih vhodnih podatkih. Za analize transformacij sem opredelila pet razredov ali kategorij sprememb (preglednica 12 zgoraj), za analize tranzicij (prehodov) pa 11 razredov postopnejšega spreminjanja (preglednica 12 spodaj). Pri tem velja poudariti, da na transformiranih podatkih (NDVI) hitreje dosežemo prag za t. i. pretvorbe (razlike prej in v večji meri sežejo v skrajne kategorije), zato je za analizo odbojnih vrednosti primernejše opazovati prehode (intenzivnost v razlikah med enim in drugim datumom se lahko izraža različno tudi v različnih spektralnih kanalih). Vrednosti za spodnje in zgornje meje so podane v deležu standardnega odklona (STD) in predstavljajo odmik od sredine, ki naj bi bila pri podobah razlik blizu nič.

Preglednica 12: Opredelitev spodnje in zgornje meje za posamezne razrede ali kategorije sprememb. Zgoraj: vrednosti za analize transformacij ter spodaj: vrednosti za analize tranzicij.

Table 12: Upper and lower bounds for different change categories. Above: bounds for transformation change analysis and below: bounds for transition change analysis.

TRANSFORMACIJE Kategorija	Oznaka razreda	Spodnja meja [STD]	Zgornja meja [STD]
negativna pretvorba	1	$-\infty$	$-2 \frac{1}{2}$
negativna sprememba	2	$-2 \frac{1}{2}$	$-1 \frac{1}{4}$
ni spremembe	3	$-1 \frac{1}{4}$	$+1 \frac{1}{4}$
pozitivna sprememba	4	$+1 \frac{1}{4}$	$+2 \frac{1}{2}$
pozitivna pretvorba	5	$+2 \frac{1}{2}$	$+\infty$

TRANZICIJE Kategorija	Oznaka razreda	Spodnja meja [STD]	Zgornja meja [STD]
negativna sprememba 5	1	$-\infty$	$-2 \frac{1}{2}$
negativna sprememba 4	2	$-2 \frac{1}{2}$	-2
negativna sprememba 3	3	-2	$-1 \frac{1}{2}$
negativna sprememba 2	4	$-1 \frac{1}{2}$	-1
negativna sprememba 1	5	-1	$-\frac{1}{2}$
ni spremembe	6	$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$
pozitivna sprememba 1	7	$+\frac{1}{2}$	+1
pozitivna sprememba 2	8	+1	$+1 \frac{1}{2}$
pozitivna sprememba 3	9	$+1 \frac{1}{2}$	+2
pozitivna sprememba 4	10	+2	$+2 \frac{1}{2}$
pozitivna sprememba 5	11	$+2 \frac{1}{2}$	$+\infty$

Analize, ki sem jih opravila v tem poglavju, so se nanašale na iskanje primerne operatorja in primerne opredelitve ločnic za razlikovanje različnih jakosti sprememb različnih pojavov, v različnih spektralnih območjih, skratka splošne operatorje za različne podatke. Pri tem so upoštevane tudi značilnosti različnih predmetov (npr. rang ali razpon sprememb za kmetijske površine, za spremembe iz zelenega v pozidano). Vendar velja poudariti, da bi v primeru, ko bi proučevali le en pojav (npr. postopno zaraščanje tal ali urbanizacijo), prehode lahko naravi pojava ustrezneje opredelili tudi z drugimi mejnimi vrednostmi.

V nadaljevanju bom predstavila vlogo in ustreznost različno pripravljenih vhodnih podatkov na splošne analize sprememb. To pomeni, da bom opazovala *splošne* ali *vsestranske* spremembe stanja med posnetki različnih datumov ter analizirala vplive lastnosti podatkov na le-te. Za določitev sprememb sem uporabila v tem poglavju opredeljen operator in mejne vrednosti.

Zaradi obsega kombinacij bom v poglavjih 5.5.2 – 5.5.5 rezultate predstavila na posameznih primerih analize sprememb v dveh datumih (dvo-časovne analize). Kasneje, v poglavju 5.6 in 5.7 pa še rezultate obdelave analize sprememb na izbranih časovnih vrstah.

5.5.2 Digitalne vrednosti, radiance in odbojne vrednosti površja

S primerjavo določitve sprememb na podatkih digitalnih vrednosti (DN), radiancah (RAD) in odbojnih vrednostih (ODB), sem želela ugotoviti v čem dajejo podobne rezultate in v čem ne.

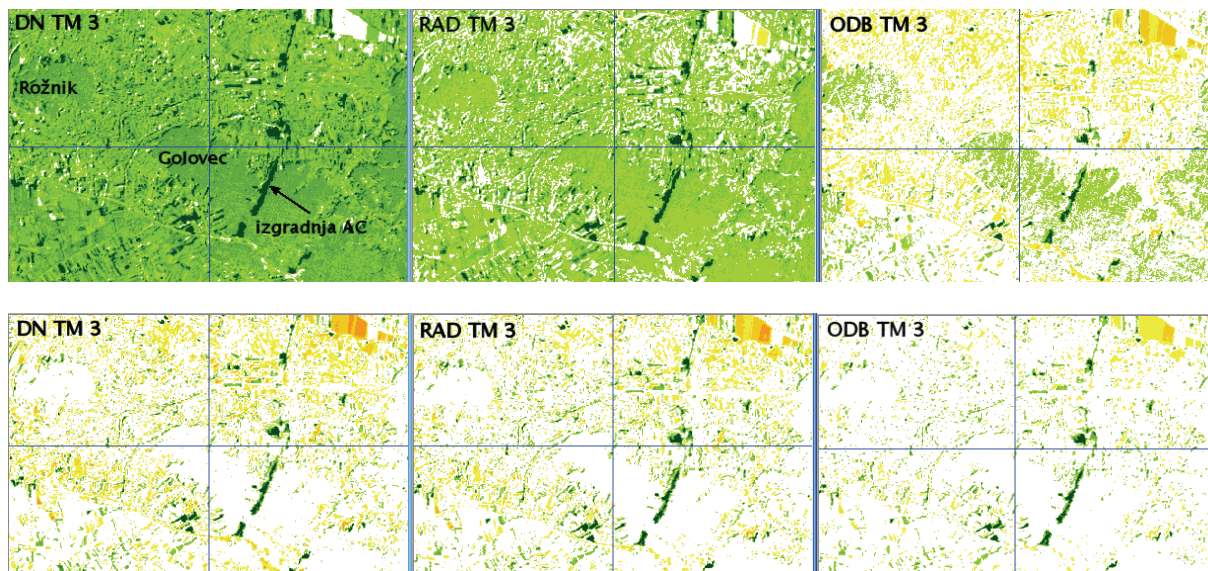
Noben poseben dosežek ni, če ugotovimo, da vse tri skupine podatkov v analizi časovnega razlikovanja pokažejo, kje so velike spremembe. Torej če nas zanima samo groba shema »rdečih« con, lahko primerjamo tudi vrednosti DN. Vendar je treba omeniti predvsem to, da praviloma pari primerjanih kanalov podob DN niso medsebojno usklajeni. Zato je (če ne poskrbimo za tovrstno uskladitev) na podobah razlik prisotnega ogromno šuma in navideznih sprememb, ki jih je skrajno težko pojasniti, določene kombinacije primerjave kanalov pa so povsem neuporabne.

Podobno velja tudi za radiance, če primerjamo podatke senzorja TM in ETM. Kalibracijski koeficienti niso enaki, zato so razponi vrednosti v kanalih enega senzorja različni od razponov v kanalu drugega senzorja. Če primerjamo podatke istega senzorja, je določanje sprememb lahko bolj uspešno. Še vedno pa bo skoraj obvezno opraviti vsaj relativno radiometrično standardizacijo, sicer bodo v nekaterih kanalih zaznane prevrednotene razlike v pozitivnem ali v negativnem predznaku (glej na primer sliko 33 zgoraj).

Ker pri pretvorbi podatkov v odbojne vrednosti običajno sočasno odpravimo tudi vpliv atmosferskega odboja, je na podobah razlik ODB od vseh primerjanih najmanj nepojasnjena šuma. Vendar je tudi tu še vedno nadvse koristno opraviti relativno standardizacijo med primerjanimi spektralnimi kanali.

Na sliki 33 si pogledajmo še razlike in podobnosti med prostorskim vzorcem razporeditve sprememb, opredeljenimi stopnjami ali jakostmi sprememb ter v prisotnosti šuma glede na uporabljene podatke DN, RAD in ODB. Zgoraj so primeri izsekov podob razlik med posnetkoma 1992-08-18-L5 in 1999-08-07-L7 za mesto Ljubljana v poletnem času, kot jih dobimo, če ne opravimo nikakršne medsebojne uskladitve. Spodaj so identični primeri, ki so bili predhodno med seboj relativno usklajeni. V zelenih odenkih so prirastki v vrednostih, v

rumeno-rdečih primanjkljaji v vrednostih, v beli barvi so t. i. območja, kjer ni opaznejših razlik oziroma sprememb. Temnejša barva ponazarja večjo razliko.



Slika 33: Identifikacija sprememb v kanalu TM 3 za neobdelane digitalne vrednosti (DN), radiance (RAD) in odboj (ODB). Zgoraj so primeri določitve razlik brez relativne uskladitve kanalov, spodaj so primeri na podatkih, ki so bili predhodno relativno standardizirani.

Figure 33: Change detection in band TM 3 for raw digital numbers (DN), radiances (RAD) and reflectances (ODB). Above: changes detected without relative radiometric adjustment, and below after relative radiometric standardisation.

Na vseh podatkih so bile prepoznane večje spremembe, na primer izgradnja avtocestne obvoznice pod in čez Golovec. Rezultati so različni predvsem v tem, da je med identificiranimi spremembami na podatkih DN in RAD več šuma oziroma navideznih sprememb, ki so posledica razlik v senzorju, osvetlitvi in drugih okoliščin zajema.

Primer nazorno prikazuje, da je vsaj minimalna priprava podatkov (tj. georeferenciranje in relativna standardizacija) nujna, če želimo identificirati prave spremembe stanja med dvema datumoma. Z vidika zmanjšanja deleža navideznih sprememb velja podobno: z večstransko odpravo nesoglasij med posnetkoma se bližamo realnejši tipizaciji sprememb.

5.5.3 Spektralni indeksi

Spektralna razmerja (spektralne indekse) se uporablja iz dveh razlogov. Prvič zaradi prednosti, ki jih razmerja prinašajo v interpretacijo ter drugič, ker z njimi lahko bolje opazimo drobne razlike v spektralnih odzivih različnih tipov površja. Različni indeksi površja podajajo različne informacije, vsem pa je skupno to, da izhajajo iz razmerja med absorpcijo in odbojem danega materiala. Podajajo nekakšne bio-kemijske lastnosti materiala oziroma pokrova. Če nas zanimajo posebne lastnosti površja, je vsekakor smiselno podatke na tak način preurediti.

V analizi s spektralnimi indeksi kot vhodnimi podatki me je predvsem zanimalo, kakšna je porazdelitev razlik v podobi razlik glede na to, da uvajamo razmerja med kanali, in s tem ali lahko spremembe na tovrstnih podatkih določamo na enak način kot je bilo opisano doslej ali ne. Nadalje pa še, ali so razmerja zaradi poznanih prednosti tudi kaj bolj stabilen podatek z vidika časovnih primerjav.

Testirala sem kako spremembo stanja med dvema datumoma zasledijo oziroma identificirajo naslednji indeksi: normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI), transformiran normiran diferencialni vegetacijski indeks (TNDVI), enostavno razmerje (SR), mineralni kompozit (MinK) ter hidrotermalni kompozit (HTK). NDVI podaja stanje oziroma zdravost vegetacije. V temni barvi (nižje vrednosti) se kažejo območja s poškodovanim rastlinjem ali brez njega, v svetli (višje vrednosti) pa so območja z zelo aktivno vegetacijo. Na podoben način izraža stanje vegetacije tudi TNDVI, ki je korenjena različica NDVI ter SR, ki pa bolj poudari kontrast med tlemi in vegetacijo, pri čemer minimizira vpliv osvetlitve. MinK podaja tri informacije o vsebnosti različnih mineralov v tleh, HTK pa tri zveze med vlažnostjo in temperaturo tal.

Poglejmo najprej na kakšen način različni indeksi zaznavajo spremembe stanja med podatki posnetkov 1992-08-18 ter 1999-08-07 (slika 34). Identificirane spremembe so določene v enajst razredih (preglednica 12 spodaj). V oči takoj stopi rezultat TNDVI, za katerega se zdi, da so bili postavljeni pregrebo prehodi med razredi (večji del slike je razred brez sprememb v sivem tonu). NDVI in TNDVI imata histograma razlik skoraj enake oblike, zato pa ima TNDVI še enkrat manjši standardni odklon, kar (ob enaki metodologiji določanja razredov sprememb) vidno vpliva na razlikovanje med posameznimi razredi. SR ima vrh porazdelitve vrednosti za polovico standardnega odklona zamaknjen v negativne razlike, kar povzroči efekt prevrednotenja sprememb enega predznaka nasproti drugemu. Mineralni in hidrotermalni kompoziti so se z vidika porazdelitve vrednosti razlik v splošnem odrezali bolj stanovitno in v skladu s predpostavko, da se razlike porazdeljujejo približno normalno. Sicer pa, podobno ugotovitvi v prejšnjem poglavju, prav vsi indeksi zaznajo velike spremembe in jih razvrstijo v najvišje kategorije v lestvici sprememb. Odvisno od narave indeksa (kakšne lastnosti površja poudarja) pa so te ali skrajne negativne ali skrajne pozitivne spremembe. Tudi prostorski vzorci (obseg, meje) velikih sprememb so na podatkih različnih indeksov skladni.

Kadar spremembe določamo na podatkih spektralnih indeksov, moramo paziti na obliko histograma, lego glavnega vrha ter velikost odmika sredine od ničle. Te parametre moramo smiselno vključiti v klasifikacijo razredov sprememb, če uporabljamo princip odklikov standardnega odklona od sredine. Indeksi, ki so v histogramih bolj nagnjeni k značilnemu odstopanju od normalne porazdelitve, niso zanesljivi za določanje subtilnejših prehodov razredov sprememb.

Na podatkih različnih časovnih primerjav z naštetimi indeksi ugotavljam tudi, da so vse tri komponente mineralnega kompozita in hidrotermalnega kompozita ter NDVI z vidika lastnosti porazdelitve razlik (oblike in parametrov histogramov) bolj primerni od enostavnega razmerja, ki teži k večji nesimetričnosti.

Ob primerjavi uporabe spektralnih indeksov iz različnih letnih časov pa se za določanje sprememb odpira novo polje zagat. Za podatke NDVI v spomladanskem in jesenskem letnem času, ko vegetacija ne miruje, pogosto nastopi problem saturacije posameznih pikselov

oziroma predmetov, ki v podobi razlik pridobijo tako ekstremne vrednosti, da znatno vplivajo tudi na kategorizacijo prehodov ali velikostnih razredov sprememb. Neprijetna posledica tega je, da moramo podatke NDVI iz aktivnega obdobja rastlinja na različne načine kalibrirati (na primer odstranimo problematična območja, opredelimo maksimalen interval vrednosti in podobno), da zajamemo in ujamemo realne prehode sprememb.



Slika 34: Primeri uporabe različnih spektralnih indeksov za opazovanje sprememb na posnetkih med letoma 1992 in 1999, poletni letni čas, izsek mesta Ljubljane in Ljubljanskega barja.

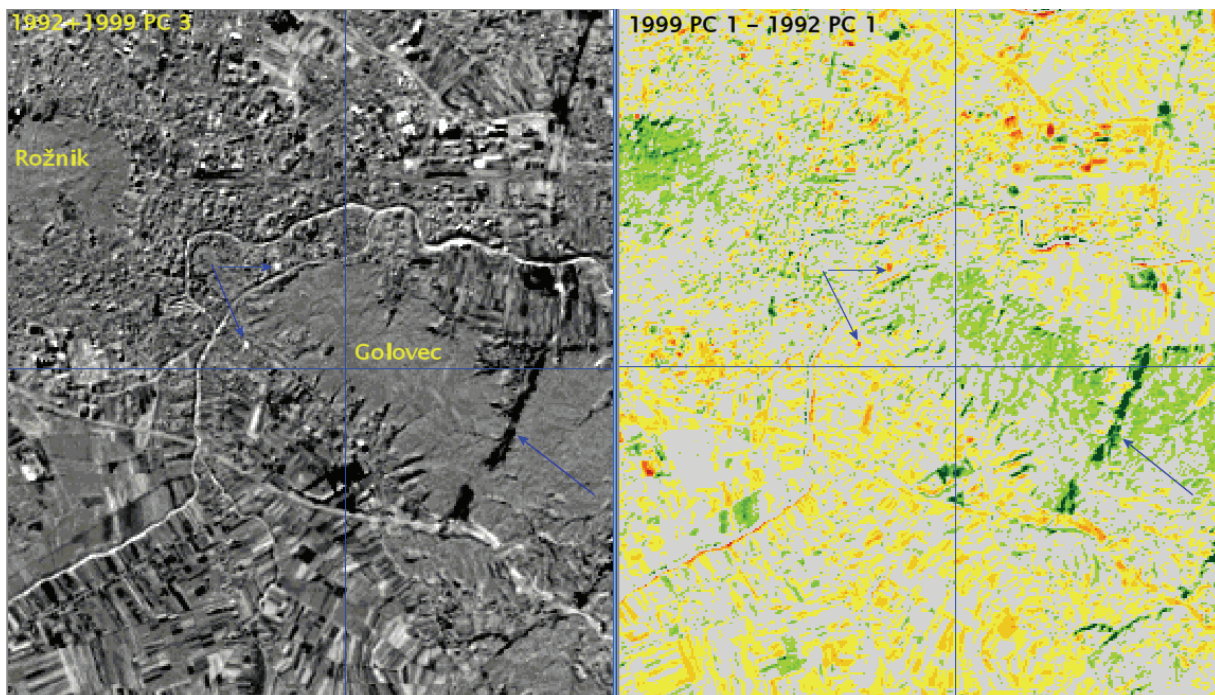
Figure 34: The use of different spectral indexes for change detection purposes. Examples are performed on 1992 and 1999 imagery, summer season, Ljubljana and its surroundings subset.

Za sistematično obdelavo in primerjavo daljšega časovnega zaporedja posnetkov so tovrstne lastnosti (spremenljivost lastnosti porazdelitve med različnimi datumi, nesimetričnost, zamik glavnega vrha iz sredine, sprotno kalibriranje podatkov in podobno) zelo nepraktične. Za vsak tak par primerjanih podob oziroma podobo razlik bi morali lastnostim histograma ustrezno prilagajati določitev razredov sprememb. S takšnim sprotnim uravnavanjem pa izgubimo kriterij enake obravnave zaporedja členov časovne vrste podob razlik.

5.5.4 Glavne komponente in komponente KTT

Glavne komponente lahko v časovnih analizah uporabimo na dva načina. Prvič, za strnitev pomembnejših informacij z zmanjševanjem razsežnosti podatkov, ki jih nato obdelujemo v analizi sprememb, ali drugič, kot tehniko za določanje sprememb.

Na sliki 35 je prikazana primerjava rezultatov obeh načinov za izsek Ljubljane. Slika 35 levo prikazuje komponento 3 iz analize glavnih komponent med združenima posnetkoma 1992-08-18 ter 1999-08-07, ki je bila identificirana kot komponenta razlik med posnetkoma. Na desni strani pa je rezultat analize sprememb na podatkih prve komponente iz posnetka 1992 in prve komponente iz posnetka 1999. Vidimo lahko, da sta si oba načina precej soglasna v identificiranju sprememb oziroma razlik med posnetkoma (prostorska vzorca najsvetlejših in najtemnejših tonov). Kar je na levi sliki v zelo svetlih tonih so negativni prirastki v odboju in kar je v zelo temnih tonih so, kot kaže slika desno, pozitivni prirastki v odboju. To pomeni, da lahko tretjo komponento iz analize glavnih komponent dveh združenih posnetkov uporabimo kot podobo razlik vidnega dela spektra posnetkov.



Slika 35: Primerjava dveh načinov uporabe glavnih komponent: (slika levo) kot tehnika za določanje sprememb ter (slika desno) kot analiza sprememb na glavnih komponentah 1 posnetkov 1992-08-18 in 1999-08-07.

Figure 35: Two principles of using principal components analysis: (left) as change detection technique and (right) as change detection on principal components 1 of 1992-08-18 and 1999-08-07 datasets.

Interpretacija nekaj izbranih glavnih komponent je vsekakor preprostejša in bolj učinkovita od analize vseh kanalov določenega senzorja. Je pa res, da je identifikacija vsebine na podatkih

glavnih komponent, z izjemo prve komponente, za katero je znano, da prikazuje približek povprečja vidnih kanalov 1–3, precej nejasna.

Komponente Kauth-Thomasove transformacije (komponente KTT) sem v nadaljnji obravnavi opustila. Glavni razlog je ta, da komponente KTT zahtevajo precej dodatnega medsebojnega usklajevanja. Parametri linearne transformacije za senzor TM in ETM+ se namreč precej razlikujejo tako glede razmerij kot vpeljane prištevne (aditivne) komponente. Po drugi strani se je na podlagi preliminarne analize pokazalo, da analiza na komponentah KTT ne prinaša bistveno drugačnih in novih zaključkov z vidika obravnavanih vsebin. Princip uporabe spektralnih transformacij za analizo sprememb zato od tu dalje predstavljajo glavne komponente.

5.6 Rezultati analize sprememb

Pri analizi časovnih vrst je glavni cilj pridobiti shemo trenda oziroma krivulje sprememb skozi zaporedje posnetkov ter spremembe kvantitativno ovrednotiti. Odvisno od predmeta opazovanja in podatkov lahko opazujemo eno ali več skupin (kategorij). Opazujemo, kako spreminjajo svojo lego v prostoru in/ali spektralnem prostoru, kako prehajajo, se združujejo, nihajo in podobno skozi točke časa.

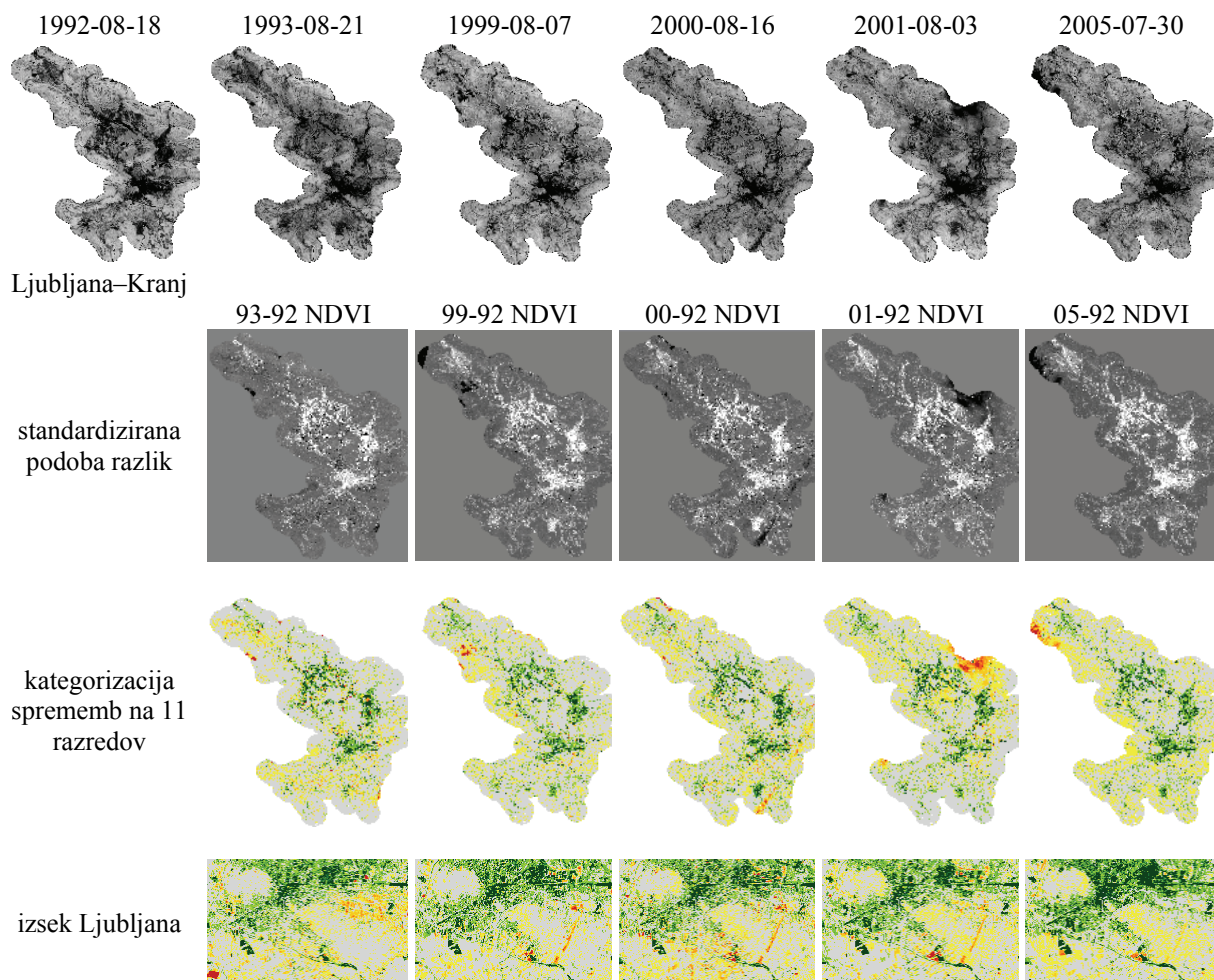
V tem poglavju predstavljam primere opazovanja časovnih vrst iz različnih vidikov: glede na uporabljene podatke (indikatorji o lastnostih površja) in glede na izbrane naravne okoliščine (letni čas, geografsko območje).

5.6.1 Glede na uporabljene podatke

Najprej pogledjmo rezultate za spektralni indeks NDVI, za območje Ljubljana–Kranj z okolico, poletni letni čas (slika 36). V prvi vrstici so prikazani standardizirani podatki časovne vrste NDVI, v drugi podobe razlik primerjanih sekvenc, v tretji rezultati določitve sprememb (kategorizacija na 11 razredov) in v četrti vrstici izseki območja mesta Ljubljana. Pri podobah razlik svetli toni pomenijo velike pozitivne razlike, temni toni velike negativne razlike, s sivo barvo so predstavljena območja brez ali z majhnimi razlikami. Na kategoriziranih podobah sprememb zeleni toni predstavljajo pozitivne spremembe ali prirastke (v indeksu NDVI), rumeno-rdeči pa negativne spremembe, zmanjšanje v vrednostih (indeksa NDVI). Temnejša je barva, večja je sprememba. Tak način prikaza (podob razlik in kategorizacije) velja za vse obravnavane primere časovnih vrst, tudi v nadaljevanju disertacije.

Analiza sprememb pokaže, da lahko zaznamo vse večje spremembe. Vendar so v skrajnih kategorijah sprememb zajete tako razlike zaradi prisotnosti oblakov kot dejanske razlike zaradi posegov v prostor (npr. izgradnja obvoznice). Pojavljanje zgrajenih površin na račun zelenih površin se kaže kot velika negativna sprememba (upad vrednosti NDVI). Na vseh območjih, z izjemo območja 1992, so prisotni oblaki ali opaznejše meglice. Pokaže se, da je delež sprememb zaradi šuma oblakov v primerjavi z dejanskimi spremembami tako velik, da onemogoča realno primerjavo stanj med sekvencami. Zaradi takšnega deleža šuma naravnih okoliščin je v podobah razlik zmotena optimalna normalna porazdelitev vrednosti, ki se kaže kot zamik vrha porazdelitve od sredine. V primerih, ko je delež tovrstnega šuma velik, pride tudi do manjše bimodalnosti porazdelitve (dva vrha). Posledica tega je, da so kategorije

prehodov sprememb med seboj neuskrajene, torej niso neposredno primerljive in primerne za kvantitativno ovrednotenje.

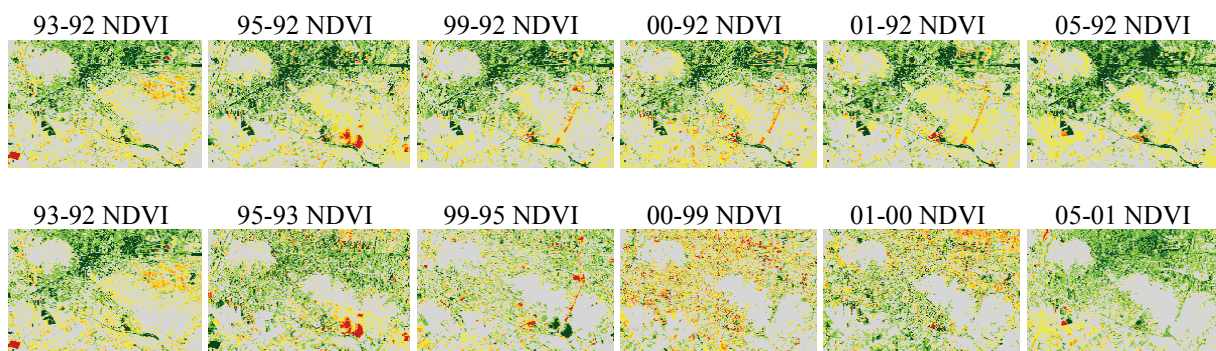


Slika 36: Rezultati analize sprememb za časovno vrsto spektralnega indeksa NDVI, poletni letni čas, območje Ljubljana–Kranj z okolico.

Figure 36: Time series change detection results on NDVI data, summer season, Ljubljana–Kranj and surroundings case study.

Časovno vrsto lahko analiziramo na več načinov. Slika 37 zgoraj podaja primer kumulativnega opazovanja stanj (primerjava glede na izbrano časovno izhodišče) ter spodaj relativnega opazovanja stanj (primerjava zaporednih sekvenc) na podatkih indeksa NDVI, na izseku mesta Ljubljane z Ljubljanskim barjem.

Za opazovanje globalnega trenda sprememb je primernejši kumulativni način opazovanja, saj se izognemo prenosu motenj med posameznima sekvencama. Vsi v nadaljevanju prikazani rezultati časovnih vrst so primeri kumulativnega opazovanja.

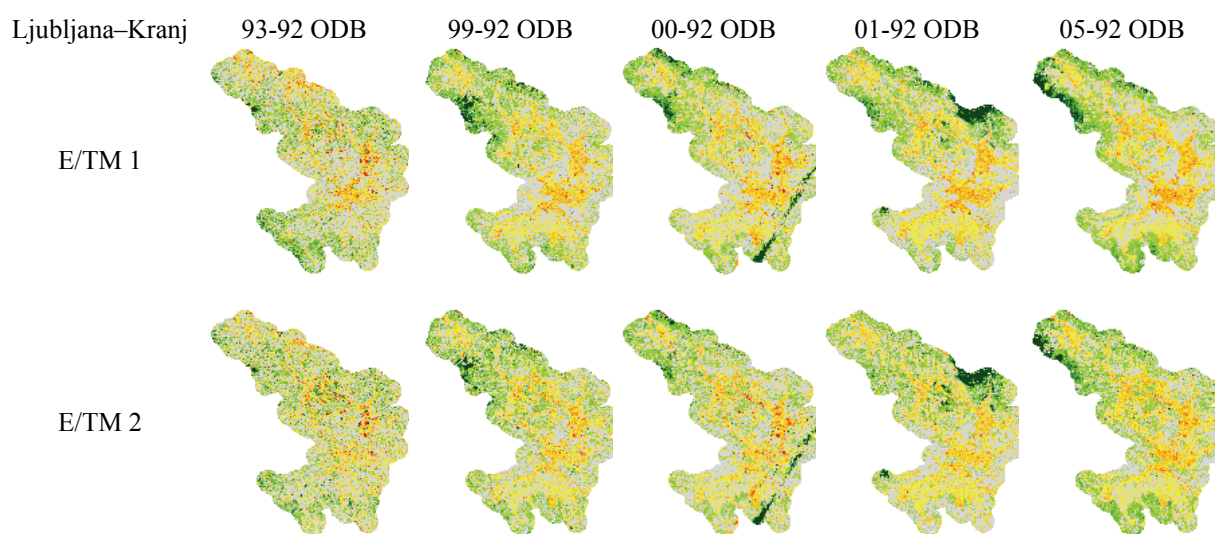


Slika 37: Primerjava rezultatov analize časovne vrste v dveh načinih obravnave zaporedja sekvenc. Zgoraj kumulativna primerjava stanja na izhodiščno stanje (posnetek 1992), spodaj relativna primerjava zaporednih parov posnetkov.

Figure 37: Comparison of two temporal approaches to time series analysis. Above results of a cumulative approach with reference point in time is shown and below results of relative approach between two successive states is shown.

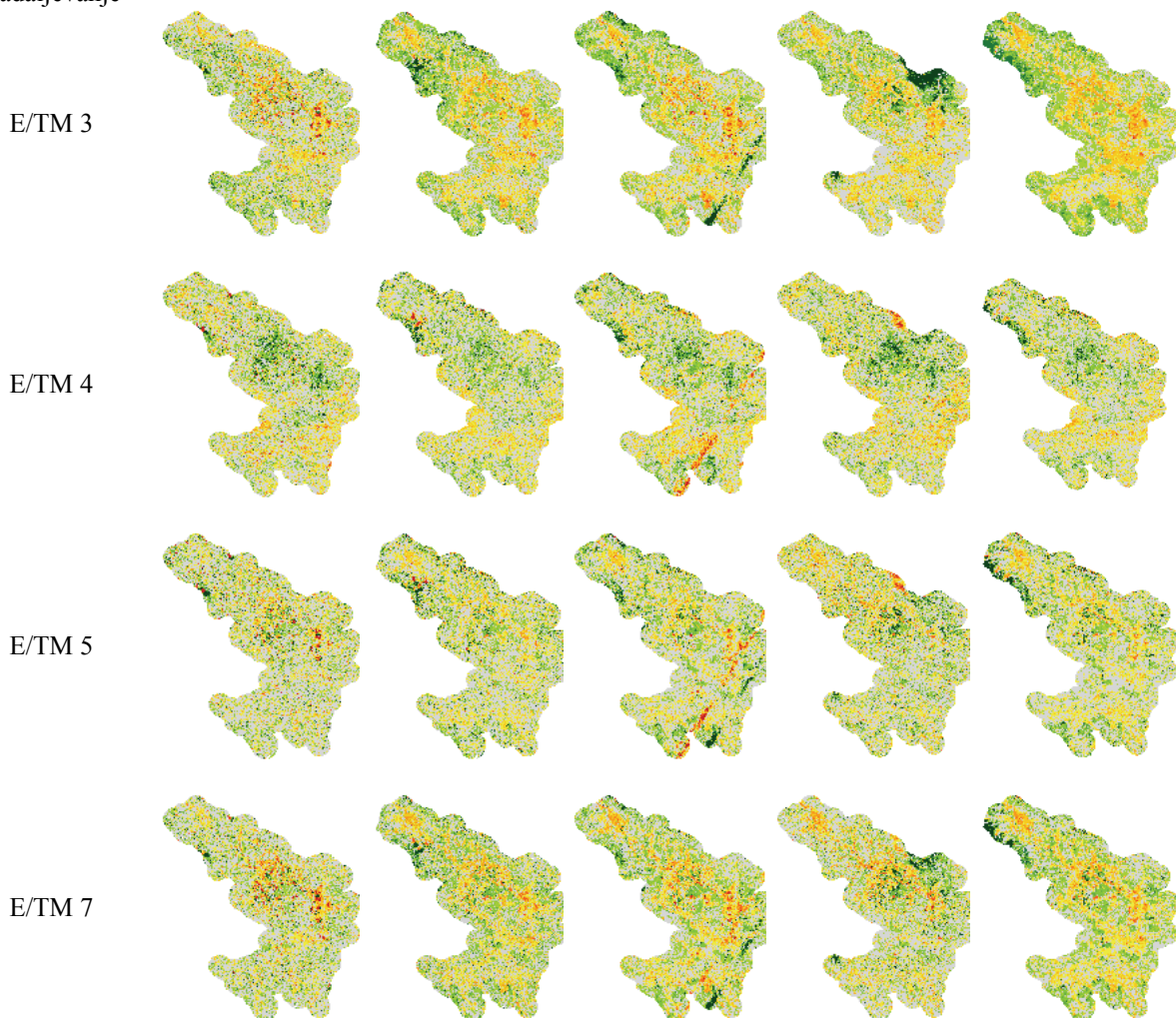
Sledi primer rezultatov analize sprememb časovne vrste na standardiziranih odbojnih vrednosti površja ODB (slika 38, za enako območje in enak letni čas.

Tudi pri rezultatih analize sprememb na odbojnih vrednosti pridemo do podobnih zaključkov, kot pri rezultatih analize na podatkih indeksa NDVI. Vse velike spremembe so opredeljene in se v dani kategorizaciji nazorno pokažejo. Znova pa imamo problem prisotnosti šuma in navideznih sprememb, ki onemogočajo kvantitativna ovrednotenja trendov na opazovanem območju.



se nadaljuje...

... nadaljevanje

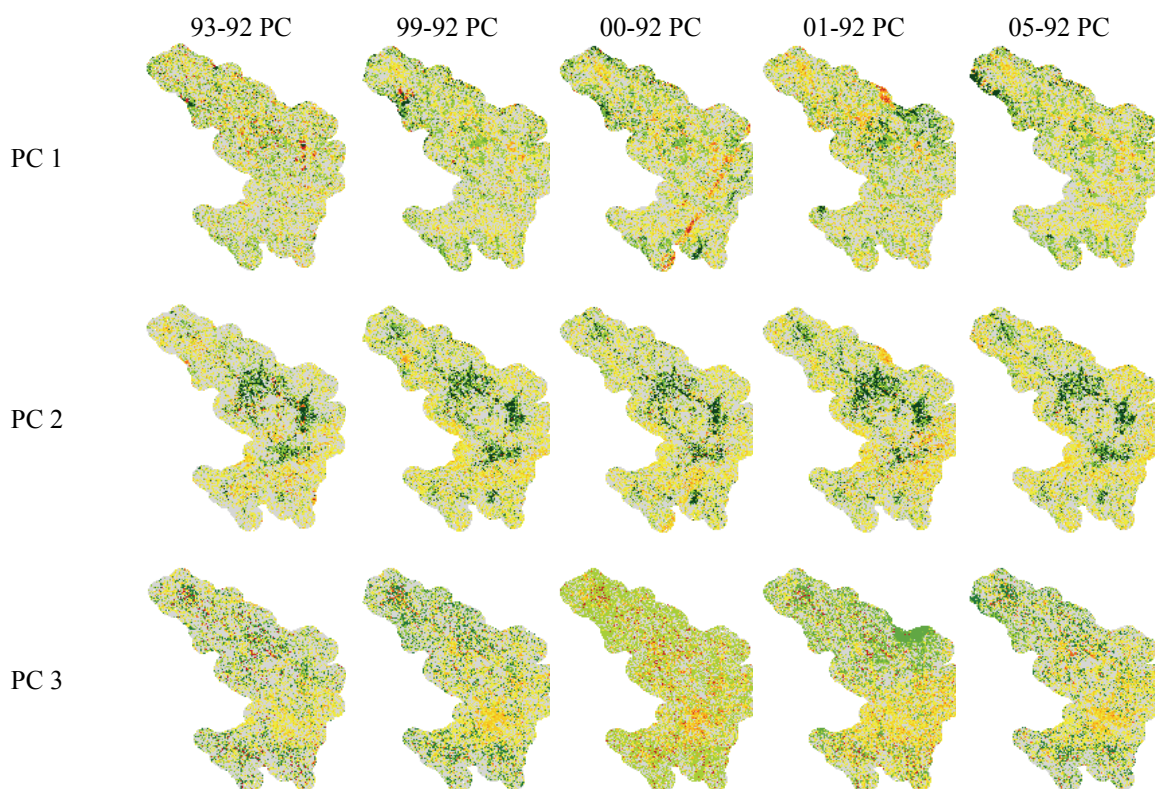


Slika 38: Rezultati analize sprememb na časovni vrsti podatkov odbojnih vrednosti (ODB), poletni letni čas, območje Ljubljana–Kranj, po spektralnih kanalih.

Figure 38: Time series change detection results on reflectance data (ODB) as regards spectral bands, summer season, Ljubljana–Kranj case study.

Nadaljujemo z rezultati analize na podatkih glavnih komponent (PC). Ker so komponente 4–6 po večini komponente, ki na različne načine vsebujejo šum napak v delovanju senzorja, v rezultatih prikazujem le prve tri komponente (slika 39). Prva komponenta PC 1 je najbližje povprečju vidnih kanalov, druga PC 2 je blizu bližnjemu IR spektru, tretjo komponento PC 3 pa bi lahko interpretirali tudi kot nekakšne razlike med spektralnimi kanali danega posnetka.

Tudi pri rezultatih na podatkih glavnih komponent srečamo podobne lastnosti rezultatov. Velike spremembe so opredeljene, kvantitativno ovrednotenje pa ovira prisoten meteorološki šum.



Slika 39: Rezultati analize sprememb na časovni vrsti podatkov glavnih komponent (PC), poletni letni čas, območje Ljubljana–Kranj, po glavnih komponentah 1-3.

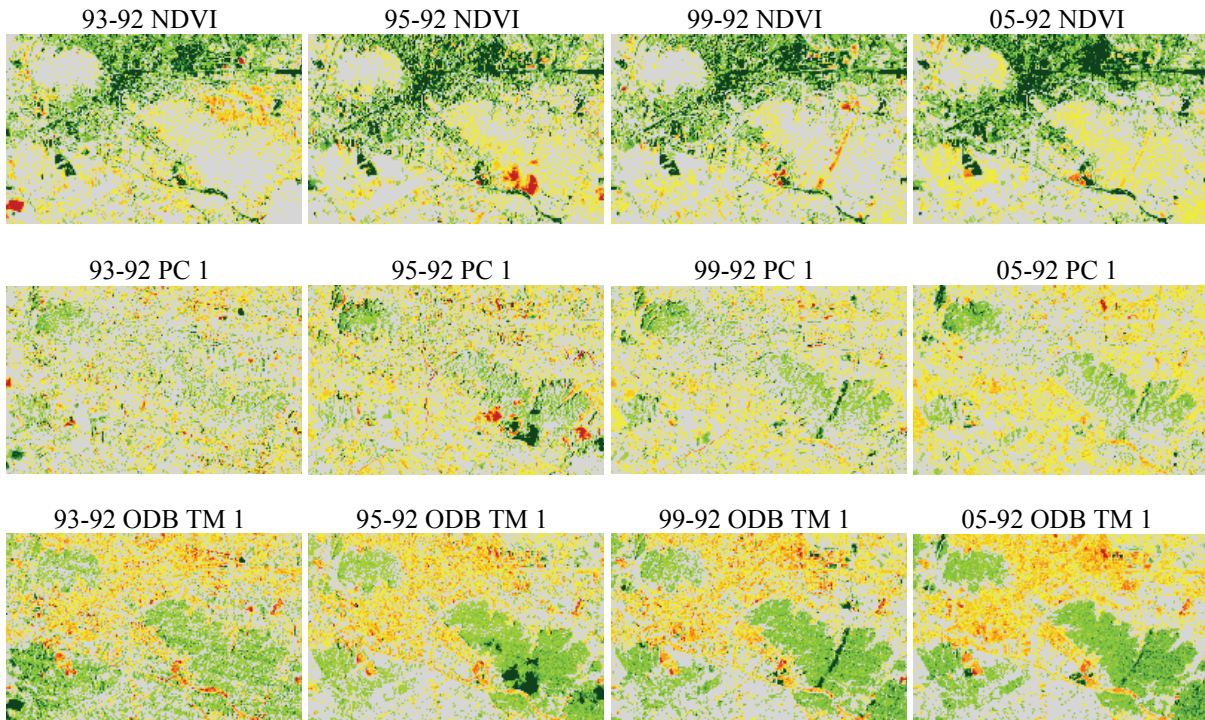
Figure 39: Time series change detection results on PCA analysis as regards principal components 1-3, summer season, Ljubljana–Kranj case study.

Na koncu si pogledjmo na primeru obravnavane časovne vrste in v podrobnejšem oknu pogleda še, kako tri različne vrste podatkov (NDVI, ODB in PC) zaznavajo in kažejo spremembe na istem območju (slika 40).

Znova vidimo, da večje prave in navidezne spremembe vse tri skupine podatkov zaznavajo podobno. Bolj zanimivo je opazovati intenziteto zaznave. Podatki NDVI očitno zelo hitro dosežejo skrajne kategorije pozitivnih sprememb (precejšen del urbanih površin je opredeljen kot velika pozitivna sprememba), medtem ko pri zelenih površinah takšne občutljivosti ne zaznamo. To lahko pomeni, da bi bilo pri kategorizaciji sprememb smiselno oblikovati nesimetrično shemo prehodov, tj. različno za pozitivne in negativne spremembe. Podatki PC izmed vseh skupin delujejo nekako najbolj uravnoteženo. Dobro zaznavajo vse večje spremembe, prag lastne spremenljivosti ali variabilnosti predmetov je očitno tudi kar visok (večji del območja je določen kot manjše spremembe), razmerje med pozitivnim in negativnim delom razlik pa se tudi zdi dobro uravnoteženo. Pri podatkih odbojnih vrednosti ODB je razmerje med pozitivnim in negativnim delom razlik prav tako uravnoteženo, zdi pa se, da je občutljivost že za manjše prehode sprememb tu nekoliko večja.

Na splošno lahko zaključimo, da je glavni problem daljših časovnih vrst na večjem območju (regionalno merilo) zagotavljanje primerljivosti med sekvencami stanj. Navkljub celoviti

pripravi podatkov je več kot očitno, da je stopnja prisotnega šuma (tj. navideznih sprememb) prevelika v primerjavi z dejanskimi spremembami, zato podrobnejše analize trendov sprememb niso mogoče.



Slika 40: Primerjava zaznave in določitve sprememb med tremi vrstami podatkov: indeks NDVI, glavna komponenta PC 1 ter odbojne vrednosti v kanalu vidnega spektra E/TM 1, na izseku mesta Ljubljana.

Figure 40: Comparison of change detection and its categorisation between three datasets: index NDVI, principal component PC 1 and reflectances of visible spectrum E/TM1, on Ljubljana subset.

5.6.2 Glede na naravne okoliščine

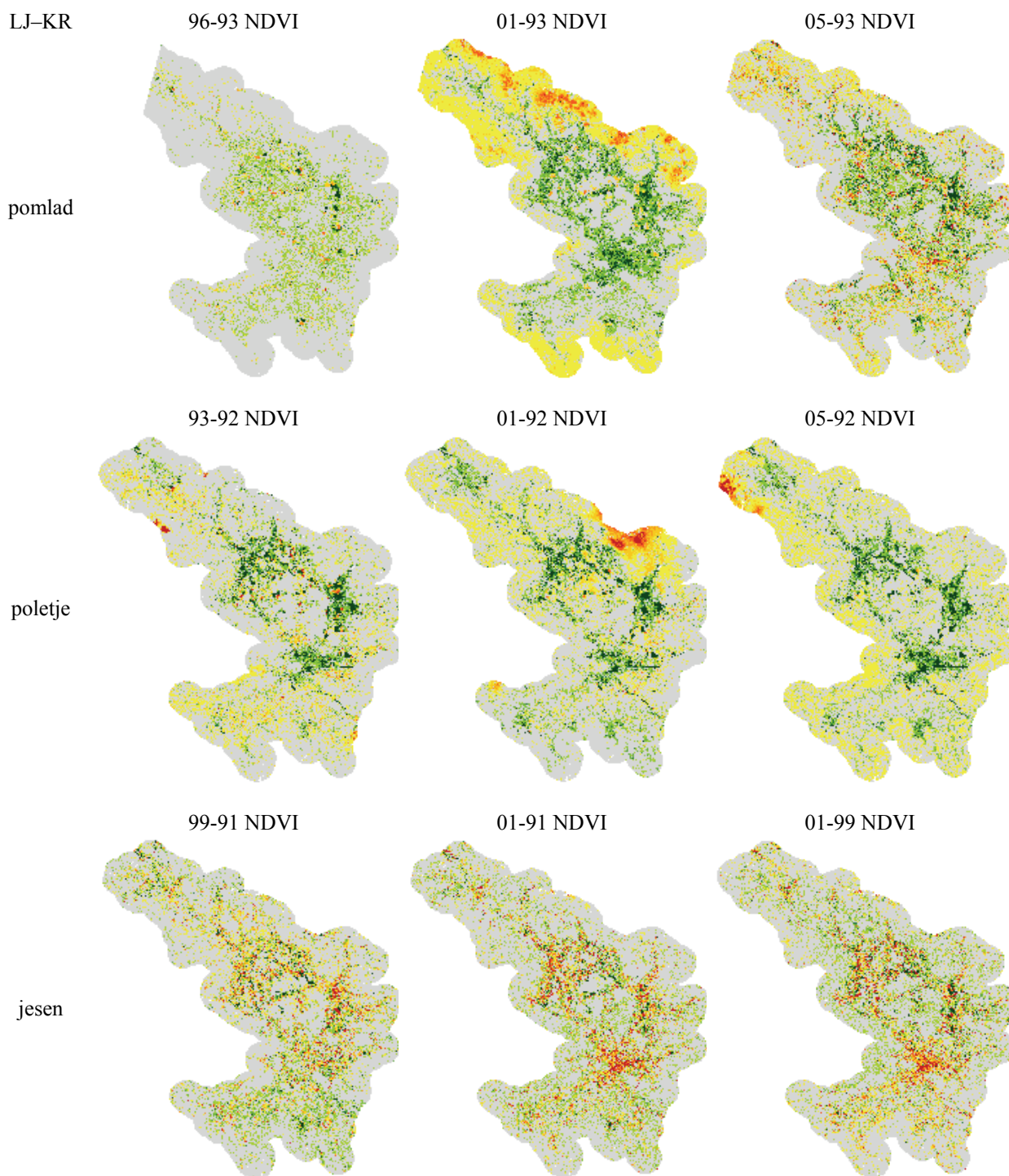
Navkljub dejstvu, da dokončnih rezultatov analize sprememb na daljših časovnih vrstah z uporabljeno metodologijo ni mogoče doseči, si pogledjmo še kakšen vpliv lahko imajo naravne okoliščine na samo izvedljivost in na same rezultate analize sprememb.

5.6.2.1 Glede na letni čas

Stanje površja je z vidika odboja površja, ki ga zaznavajo satelitski senzorji, lahko povsem drugačno v različnih letnih časih. Glavni razlog za to je spremenljivost vegetacije oziroma fenološki cikli posameznih rastlinskih združb. Sledeči primeri želijo pokazati vlogo letnih časov, kot pomembno izhodišče za doseganje uskladitve podatkov izbrane časovne vrste.

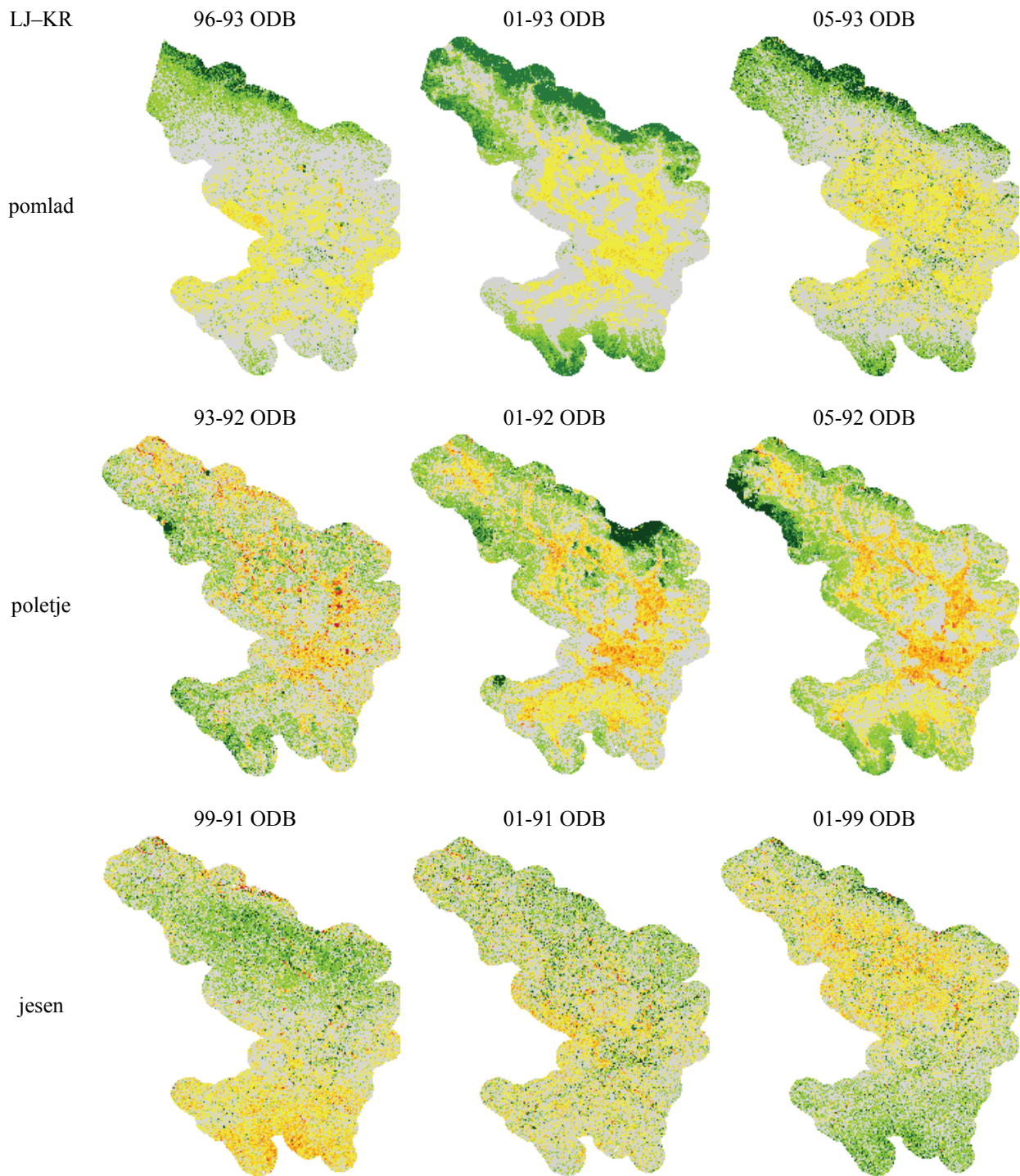
Slike 41, 42 in 43 prikazujejo rezultate analize sprememb za časovne vrste v pomladnem, poletnem in jesenskem letnem času, in sicer za tri vrste podatkov: indeks NDVI (slika 41),

odbojne vrednosti (spektralni kanal E/TM1, slika 42) ter glavno komponento PC 1 (slika 43), na širšem območju Ljubljana–Kranj.



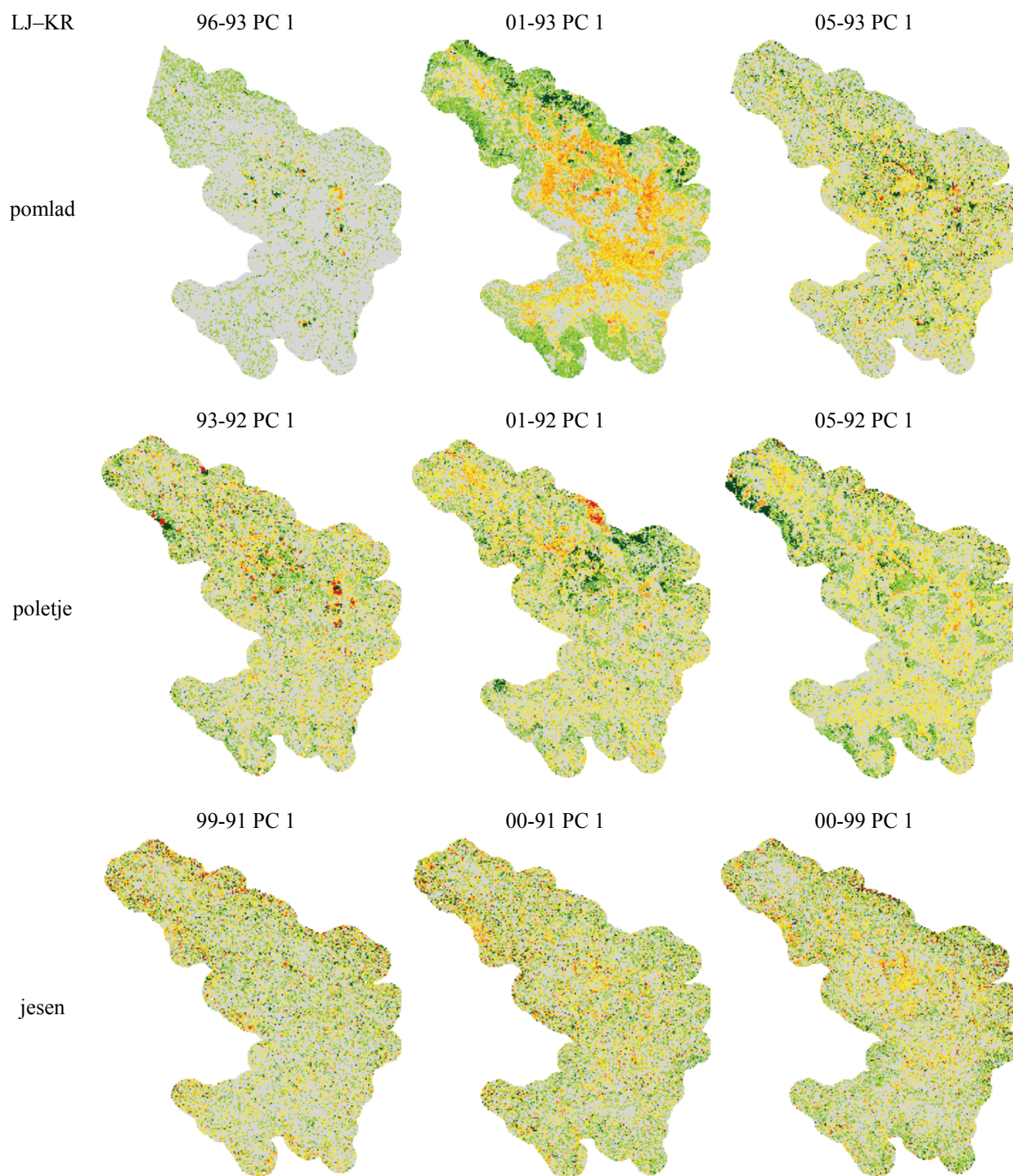
Slika 41: Primerjava zaznave in določitve sprememb med različnimi letnimi časi (pomlad, poletje in jesen) na podatkih indeksa NDVI, na območju Ljubljana–Kranj z okolico.

Figure 41: Comparison of change detection and its categorisation between different seasons (spring, summer and autumn) on NDVI index, Ljubljana–Kranj and surroundings area.



Slika 42: Primerjava zaznave in določitve sprememb med različnimi letnimi časi (pomlad, poletje in jesen) na podatkih odbojnih vrednosti E/TM 1, na območju Ljubljana–Kranj z okolico.

Figure 42: Comparison of change detection and categorisation between different seasons (spring, summer and autumn) on E/TM 1 reflectance data, Ljubljana–Kranj and surroundings area.



Slika 43: Primerjava zaznave in določitve sprememb med različnimi letnimi časi (pomlad, poletje in jesen) na podatkih glavne komponente 1 (PC 1), na območju Ljubljana–Kranj z okolico.

Figure 43: Comparison of change detection and its categorisation between different seasons (spring, summer and autumn) on principal components (PC 1) data, Ljubljana–Kranj and surroundings area.

Skladno s pričakovanji glede na naravo lastnosti in intenzivnosti sprememb površja v posameznih letnih časih se pokaže, da je pomladni letni čas najbolj težavno izhodišče za opazovanja med različnimi leti, četudi so posnetki zajeti, na primer, v istem mesecu, na približno enak datum. Podobe sprememb pri vseh spomladanskih podatkih kažejo na velike neuskkljenosti in neuravnoteženosti med opazovanimi kategorijami sprememb. Podobne so tudi ugotovitve za jesenski letni čas, razlogi pa so seveda sorodni (pestrrost vzpona / zatona vegetacije ter med-letna opazovanja morda ne vselej istočasnega razvoja fenološkega cikla vegetacije med različnimi leti). Poletni letni čas je torej kot izhodišče za opazovanja daljših časovnih vrst med različnimi leti res najbolj primeren, saj je v lastnostih površja prisotne najmanj naravne variabilnosti.

5.6.2.2 Glede na območje

Različne naravne okoliščine površja se kažejo kot različne lastnosti ali tipi površja. Tri območja (Kras, Ljubljana–Kranj z okolico in Celjska kotlina) so bila izbrana prav z namenom proučiti tudi vlogo tipa površja na izvedbo in rezultate analize sprememb v daljših obdobjih.

Območje Kras (slika 44) je primer pretežno podeželskega okolja z veliko zelenimi površinami, ki se razmeroma intenzivno spreminjajo (problem zaraščanja) in večjim posegom v prostor (izgradnja primorske avtoceste). Namen je bil spremljati predvsem spremembe v zelenih površinah skozi daljše obdobje. Glavni problem so meglice, ki so prisotne na zahodni polovici območja na posnetkih iz let 1992 in 1995, ter oblaki na posnetkih 1993 in 2000, ki so povzročili, da takšno ovrednotenje za celotno območje ni bilo mogoče. Nasprotno pa se da lepo spremljati razvoj izgradnje avtoceste mimo Sežane.

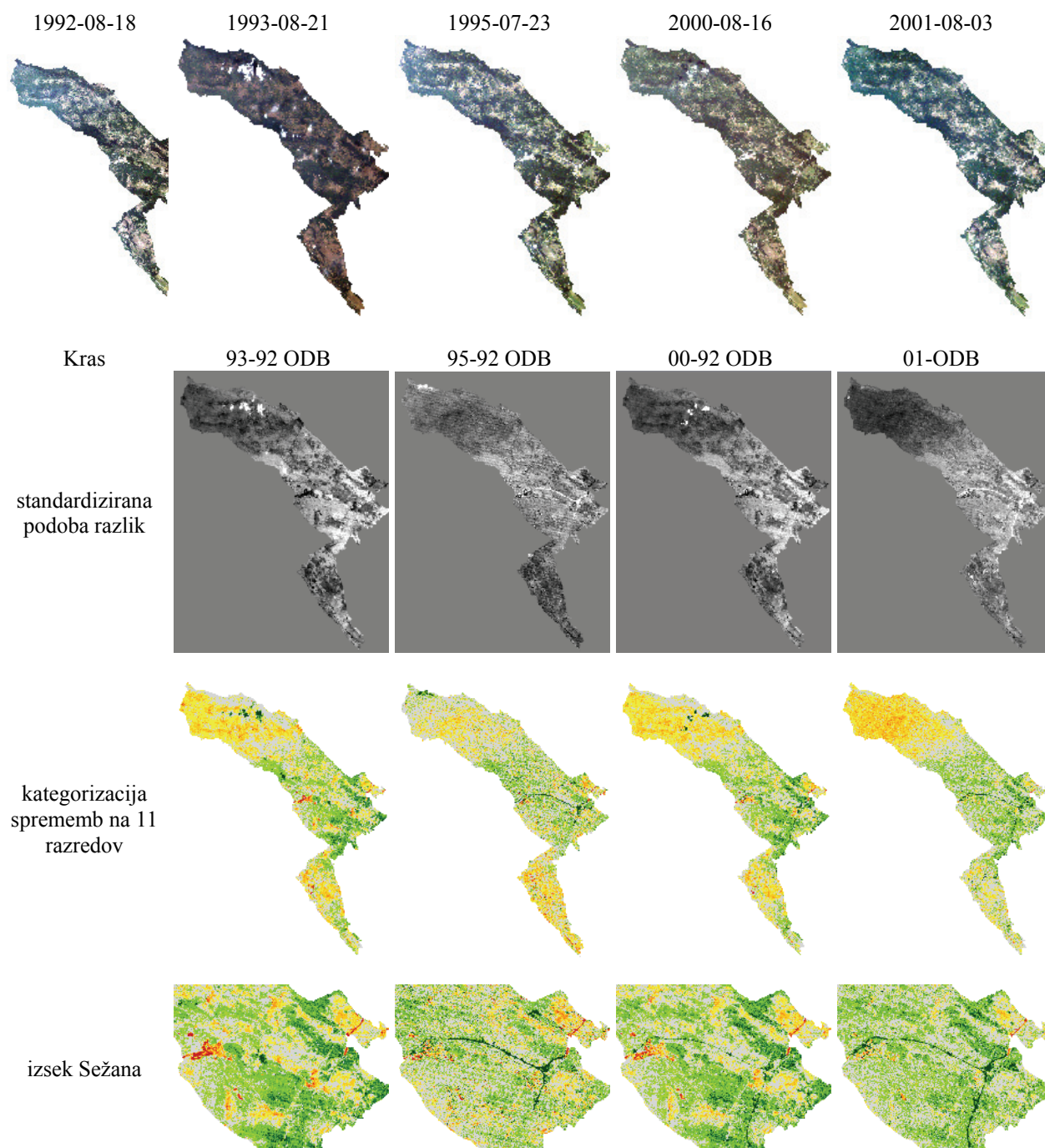
Za območje Ljubljana–Kranj z okolico je v disertaciji največ prikazanih primerov, zato na tem mestu slik ne podvajam (glej na primer sliko 38, sliko 40 spodaj ter sliko 48), temveč samo za vzorec povzemam (slika 45) ter kratko komentiram.

Območje Ljubljana–Kranj z okolico je primer kombinacije večjih urbanih središč in večjih zelenih površin (gozda), njihove pretežno urbanizirane okolice ter kmetijskih površin. Namen je bil opazovati različne procese kot skupek sprememb v prostoru. Kot glavni problem se pokaže velikost območja, saj je tveganje za prisotnost meteorološkega šuma in zato slabše možnosti za uskladitev podatkov toliko večja. Kljub temu se pokaže, da je z uporabljeno metodologijo mogoče hkrati spremljati različne procese (spremembe v kmetijskih površinah, posegih v zelene površine, gradnjo v urbanih središčih), le pogoj za kvantitativno ovrednotenje sprememb in trenda je zaradi preveč navideznih sprememb tudi v tej časovni vrsti onemogočen.

Zadnji primer predstavlja območje Celjska kotlina z okolico (slika 46). Celjska kotlina je bila izbrana kot primer opazovanja večjih infrastrukturnih posegov (izgradnja avtoceste) in močnejših procesov urbanizacije. Sicer kratka časovna vrsta je kljub vsemu pokazala na nekatera pomembna izhodišča, prav tako ključna za snovanje in oblikovanje časovnih vrst.

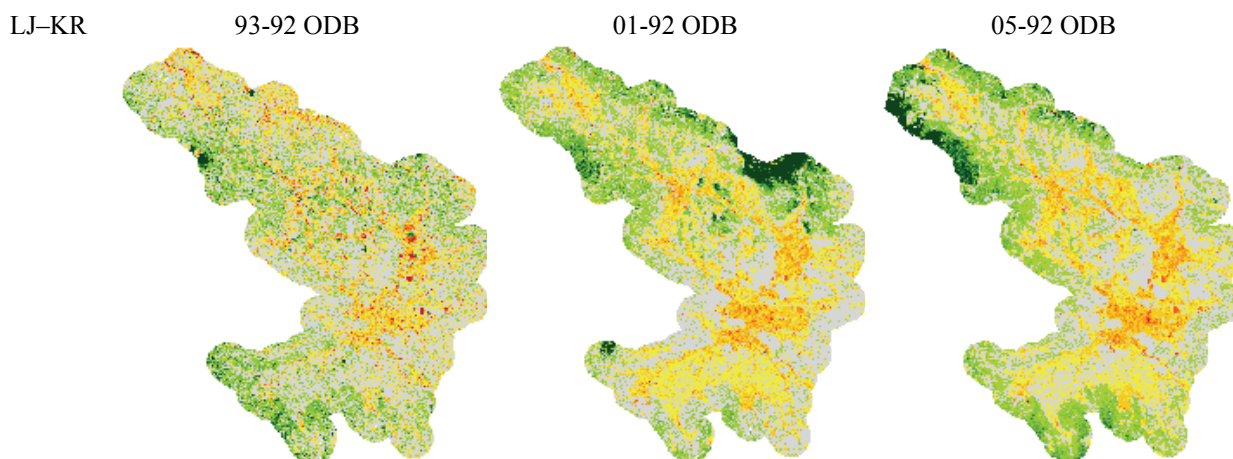
Celjska kotlina je izmed vseh najmanjše območje. Za razliko od dosedanjih problemov z meteorološkim šumom, se s tem tu ne spopadamo. Kljub temu relevantna kvantitativna analiza tudi za to območje ni bila mogoča. Razlog je razlika med izvornimi podatki, ki pa je ni mogoče odpraviti. Pokazalo se namreč je, da so ocenjene spremembe v urbanem predelu Celja prevrednotene predvsem zaradi lokalne variabilnosti med posnetki. Ta je na eni strani

posledica načina prevzorčenja izvornih podatkov v sprejemnih postajah (razlika med interpolacijo z metodo najbližjega soseda, ki daje razmeroma grob videz ter z bilinearno interpolacijo, ki daje mehkejši videz) ter na drugi strani same občutljivosti sensorja TM in E/TM v danih okoliščinah zajema (zmožnost diferenciacije visokih odbojnih vrednosti).



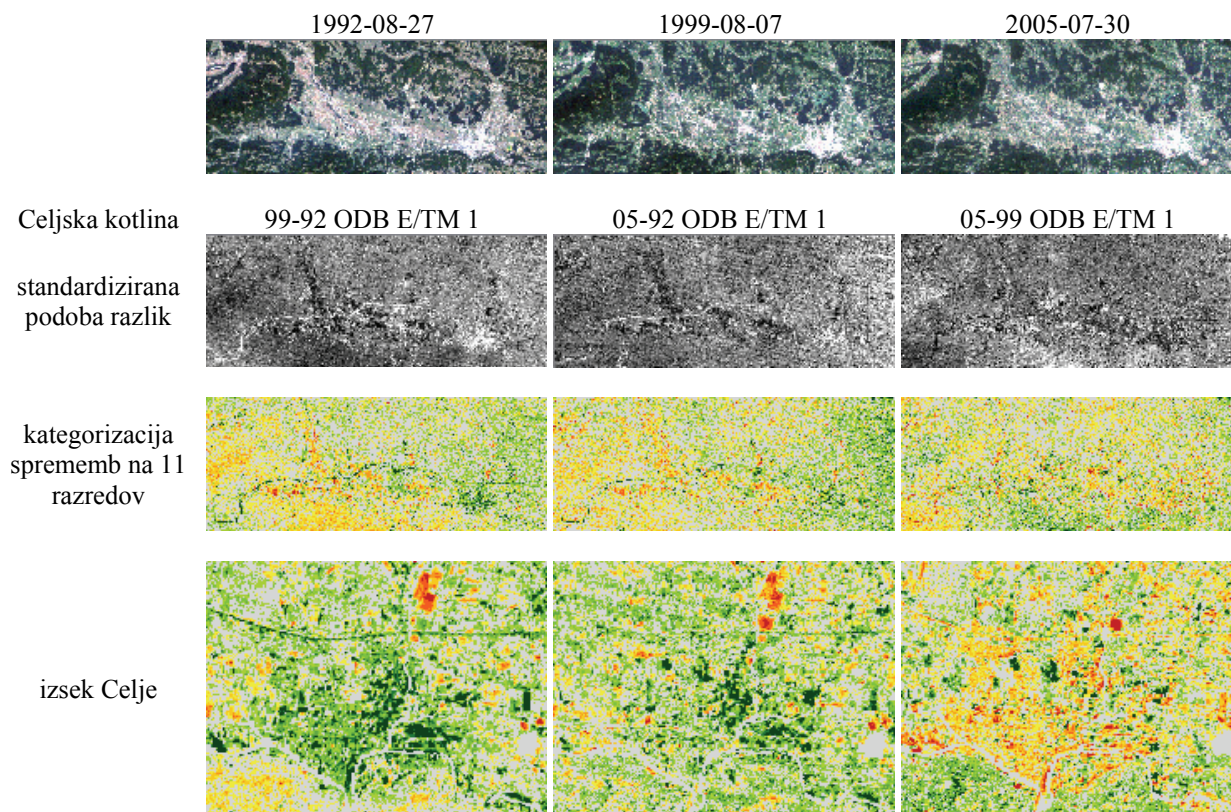
Slika 44: Rezultati analize sprememb na območju Kras, na odbojnih vrednosti spektr. kanala E/TM 1.

Figure 44: Change detection results for Kras area, E/TM 1 reflectance data.



Slika 45: Izbrani rezultati analize sprememb na območju Ljubljana–Kranj z okolico na odbojnih vrednosti spektralnega kanala E/TM 1.

Figure 45: An example of change detection results for Ljubljana–Kranj and surroundings area, E/TM 1 reflectance data.



Slika 46: Rezultati analize sprememb na območju Celjske kotline, na odbojnih vrednosti spektralnega kanala E/TM 1.

Figure 46: Change detection results for Celje basin case study, on E/TM 1 reflectance data.

5.7 Obravnava navideznih sprememb – odmik od pikselskega pristopa določanja sprememb

Z analizo različnih časovnih vrst (glede na letni čas, testno območje, vrsto indikatorja lastnosti površja) in različnih izhodišč za izvedbo analize sprememb na njih se je pokazalo, da je pogoj optimalne primerljivosti podatkov nujen za zanesljiv oziroma uporaben rezultat. Še toliko bolj je nujen za izpolnitev drugega cilja časovnih vrst, to je za kvantitativno oceno sprememb.

Prav z vidika drugega cilja se je pokazalo, da je za tehnike, ki so pikselsko usmerjene, pogoj popolne primerljivosti podatkov praktično nemogoče doseči. Glavni problem je prevelika prisotnost šuma različnih virov, ki vnaša lokalno neprimerljivost med podobami. Šum je glavni vir za določitev številnih navideznih ali nepravih sprememb, katerih obseg/delež še zdaleč ni zanemarljiv. Celovita metodologija priprave podatkov vsekakor zmanjša mnoge razlike med posnetki. Toda predvsem okoliščine, kot so različni meteorološki pogoji pred snemanjem, razlike v predobdelavi surovih podatkov v sprejemnih postajah in razlike v občutljivosti senzorjev, ostanejo prisotne in moteče ter onemogočajo relevantno kvantitativno primerjavo sekvenc razlik posnetkov in trajektorije sprememb. Še posebej to drži pri obravnavi večjih območij opazovanja.

Za rešitev problema, to je odpravljanje preostalega šuma pri opazovanju večjih območij, se na prvi pogled ponujata dve možnosti:

- izločanje navideznih sprememb z uvedbo dodatnih kriterijev prečiščevanja podatkov ter
- odmik od pikselskega pristopa.

5.7.1 Izločanje navideznih sprememb

Izločanje navideznih sprememb z uvedbo dodatnih kriterijev pomeni, da podatke o vsestranskih spremembah (tj. neselektivno opazovanje različnih sprememb površja) naknadno prečistimo na podlagi izbranih zunanjih kriterijev. Pri tem se lahko osredotočimo na:

- *geometrične lastnosti* (npr. izločimo majhne skupine pikslov ali skupine pikslov z določeno geometrično obliko) in/ali prostorske lastnosti (tj. povezanost z drugimi dejavniki kot je npr. določena bližina ali razdalja do določene kategorije sprememb ali drugih zunanjih podatkov, nenaravne anomalije znotraj večjih sicer vidno homogenih površin pokrovnosti in podobno),
- *razlike v okoliščinah* (npr. z uporabo komponent Kauth-Thomasove transformacije opredelimo razlike v vlažnosti in drugih naravnih pogojih površja med dvema sekvencama, nato pa razlike iz tega naslova prek maskiranja območij izločimo iz obravnave sprememb),
- *spektralne lastnosti* (npr. če prepoznamo, da sta si za obravnavan predmet opazovanja dva spektralna kanala ali komponenti značilno komplementarni ali nasprotno komplementarni, lahko izločimo vse ostale situacije, in tako prečistimo neželene navidezne spremembe).

Našteti primeri so lahko dobra odločitev v primeru, ko opazujemo izbran pojav in dobro poznamo njegove lastnosti zavzemanja prostorske razporeditve in odnosov z drugimi

dejavniki. V praksi to lahko izvedemo z bolj ali manj kompleksnim odločitvenim modelom. Niso pa enostavna rešitev za prečiščevanje navideznih sprememb od pravih v primeru opazovanja splošne slike stanja na podobah. Bilo bi namreč nesprejemljivo, če bi npr. na primeru geometričnih ali prostorskih lastnosti izločali majhne predmete (majhna območja sprememb) kar vseprek, saj bi tako izločili tudi določen delež sprememb, ki jih želimo opazovati (npr. manjša novogradnja v urbanem središču nasproti manjšim območjem navideznih sprememb na večjih gozdnih površinah). Ker so v disertaciji obravnavane časovne vrste namenjene opazovanju vsestranskih sprememb, opisana rešitev izločevanja šuma na podobah sprememb, ni primerna.

5.7.2 Določanje sprememb na osnovi analize sosedstva

Navidezne spremembe so v rezultatih analize vsestranskih sprememb prisotne tako v različnih kategorijah sprememb (pozitivne, negativne spremembe) kot v različnih prostorskih okoliščinah (v vseh tipih površja, npr. urbane, zelene površine). Glavni problem torej je, da porazdelitve navideznih sprememb ne moremo opisati z neko razumno funkcijo, saj se ne kaže na sistematičen način ali z značilnim odnosom, ampak je dejansko posledica razlik v podatkih. Problem razlik, ki so prisotne v podatkih tudi po celovitem globalnem usklajevanju, je, kot smo videli v poglavju 5.6, za pikselni način določanja sprememb resna omejitev, saj onemogoča kvantitativno oceno sprememb.

Možnost prehoda od pikselnega načina na predmetno usmerjen pristop bi lahko rešila problem lokalne neuskajenosti podatkov, vendar menim, da bi se tudi pri izvedbi klasifikacije posnetkov ali pa segmentacije, hitro znašli v labirintu novih težav. Te bi bile povezane predvsem z usklajevanjem razredov med različnimi posnetki v času pri klasifikaciji oziroma z usklajevanjem in prečiščevanjem segmentov pri segmentaciji. Zato menim, da težavo v dani situaciji lahko bolje reši prehod iz obravnave lastnosti posameznega piksla na obravnavo lastnosti bližnjega območja – *sosedstva*. Sosedstvo je v primerjavi s klasifikacijo ali segmentacijo predmetno bolj neodvisen pristop, še vedno pa je razmeroma lokalni in upošteva lastnosti prostorske bližine. Testirala sem dve alternativni:

- večstopenjski ali večločljivostni pristop določanja sprememb in
- določanje sprememb na osnovi korelacije sosedstev.

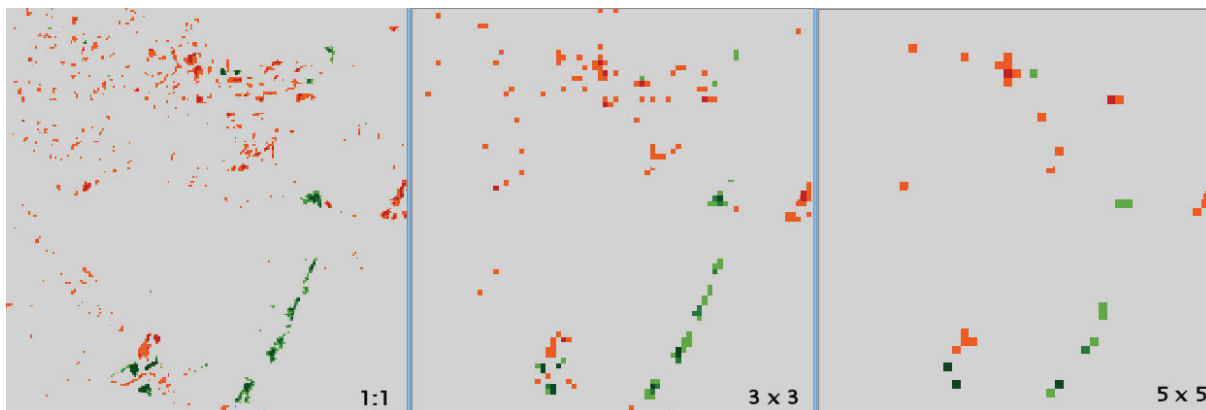
Oboje z namenom preveriti ali določanje sprememb na osnovi bolj posplošenega opazovanja okolice (sosedstvo) zmanjšuje prisotnost šuma oziroma problem navideznih sprememb ter s tem omogoči tudi kvantitativno analizo časovnih vrst.

5.7.2.1 Večstopenjski ali večločljivostni pristop določanja sprememb

Pri večstopenjskem ali večločljivostnem pristopu z analizo območij ali sosedstva najprej določimo lastnosti površja v bolj grobem merilu, nato pa ocenimo stanje sprememb med različnimi datumi v tem grobem merilu. Za tem izvedemo analizo sprememb v izvornem merilu, vendar opazujemo le tista območja, kjer je spremembe zaznala analiza v grobem merilu.

Pri izbiri in določitvi sosedstva moramo upoštevati velikost osnovne slikovne enote (prostorska ločljivost posnetka) ter njen pomen za predmete v naravi in njihovo prostorsko

pojavnost. Prednost prehoda na bolj grobo merilo, na primer na velikost celice 3 x 3 ali 5 x 5 (90 metrska in 150 metrska ločljivost v primeru posnetkov Landsat), je v tem, da se izognemo naključnemu šumu manjših prostorskih razsežnosti. Testi, ki sem jih opravila s prehodom na 90 m in 150 m sosedstvo, so potrdili, da z večjim oknom pogleda odstranimo več šuma (slika 47).



Slika 47: Analiza sprememb v različnih prostorskih merilih ter stopnja prisotnega šuma. Levo: v izvorni 30 m ločljivosti, na sredini: v 90 m metrski ločljivosti in na desni: v 150 m ločljivosti.

Figure 47: Pixel based change detection in different spatial scales along with the level of noise. Left: original 30 m resolution, middle: 90 m resolution and right: 150 m resolution.

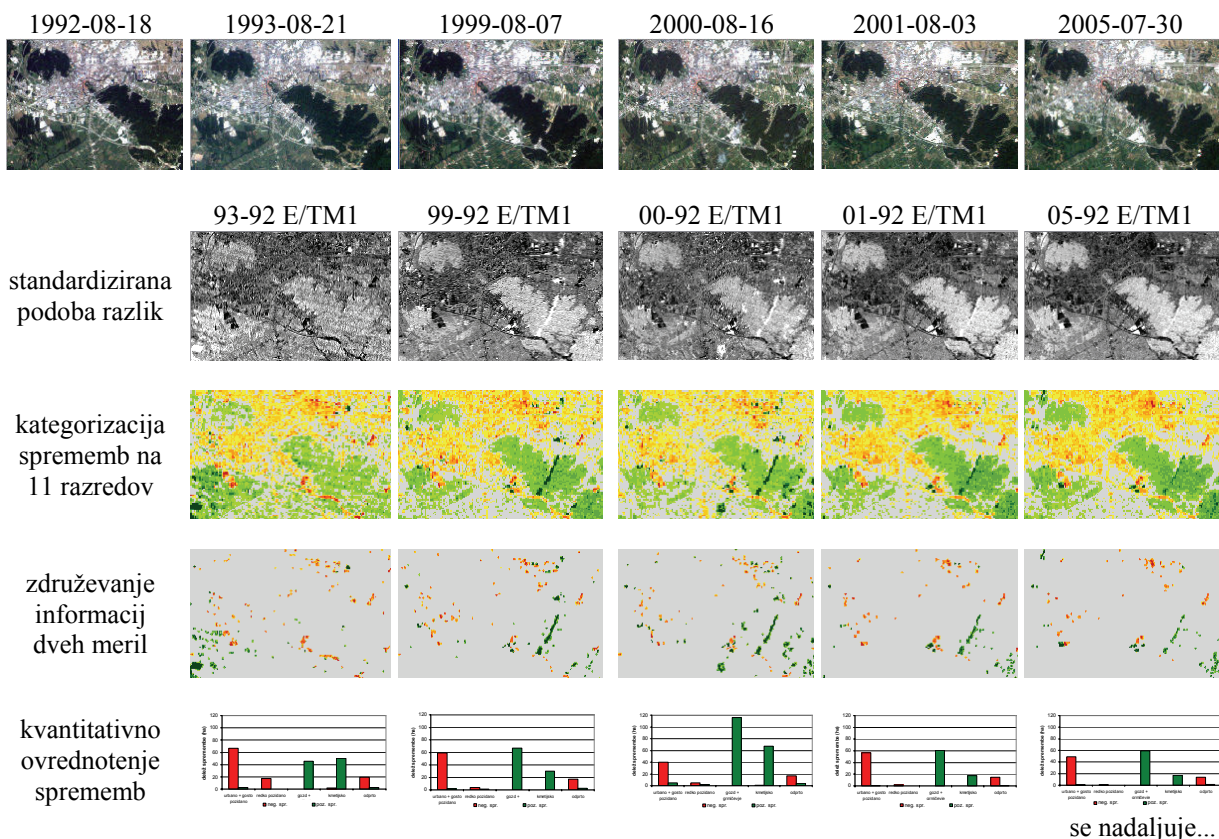
Slabost se je pokazala v tem, da začnemo izgubljati tudi vse več določenih detajlov. Pri 150 metrski ločljivosti na srednje ločljivostnih posnetkih Landsat že lahko »spregledamo« posamezne linijske strukture ali pa se jim zmanjša pomen, zniža stopnja spremembe, prekinja povezanost in podobno. Še bolj radikalno pa v tem merilu lahko izgubljam posamezne točkovne strukture, npr. izgradnja manjših objektov, kot so hiše, ali manjši kompleksi hiš, saj se zaradi povprečenja vrednosti ter okoliščin v večjem oknu pogleda (manjši ločljivosti) njihov pomen lahko povsem porazgubi.

Postopek, ki sem ga oblikovala na opisanih iztočnicah, je sestavljen iz naslednjih korakov:

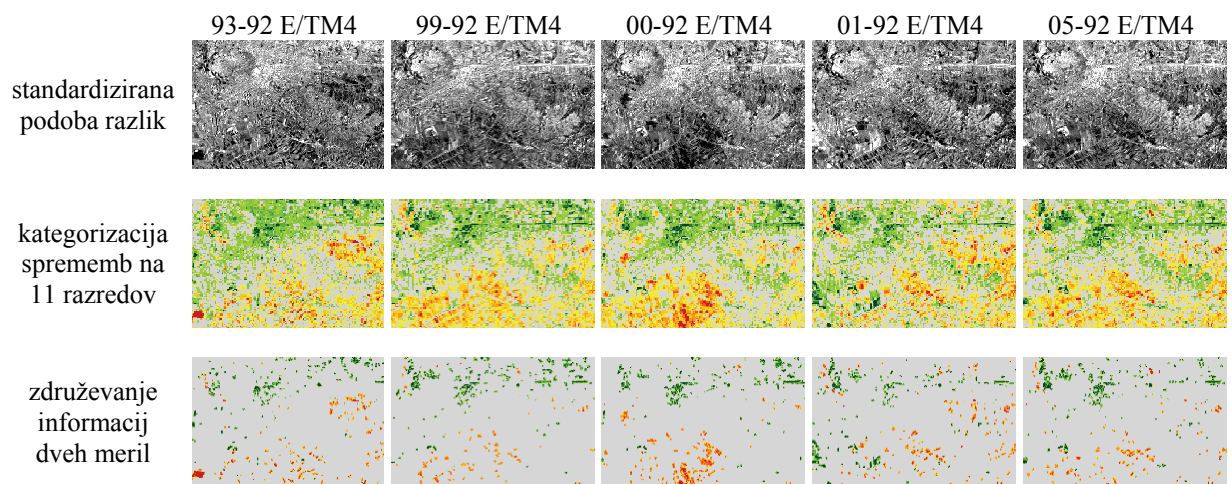
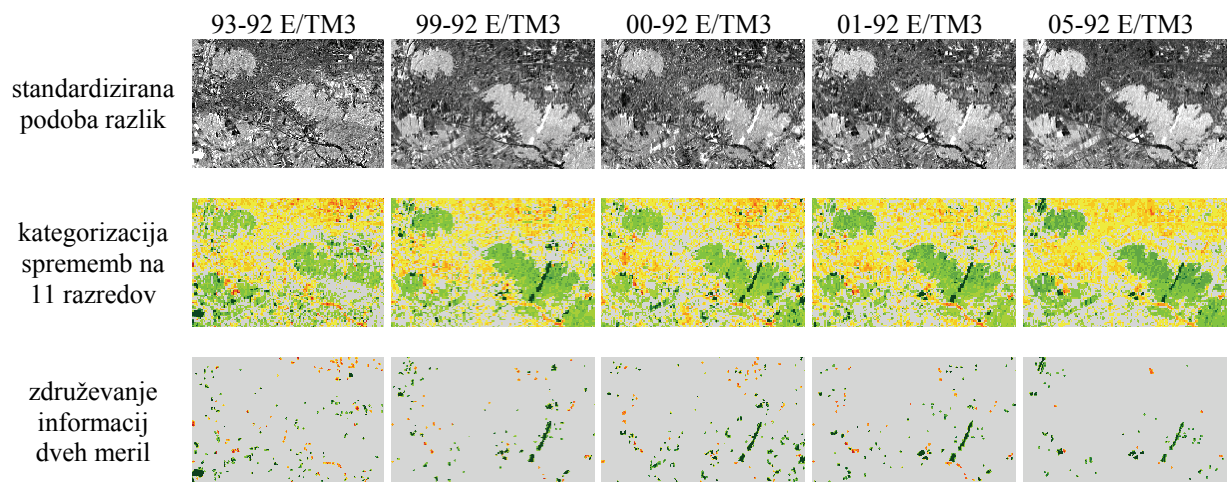
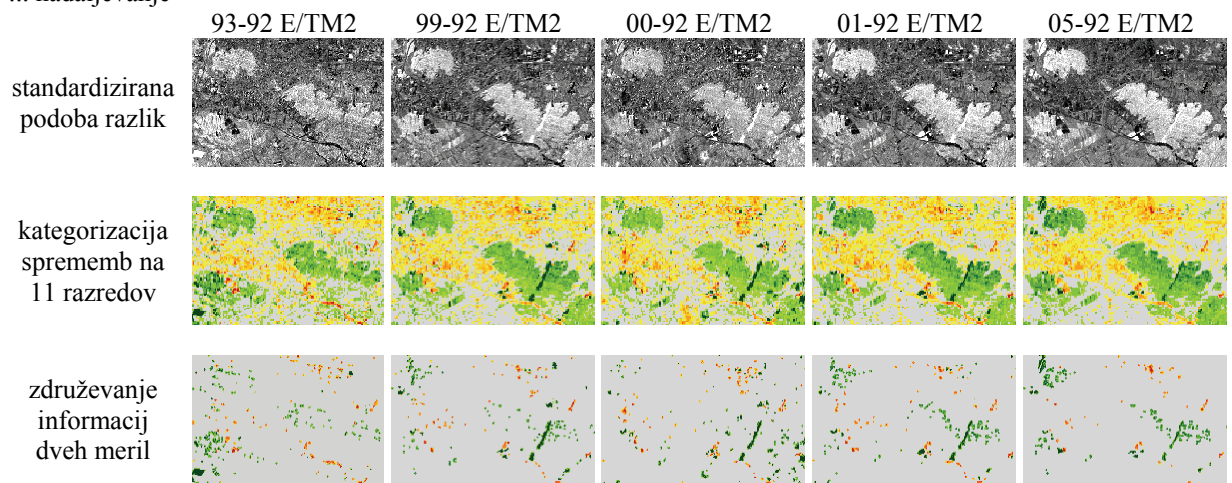
- Določimo vrednosti obravnavanih posnetkov v grobi prostorski ločljivosti (npr. 90 x 90 m). To lahko izračunamo na podlagi izračuna srednje vrednosti pikslov na osnovi izbranega sosedstva (s premikajočim jedrom določimo velikost zelenega sosedstva, tj. 3 x 3 piksle za izbrano grobo merilo).
- Izračunamo podobe razlik časovne vrste v grobi prostorski ločljivosti (90 x 90 m) ter stopnje in smeri razlik kategoriziramo na razrede (uporabila sem postopek opisan v poglavju 5.5.1, preglednica 12 spodaj).
- Na osnovi podobe razlik v grobem merilu pripravimo masko območij, kjer so prisotne večje pozitivne in negativne spremembe (tj. spremembe določene na podlagi lastnosti sosedstva). S preizkušanjem sem kot primerno ločnico k zastavljenim ciljem odpravljanja šuma majhnih prostorskih razsežnosti prepoznala razrede 1, 2 za negativne spremembe ter 10 in 11 (glej preglednica 12 spodaj) za pozitivne spremembe.
- Izračunamo podobe razlik (določimo spremembe) za časovno vrsto v izvorni prostorski ločljivosti (30 x 30 m), stopnje in smeri razlik kategoriziramo na

razrede, nato pa podobe razlik obrežemo le z območji večjih sprememb, ki smo jih dobili v grobem merilu (lahko vzamemo tudi izbrano manjšo okolico teh območij).

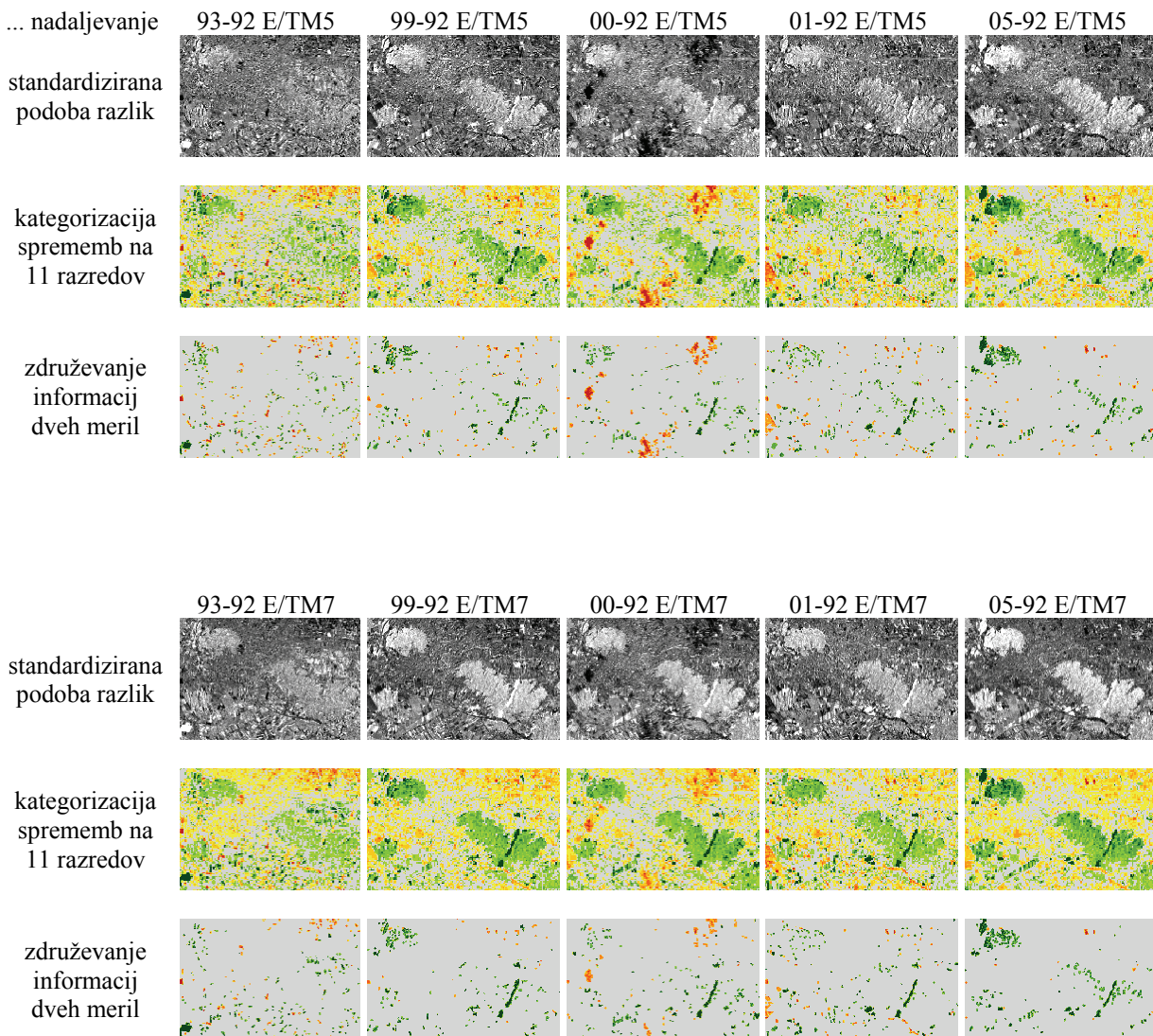
Z namenom preveriti ali opisan postopek daje rezultate, na katerih je mogoče spremembe tudi kvantitativno ovrednotiti, sem analizo izpeljala na manjšem območju, s podatki o odboju površja za poletje, na izseku Ljubljane. Rezultate po posameznih spektralnih kanalih (posamezni sklopi) prikazuje slika 48. Na vrhu so prikazani kompoziti izsekov posnetkov v barvni kombinaciji kanalov E/TM 321. Sledi prvi sklop, tj. analiza v spektralnem območju E/TM 1. Zgoraj so prikazane standardizirane podobe razlik med dvema datumoma. Zelo svetli (beli) toni kažejo na večji prirastek v odboju, zelo temni (črni) pa na večje pomanjšanje vrednosti v odboju. Sivi toni predstavljajo območja z majhnimi spremembami ali brez sprememb. Sledijo kategorizirane podobe razlik v grobem merilu, zeleni toni prikazujejo pozitivne spremembe, rumeno-rdeči pa negativne. Temnejše barve zastopajo večje jakosti sprememb. Nato so prikazane tematske karte sprememb, ki jih dobimo z združevanjem informacij v dveh merilih. Spodaj so zgolj za ilustracijo nanizani grafi, ki prikazujejo kakšen delež sprememb (v hektarih) je analiza zaznala v posameznih razredih rabe tal glede na stanje rabe tal leta 1992 (Oštir et al., 2000). Nato se na enak način ponovijo sklopi ostalih (E/TM 2–5, 7) spektralnih kanalov. Kvantitativno oceno deleža sprememb v posameznih razredih rabe tal (glede na stanje leta 1992) obravnavam z različnih vidikov še kasneje (poglavje 5.7.2.1.3). Na tem mestu pa le shematično: prvi stolpec je urbano in gosto pozidano, drugi stolpec je redko pozidano, tretji stolpec je gozd in grmičevje, četrti stolpec so kmetijske površine in peti stolpec je razred odrpto. Rdeča barva zastopa negativne spremembe (zmanjšanje odbojnih vrednosti), zelena pa pozitivne spremembe (povečanje odbojnih vrednosti).



... nadaljevanje



se nadaljuje...



Slika 48: Rezultati analize sprememb časovne vrste z večstopenjskim ali večločljivostnim pristopom določanja sprememb na izseku Ljubljane z okolico.

Figure 48: Change detection time series results with multi-scale approach for the subset of Ljubljana area.

5.7.2.1.1 Učinkovitost odpravljanja šuma

Pokazalo se je, da z večločljivostnim postopkom lahko odpravimo dobršen del šuma na podobah razlik, predvsem tistega, ki izhaja iz manjše lokalne variabilnosti med posnetki. Slabša globalna primerljivost med posnetki, ki se npr. kaže tako, da ima en posnetek v povprečju višje odbojne vrednosti v urbanih predelih kot drugi, pa je za postopke določanja sprememb na podlagi razlikovanja podob (uporabljeni operator za določanje sprememb je relativna sprememba, mera za določanje kategorij sprememb pa standardni odklon od sredine) še vedno neodpravljen problem. Vendar ugotavljam, da je z uporabo večločljivostnega pristopa na manjših območjih in pri opazovanju samo večjih in značilnih sprememb (pretvorb) vpliv tovrstne slabše globalne primerljivosti že praktično zanemarljiv.

5.7.2.1.2 Vizualna ocena ter interpretacija identificiranih sprememb

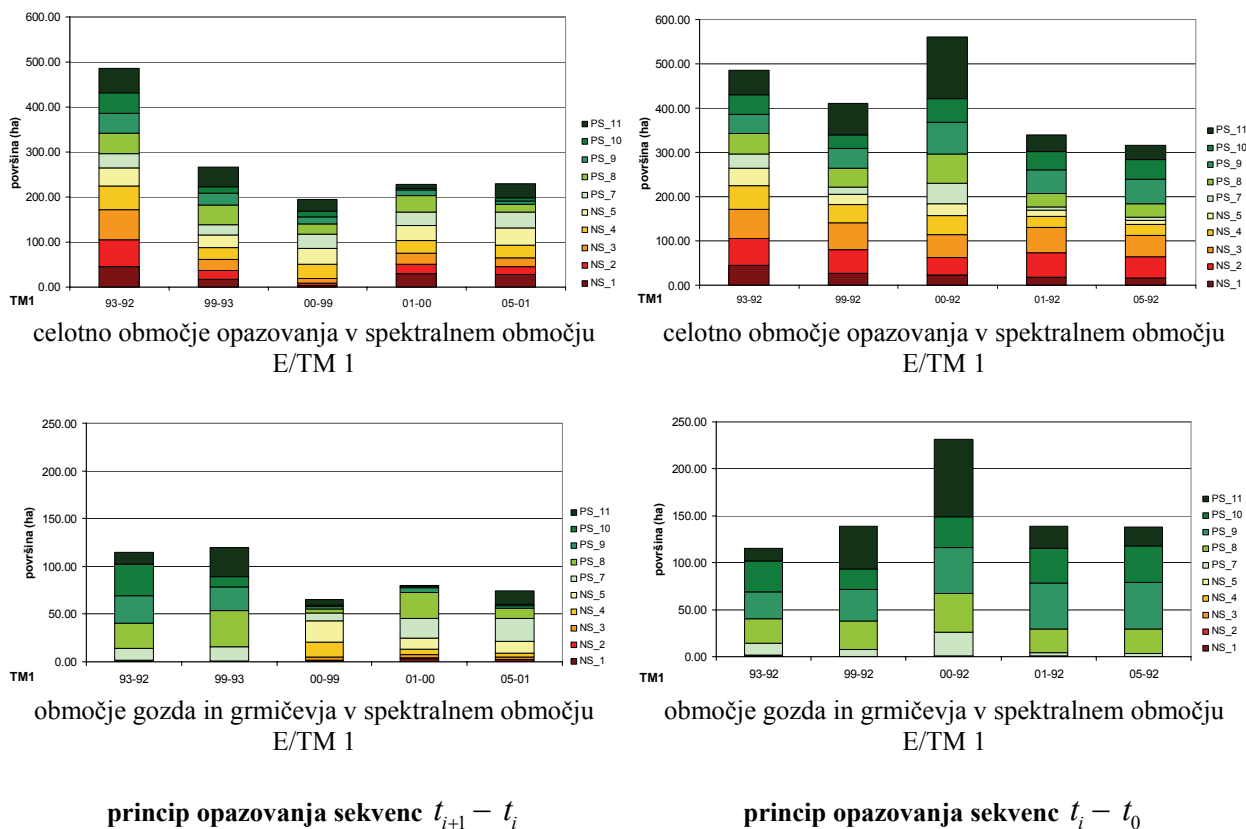
Svojo pravo uporabnost rezultati časovnih analiz dobijo šele, ko jih primerjamo z lokacijami interesnih območij za dani predmet opazovanja. Vizualen pregled zaznanih sprememb (slika 48) pokaže, da z uporabljenim postopkom lahko identificiramo vse pomembnejše spremembe. Na sekvencah 1999, 2000, 2001 in 2005 se lepo vidi izgradnja avtocestne obvoznice pri Malencah (prečka Golovec), kjer je stičišče južne in vzhodne obvoznice ter dolenskega avtocestnega kraka. Začetek gradnje tega dela obvoznice sega v leto 1995, prometu pa je bila obvoznica predana leta 1999 (DARS, 2006). Ta sprememba se kaže kot znatno povečane odbojne vrednosti na območju zelene površine (gozda), pri čemer je sprememba pozitivnega predznaka, saj imajo grajeni objekti večje vrednosti odboja kot pa zelene površine. Nekoliko manj izrazita je ta sprememba na sekvenci 2005-1992, kar je verjetno posledica zaraščanja (ozelenitve) neposredne bližine obvoznice. Analiza je zaznala posamezne odseke Ljubljanske obvoznice tudi drugod, vendar so ti manj izraziti predvsem zaradi umeščenosti v bolj urbanizirane predele, zato so tudi zaznane spremembe manj izrazite in bolj nepovezane. Na drugi strani se je pokazalo tudi, da pristop dobro (tj. vsestransko skladno in koherentno ter upošteva lastnosti posameznih spektralnih kanalov) zaznava tudi manjša območja sprememb v urbanih predelih, in sicer predvsem tistih, kjer se je zgodila pozidava na račun zelenih površin ali pa je prišlo do večje razlike v odboju že izgrajenih površin. Te spremembe so vidne kot majhna rdeča polja v pretežno urbaniziranih območjih in jih zlahka podrobneje opredelimo s primerjavo virov – npr. posnetkov iz obeh primerjanih datumov. Dobršen del zaznanih sprememb (pozitivnih in negativnih) odpade tudi na spremembe v kmetijskih površinah. Kar je z vidika razvoja in spremenljivosti poljščin na poljih precej naraven in pričakovani rezultat. Glede na vzorec ali geometrično obliko, ki jo zavzemajo slednje, si lahko pojasnimo tudi ali gre za različne faze oziroma vrste poljščin na poljih ali je prišlo, na primer, do spremembe namembnosti površin.

Na splošno lahko zaključimo, da predlagani večločljivostni postopek ustrezno zaznava izrazitejšje spremembe na površju tako večjih kot manjših prostorskih razsežnosti ter da zaradi združevanja informacij o spremembah v dveh različnih merilih uspešno omeji tudi velik delež navideznih oziroma nepravilnih sprememb. Zato lahko opravimo tudi kvantitativne analize, s katerimi lahko med drugim opišemo trend večjih sprememb v opazovanem obdobju in prostoru.

5.7.2.1.3 Kvantitativno ovrednotenje sprememb

Z vidika kvantitativnega ovrednotenja sprememb se zaradi v poglavju 5.7.2.1.1 opisanih globalnih neuskkljenosti med podatki pokaže, da je ocena trajektorije sprememb na podlagi primerjave medsebojno časovno zaporednih parov posnetkov, tj. princip opazovanja sekvenc $t_{i+1} - t_i$, pri čemer t_i predstavlja datum posnetka, lahko tudi precej nezanesljiva, predvsem pa je na njeni osnovi težje izluščiti globalni trend skozi čas. Zavedati se je treba, da en vmesni posnetek, na katerem je ali več šuma ali je slabše globalno usklajen, »prizadene« rezultate vsaj dveh sekvenc, s tem pa povzroči tudi prenos precenjenih ali podcenjenih sprememb. Ustrežnejšo shemo, ki se izogne takšnemu prenašanju slabe primerljivosti v časovni vrsti posnetkov, dobimo, če trajektorijo opazujemo po principu $t_i - t_0$, kjer je t_0 izhodiščni posnetek opazovanja (npr. najzgodnejši datum) na katerega primerjamo vse ostale posnetke, ostala stanja površja. Tudi v takšnem zaporedju lahko opazujemo tako globalni trend

prirastkov in primanjkljajev kot spremembe med zaporednima sekvencama (za primerjavo glej sliko 49). Takšen kumulativen princip opazovanja sekvenc je zaradi naštetih izhodišč prednosten (prikazan je tudi na sliki 48).



Slika 49: Prikaz rezultatov določanja sprememb z uporabo večločljivostnega pristopa v dveh načinih oblikovanja časovnega zaporedja primerjav sekvenc (na izseku Ljubljane, podatki o odbojnih vrednostih E/TM 1, poletni letni čas).

Figure 49: Comparison of change detection results based on multiscale approach with regard to two approaches of temporal observations (Ljubljana subset, E/TM 1 reflectance time series data, summer season).

Vseeno pa si najprej pogledjmo rezultate za en in drug način časovnega opazovanja. Slika 49 prikazuje relativne primerjave med časovno zaporednimi sekvencami (levo) ter kumulativne primerjave glede na izhodiščno stanje (desno), na podatkih časovne vrste izseka Ljubljane, odbojne vrednosti v spektralnem območju E/TM 1, poletni letni čas. Zgoraj je prikazana struktura razredov identificiranih sprememb (v ha površine) za celotno območje, spodaj pa struktura razredov identificiranih sprememb samo na območju gozda in grmičevja (na osnovi stanja leta 1992). Uporabljena kategorizacija sprememb sloni na opredelitvah podanih v preglednici 12 spodaj. Razred 6 (tj. razred ki opredeljuje površine brez sprememb) je namenoma izpuščen, saj praviloma zaseda nad 90 % površine in bi zasenčil vso diferenciacijo ostalih desetih razredov.

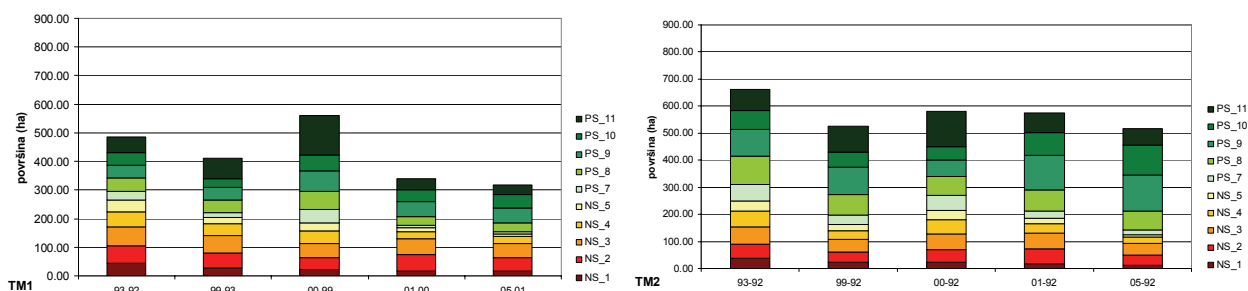
Vpliv slabše globalne primerljivosti je na manjšem območju opazovanja seveda prisoten v manjši meri. Ne glede na to, imata oba načina časovne primerjave določene prednosti in slabosti. Primerjava na izhodiščni posnetek bolj neposredno odraža trend sprememb tekom časa, še sploh pa, če je časovna skala neenakomerna. Primerjava in nizanje opazovanja po dveh zaporednih datumih pa omogoča vpogled v bolj detajlno shemo sprememb znotraj posameznih časovnih obdobij. Slednje lepo ponazarjajo primeri sekvenc 00-99, 01-00 in 05-01 v primerjavi s sekvencami 00-92, 01-92 in 05-92 na podatkih območja gozda in grmičevja. Opazimo lahko preskok zaradi izgradnje obvoznice na območju Golovca (porast v razredu največjih pozitivnih sprememb v sekvencah 99-93 in 99-92), nato pa v primeru zaporednega opazovanja precejšen delež bolj majhnih sprememb na sekvencah 00-99, 01-00 in 05-01, medtem ko primerjava na izhodiščno stanje leta 1992 kaže približno enaka razmerja (sekvence 99-92, 01-92 in 05-92). Razmeroma veliki deleži sprememb v obdobju opazovanja 93-92 pa so zelo verjetno posledica slabše globalne usklajenosti med posnetkoma.

Izbira časovne sheme opazovanja je torej odvisna od namena raziskave in stopnje medsebojne usklajenosti podatkov. Kot bo videti v nadaljevanju, je način primerjave stanj na izbrano referenčno stanje lahko koristno tudi v primeru, ko spremembe vrednotimo glede na druge podatke (npr. na razpoložljivo rabo tal / pokrovnost, kot je bila leta 1992).

Slaba stran opazovanja odbojnih vrednosti površja je, da dobimo skupen seštevek pozitivnih ali negativnih sprememb, ki se nanašajo na različne procese in različne predmete v prostoru. Zato je dobljene rezultate večločljivostnega postopka določanja sprememb na podatkih odbojnih vrednosti z vidika kvantitativnih izračunov smiselno ovrednotiti na različne načine. Za ilustracijo si pogledjmo nekaj takšnih primerov, in sicer tako z vidika trajektorije sprememb v časovni vrsti kot z vidika posamezne sekvence in posameznih spektralnih kanalov.

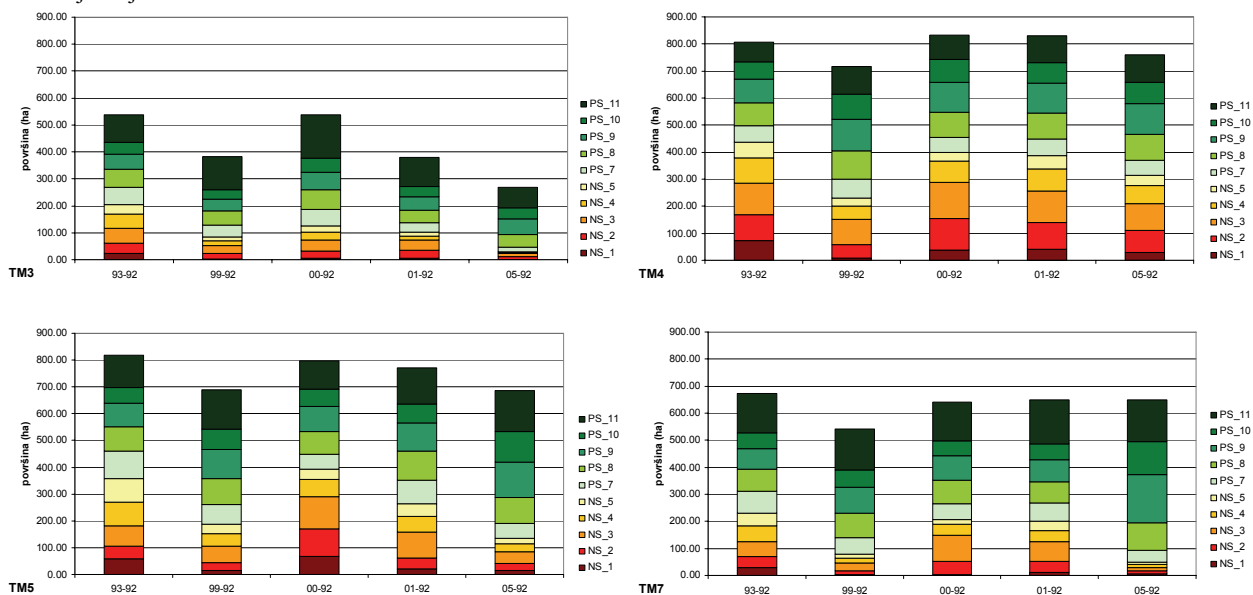
Deleži različnih razredov sprememb v časovni vrsti

Najbolj splošen podatek o primerljivosti sekvenc nam podajo razmerja med posameznimi kategorijami ali stopnjami sprememb. Slika 50 prikazuje površine (v ha) zastopanosti vseh enajstih razredov sprememb (preglednica 12 spodaj) na obravnavanem območju (razred ki opredeljuje površine brez sprememb – 6 je izpuščen). To je pravzaprav statistika slojev združevanja informacij dveh meril oziroma kart sprememb iz slike 48 po spektralnih kanalih.



se nadaljuje...

... nadaljevanje



Slika 50: Statistika površin (v ha) prehodov sprememb v obravnavani časovni vrsti izsekov posnetkov (na izseku Ljubljane, podatki o odbojnih vrednostih, poletni letni čas).

Figure 50: Statistics of change transitions areas (in ha) for imagery subset time series (Ljubljana subset, reflectance time series data, summer season).

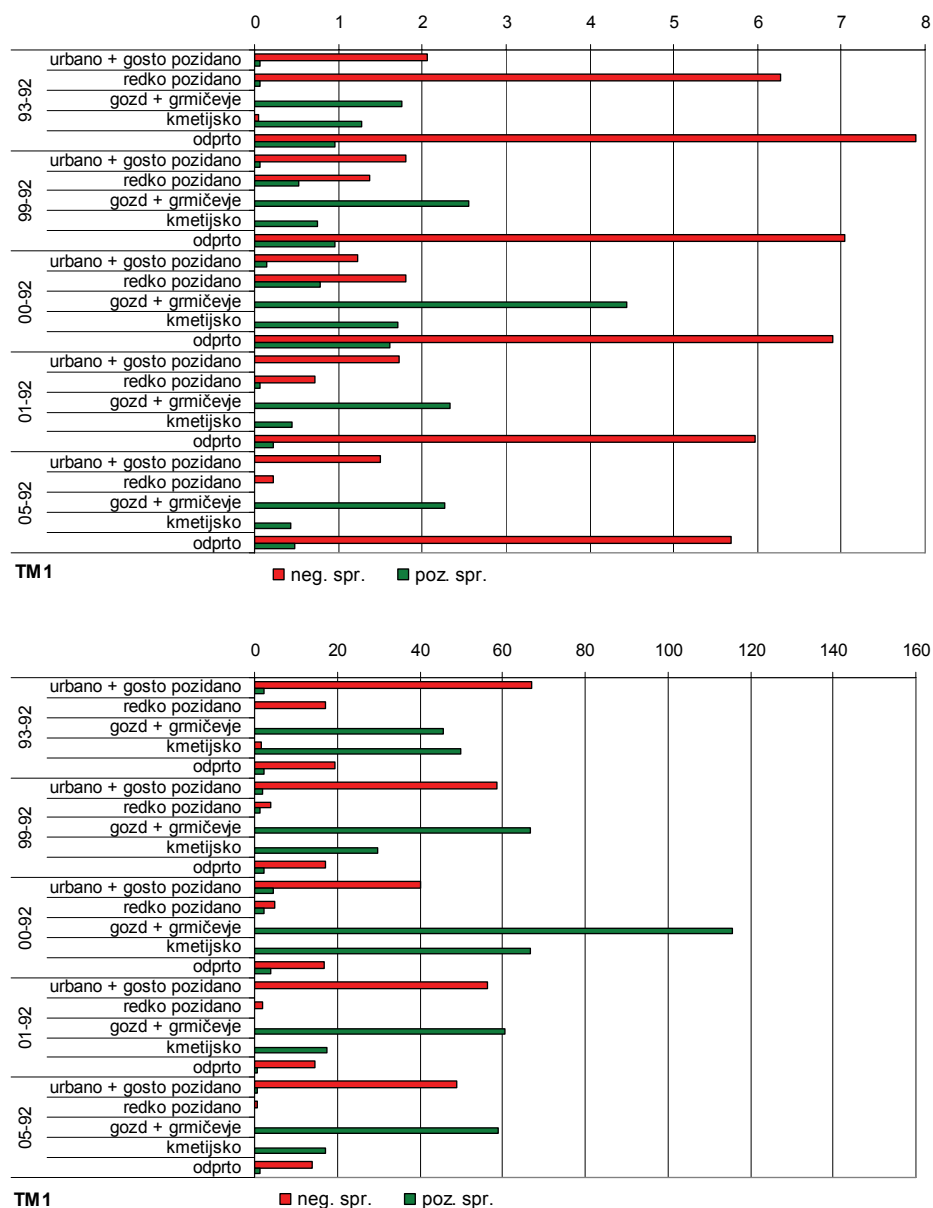
Deleži sprememb v posameznih razredih rabe tal / pokrovnosti (v relativnem deležu površine, ha površine)

V primerjavi s splošno shemo gibanja sprememb je gotovo bolj sporočilen in predstavlja podatek o tem, za kakšen odstotek so se znatno spremenile lastnosti površja v posamezni kategoriji rabe tal / pokrovnosti oziroma kakšno površino v naravi so zajele opazovane spremembe.

Slika 51 ilustrira oba ta primera, in sicer na podatkih spektralnega kanala E/TM 1. Zgornji graf prikazuje odstotek večjih pozitivnih sprememb ter večjih negativnih sprememb v razmerju glede na površino, ki jo posamezna raba tal na opazovanem območju zavzema. Spodnji graf na podoben način prikazuje to razmerje, le da so podane posamezne površine sprememb v hektarih, torej kakšne so približne prostorske razsežnosti identificiranih skupin sprememb v naravi.

Na podlagi opazovanja celotne časovne vrste lahko zaključimo, da je *delež* večjih sprememb razmeroma majhen (med 0 in 8 % glede na posamezno rabo tal), da je mogoče zaznati največji relativni delež sprememb v razredu odprto (med 6 in 8 %) in da so te spremembe negativnega predznaka. Zmanjšanje odboja za razred odprto oziroma gola tla, ki ima razmeroma visok odboj, pomeni, da se lahko zarašča ali pa je bolj podvržen spremenljivosti v odboju. Drugi izstopajoči trend lahko prepoznamo v razredu zelenih površin (gozd in grmičevje), kjer so opazne predvsem pozitivne spremembe. Nastopi velik prirastek v odboju sicer razmeroma nizkih odbojnih vrednosti gozda v vidnem delu spektra, torej gre za izgubo zelenih površin. Pri tem dajejo sekvence 99-92, 01-92 in 05-92 približno podobne rezultate,

sekvenca 00-92 pa nekolike precenjene. Slednje je posledica manjše meglice, ki povzroča rahel dvig zaznanih odbojnih vrednosti in s tem ustvarja navidezne spremembe.



Slika 51: Časovne vrste: Delež identificiranih pozitivnih in negativnih sprememb v spektralnem kanalu E/TM 1 glede na razrede rabe tal. Zgoraj: kot odstotek glede na posamezno rabo tal, spodaj: kot površina (v ha).

Figure 51: Time series: Positive and negative changes portions with regard to land use / cover in area observed, as identified in spectral band E/TM 1. Above: as a % change in specific land use class and below: as a surface area (in ha).

Z vidika opazovanja površin skupin sprememb pa razberemo, da so spremembe v odprtem razmeroma majhnih prostorskih razsežnosti (med 15 in 20 ha na celotnem območju) ter da s časom rahlo upadajo. Iz grafa bi lahko sklepali tudi, da se je razmeroma veliko površine spreminjalo v urbanih predelih (med 40 in 70 ha), vendar je takšna ocena prenačljiva, saj je

odboj izgrajenih površin precej spremenljive narave (zato so prisotne tudi nekatere navidezne spremembe). Bolj skladno sled sprememb, kaže, da podaja razred zelenih površin. Trajektorija sprememb v tem razredu rabe tal je vidno obremenjena z izgradnjo obvoznice, opazimo lahko preskok pri sekvenci 99-92, nato pa razmeroma nespremenljiva stanja do konca časovne vrste. Sekvence 99-92, 01-92 in 05-92 nakazujejo na spremembo površine približno 60 ha. Če za ilustracijo predpostavimo zelo približen račun, da je obvoznica na območju Golovca »obremenila« gozdne površine za 100 m po širini ter približno 2500 m po dolžini, bi skupna površina nanesele okoli 25 ha. Izmerjene spremembe v modrem kanalu kažejo, da je spremenjene površine okoli 30 ha. Ta manjši presežek je lahko posledica mešanega signala ali večje prisotnosti prahu v robnih pikslih, ki predstavljajo obvoznico, zaradi česar se obvoznica (in zaznana sprememba) zdi širša. Četudi je račun res zgolj približen, pa nazorno pokaže, da približno polovica vseh sprememb v razredu gozda in grmičevja odpade na izgradnjo obvoznice.

Ovrednotena razmerja (relativni delež v posameznem razredu rabe tal / pokrovnosti ter površine skupin sprememb), kot jih podajajo ostali spektralni kanali, so podana v Prilogi D.

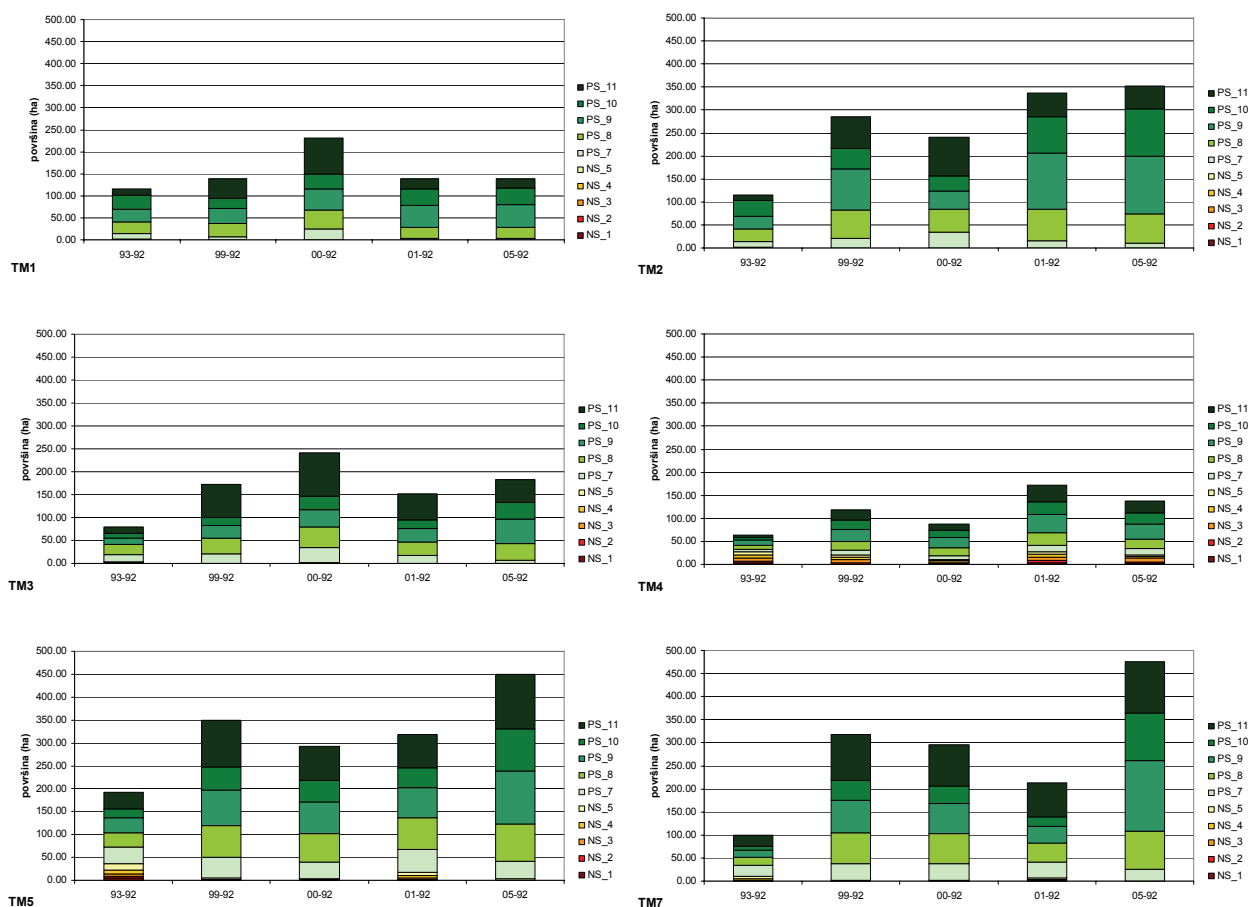
Opazovanje sprememb v izbranem razredu rabe tal / pokrovnosti, po spektralnih kanalih

Različni spektralni kanali na različne načine podajajo informacije o lastnostih površja. Zato velja pri opazovanju prav določenega predmeta ali tipa površja vselej izbrati tiste spektralne kanale, ki najbolj zaznavajo in ločujejo spremembe izbranega opazovanja. Slika 52 podaja informacije o spremembah po posameznih spektralnih kanalih za primer opazovanih zelenih površin (gozda in grmičevja). Prikazana je strukturna shema (kot površina v ha) vseh razredov sprememb (vsak stolpec prikazuje zavzetje sprememb v enajstih razredih (preglednica 12 spodaj), razred brez sprememb – 6, znova ni prikazan, saj bi sicer težko razlikovali ostale razrede), in sicer zaporedno po opazovanih časovnih sekvencah (stolpci od leve proti desni).

Pokaže se, da vidni kanali (E/TM 1–3), podajajo precej sorodno globalno shemo trenda pozitivnih sprememb v zelenih površinah, ki sem jo obravnavala že v predhodnem podpoglavju. Z vidika izraženih površin sprememb (večja prostorska zastopanost sprememb v vseh razredih pozitivnih sprememb) ter posebnosti sekvence 00-92 (prisotna meglica) nekoliko izstopa zeleni kanal E/TM 2. Kar lahko pojasnimo kot posledico večje diferenciacije odboja v zelenem spektralnem območju pri opazovanju zelenih površin (ta kanal namreč razlikuje tudi različne skupine vegetacije).

Infra rdeči del spektra na različne načine upošteva tudi vlažnost v prsti in vegetaciji, zato so tudi rezultati v kanalih E/TM 4–5 in 7 različni med seboj, razlikujejo pa se tudi od rezultatov vidnega dela spektra (v IR spektru je npr. zastopan tudi večji del negativnih sprememb v odboju). Zanimivo je, da IR kanal 4, ki izraža količino in zdravost biomase, izgradnjo obvoznice, torej prisotnost izgrajenega objekta (glej tudi sliko 48), najslabše zaznava (pričakovali bi lahko višji delež negativnih sprememb na račun sečnje).

Na podlagi opazovanj po posameznih kanalih lahko torej povzamemo, da so z vidika zanesljivosti in komplementarnosti zaznave izgrajenih objektov v zelenih površinah res bolj primerni vidni kanali kot IR kanali. Takšna ugotovitev je tudi povsem skladna s preglednico 6, ki podaja značilnosti spektralnih kanalov senzorjev Landsat.



Slika 52: Zaznavanje prehodov sprememb na območju gozdnih in z grmičevjem poraslih površin, po spektralnih kanalih (na izseku Ljubljane, odbojne vrednosti, poletni letni čas).

Figure 52: Detected transitions of changes in areas covered with forest and shrub with regard to spectral bands (Ljubljana subset, reflectance time series data, summer season).

Sklep

Večočljevostni pristop določanja sprememb je ustrezna rešitev problemov zaradi šuma ali nepopolne lokalne usklajenosti med podatki različnih datumov. Prednost predlaganega pristopa je v tem, da združuje informacije o spremembah v dveh prostorskih merilih po načelu prostorske povezanosti bližnje okolice, s čimer omogoča tudi poljubno stopnjo odstranitve šuma. Omejitve pristopa je v tem, da se z močnejšim odstranjevanjem šuma usmerjamo k opazovanju bolj izrazitih sprememb. Za analizo vsestranskih sprememb je to dobrodošlo, pri predmetno ali pojavno usmerjeni analizi sprememb pa bi za določitev ustrezne stopnje šuma predlagano ločnico morali opredeliti glede na namen opazovanja in lastnosti pojavov ter podatkov, ki jih v analizi sprememb uporabljamo.

Pokazalo se je tudi, da ob ustrezni obravnavi sosedstva lahko ohranimo večino pomembnih detajlov in obenem izločimo dovolj navideznih sprememb, da lahko opravljamo kvantitativne analize časovnih vrst. Pristop omogoča razumno interpretacijo rezultatov, tako vizualnega ovrednotenja (karte sprememb) kot kvantitativnih primerjav, še posebej, če rezultate obravnavamo povezano in z različnih zornih kotov.

5.7.2.2 Določanje sprememb na osnovi korelacije sosedstev

Ker večstopenjski pristop še vedno izhaja iz ocene relativne spremembe stanj, ta pa je občutljiva na slabšo globalno in lokalno primerljivost, sem preverila učinkovitost korelacije kot mere ali operatorja za določanje sprememb. Korelacija pove v kakšni medsebojni povezanosti sta dva pojava (moč linearne povezanosti). Ocenjujemo jo na podlagi koeficienta korelacije r , ki izraža stopnjo in način povezanosti med dvema spremenljivkama ter koeficienta determinacije r^2 , ki pove kolikšen del variance ene spremenljivke lahko pojasnimo z variiranjem druge. Predpostavka torej je, da če ni visoke stopnje povezanosti med dvema pojavoma (v primeru analize sprememb med dvema prostorsko istoležnima sosedstvoma v dveh datumih), potem je zelo verjetno prišlo do spremembe, in obratno.

Če so spektralne spremembe med dvema prostorsko istoležnima, a časovno različnima sosedstvoma znatne oziroma značilne, bo koeficient korelacije zavzel vrednosti blizu nič. Ker pa je korelacija mera linearne povezanosti, nam visok koeficient korelacije (npr. $r \geq 0.8$) vselej ne zagotavlja tudi tega, da spremembe ni bilo. V pomoč pri ugotavljanju ali je do spremembe prišlo ali ne lahko služita koeficienta regresijske premice, ki ju določamo na osnovi vrednosti med primerjanima sosedstvoma (Im in Jensen, 2005). Velikost in smer koeficientov naklona in presečišča sta namreč odvisni od magnitude in smeri spektralnih sprememb. V idealnem primeru bi v situaciji, ko med dvema opazovanima sosedstvoma ni prišlo do sprememb, v dvorazsežnem prostoru izrisa razpršenosti svetlostnih vrednosti dveh datumov, te bile nanizane tesno ob premici $y = x$. In obratno, v primeru ko se je zgodila sprememba, bi bile te vrednosti od premice znatno odklonjene. Kadar je naklon blizu vrednosti 1 in presečišče blizu izhodišča 0, do spremembe ni prišlo.

Pri tem uporabimo naslednje enačbe (Im in Jensen, 2005):

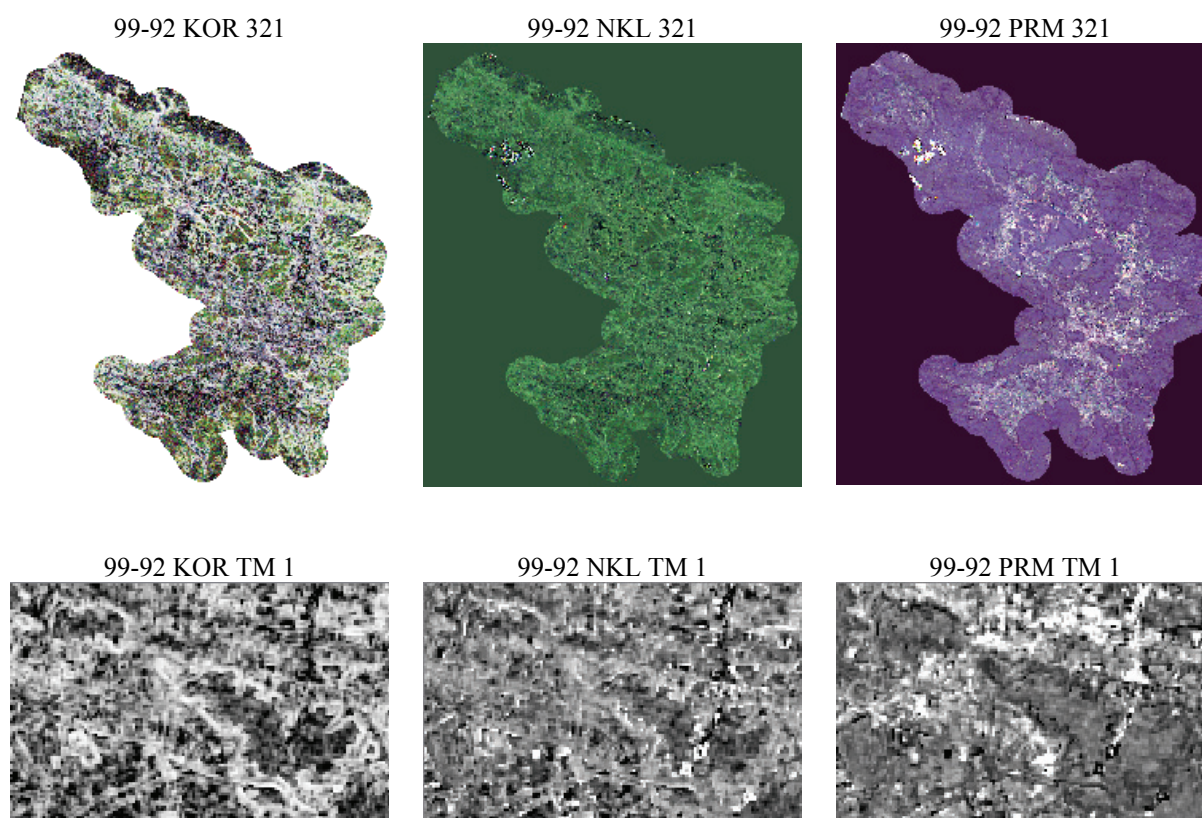
$$\begin{aligned} \text{kovarianca} = \text{kov}_{12} &= \frac{\sum_{i=1}^n (DN_{i1} - \mu_1) \cdot (DN_{i2} - \mu_2)}{n-1}, \\ \text{koef. korelacije} = r &= \frac{\text{kov}_{12}}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}, \\ \text{naklon} = a &= \frac{\text{cov}_{12}}{\sigma_1^2}, \\ \text{presečišče} = b &= \frac{\sum_{i=1}^n DN_{i2} - a \sum_{i=1}^n DN_{i1}}{n}. \end{aligned} \tag{39}$$

Kjer je n število elementov zajetih v sosedstvo, DN_{i1} oziroma DN_{i2} svetlostna vrednost piksla v času 1 oziroma 2, μ srednja vrednost sosedstva v času 1 oziroma 2 ter σ standardni odklon sosedstva v času 1 oziroma 2. Postopek je naslednji.

- Izberemo velikost in obliko sosedstva (3 x 3, 5 x 5, kvadratno okno ali krožno).
- Za vsak par primerjanih sosedstev dveh datumov s pomočjo premičnega okna izračunamo parametre sosedstva: sredino, standardni odklon, kovarianco, koeficient korelacije ter naklon in presečišče regresijske premice.

- Kot rezultat dobimo tri podatke: podobo korelacije, podobo naklona in podobo presečišča vseh obravnavanih sosedstev na izbranem območju.
- Izločimo območja z nizko stopnjo povezanosti (koeficient korelacije blizu 0) ter s pomočjo parametrov naklona in presečišča upoštevamo dodatni kriterij za ločevanje sprememb od nesprememb pri večjih vrednostih koeficienta korelacije.

Postopek sem izvedla na velikosti sosedstva 3 x 3 in 5 x 5, tj. 90 in 150 m ločljivosti (kvadratno premično okno), na območju Ljubljana–Kranj z okolico, in sicer na podatkih odbojnih vrednosti za primerjano obdobje 99-92, poletni letni čas. Rezultati niso izpolnili pričakovanih ciljev (slika 53).



Slika 53: Določanje sprememb na osnovi korelacije sosedstev 3 x 3. Zgoraj levo podoba korelacij sosedstev za kanale 321, na sredini podoba naklonov 321 in desno podoba premikov 321. Spodaj podoba korelacij sosedstev za kanal 1, na sredini podoba naklonov 1 in desno podoba premikov 1, na izseku območja Ljubljana.

Figure 53: Change detection based on 3 x 3 neighbourhood correlation approach.

Pokazalo se je naslednje:

- Informacija o spremembah, kot jo kaže koeficient korelacije, je precej razdrobljena, zdi se, kot da je prisotnega veliko šuma. Ugotovitev (kot tudi vse nadaljne) velja tako za korelacijo sosedstva na premičnem oknu velikosti 3 x 3 kot tudi 5 x 5.

- Podatek o korelaciji sosedstev je precej podvržen vplivu standardnega odklona v sosedstvih, kar se vidi tako, da so robovi ob homogenih površinah pretirano poudarjeni (visok koeficient korelacije). Še posebej pa je ta slabost prisotna v vidnih kanalih.
- Vidni kanali tudi očitno slabše razlikujejo območja sprememb in nesprememb kot infrardeči spektralni kanali (izgradnje obvoznice na območju Golovca, na primer, skoraj ne zaznavajo, slika 53 levo spodaj).
- Razmejitev sprememb in nesprememb z uporabo mejne vrednosti koeficienta korelacije in dodatnih kriterijev (naklona in presečišča) ni enoznačna za opazovanje vsestranskih sprememb, saj moramo opredeliti skupne optimalne mejne vrednosti (interval) za vse tri koeficiente in za različne situacije lastnosti površja. Dodaten problem povzročajo tudi porazdelitve vrednosti teh spremenljivk. Histograma naklonov in presečišč imata približno normalno obliko porazdelitve, vendar vrh (sredina) praviloma ne sovпада z 0 (nista simetrična okoli ničle). Histogram koeficienta korelacije pa ni normalno porazdeljen in ni simetričen okoli sredine, večina vrednosti je pozitivnega predznaka.
- Tudi s tovrstno kategorizacijo podatkov ne prečistimo do te mere, da bi dobili v rezultatih presežek v primerjavi z ostalimi pristopi določanja sprememb.

Korelacija kot mera za identifikacijo sprememb se več kot očitno ni pokazala za primerno za analize sprememb posnetkov srednje prostorske ločljivosti. Ne velja pa pristopa povsem zavreči za druge aplikacije, na primer, kot pripomoček v klasifikaciji satelitskih posnetkov ali morda za analize sprememb posnetkov visoke prostorske ločljivosti.

5.8 Diskusija

Časovne analize so analize opazovanj oziroma meritev, ki so bile izvedene v nekem časovnem razporedu. Če primerjamo stanje v dveh časovnih trenutkih, časovno analizo imenujemo tudi analiza sprememb. Takšno analizo, kjer primerjamo več stanj v več časovnih trenutkih, imenujemo analiza časovne vrste. V časovnem smislu urejen niz podatkov torej imenujemo časovna vrsta. Cilji analize časovne vrste so ugotoviti:

- ali je v opazovanem pojavu mogoče zaznati trend in kakšen ta trend je (linearna, eksponentna rast, upadanje ali rast z določeno diskontinuiteto),
- in/ali je ob tem prisotna tudi kakšna periodična komponenta (kratkorodne korelacije),
- in/ali so v opazovanjih prisotni značilnejši, pričakovani ali nepričakovani odkloni, oziroma ostre spremembe v obnašanju, ekstremi ter ob tem
- identificirati in karakterizirati spremembe ter jih tudi kvantitativno opisati.

Ločimo diskretne časovne vrste in zvezne časovne vrste. V diskretnih časovnih vrstah so opazovanja predstavljena (merjena) kot diskreten niz podatkov v poljubnih (enakomerno ali neenakomerno razporejenih) časovnih intervalih. Zvezne časovne vrste pa so tiste, kjer so podatki pridobljeni zvezno (tudi enakomerno) čez celoten časovni interval. Način, predvsem pa pogostost zbranih podatkov o površju Zemlje s satelitskimi sistemi opredeljuje tip časovne vrste v dani časovni analizi. Pri opazovanju površja s posnetki Landsat imamo torej opraviti z diskretno časovno vrsto.

Daljinsko zaznani podatki so neprecenljiv vir informacij. Da bi jih zares razumeli in znali pravilno uporabiti ali na njihovi osnovi sklepati o lastnostih površja, moramo spoznati njihovo obnašanje v različnih okoliščinah zajema in njihove spremembe po različnih obdelavah. Še prav posebej pride to do izraza pri uporabi daljinsko zaznanih podatkov v časovnih analizah. Osnovna zahteva in pogoj za relevantnost časovnih analiz je, da analiziramo primerljive podatke. Podobno kot ne moremo sešteti pet pomaranč in dveh limon v sedem pomaranč-limon, ker tovrstne združljivosti med sadežoma ni, tudi ne moremo primerjati površja na več satelitskih posnetkih, če lastnosti niso izražene na enak način, v enakem merilu, v enakih enotah na vseh posnetkih. Ta osnovni pogoj si skušamo zagotoviti preko postopka priprave podatkov (satelitskih posnetkov).

Tu nastopi manjši paradoks časovnih analiz na daljinsko zaznanih podatkih. Splošna paradigma pri analizi sprememb na podatkih satelitskih posnetkov namreč je, da z vsaj nekaj pomembnejšimi predobdelavami posnetkov že prestopimo prag do te mere, da smo v območju primerljivosti. Toda kako visoko primerljivost v resnici potrebujemo za časovne analize?

O predobdelavi satelitskih posnetkov

Predobdelava satelitskih posnetkov odpravlja razlike med posnetki in stremi k medsebojnemu usklajevanju podatkov. Vendar na podlagi raziskave, ki sem jo opravila in je podana v poglavju 5, ugotavljam, da vsak postopek, ki ga pri tem opravimo (četudi koristno in učinkovito popravljata podatke in odpravlja razlike med posnetki), vnaša določene nove napake. Te lahko razdelimo na grobe napake, nesistematične spremembe lastnosti spektralnih kanalov in izgubo deleža podatkov. Zato je še kako pomembno poznati lastnosti in učinke postopkov na podatke na vsakem koraku obdelave. To pomeni tako v fazi same priprave podatkov, kot tudi v fazi časovnih analiz (določanja in analize sprememb).

Prav analiza sprememb šele zares odkrije, kako dobro smo zadostili zahtevi po standardizaciji oziroma primerljivosti podatkov. Pokazalo se je, da t. i. dobra *globalna* statistika podob (npr. izenačitev srednje vrednosti primerjanih parov kanalov), ki sem jo v polni meri dosegla s pripravo podatkov, še ne zagotavlja tudi dejanske primerljivosti za postopek določitve sprememb na daljših časovnih vrstah. Če ni obenem dosežena tudi približno enaka celotna porazdelitev vrednosti, tj. enak histogram, med primerjanimi pari kanalov oziroma pari komponent. V idealnem primeru je ob globalni primerljivosti treba stremeti tudi k *lokalni* usklajenosti. Lokalno usklajenost gre tu razumeti predvsem v tem, da so posamezni pojavi ali posamezni tipi površja (npr. urbanizirani predeli, gozdne površine) v spektralnem pomenu med posnetki prav tako medsebojno čimbolj usklajeni. Problem je večstranski.

- Ključni postopki priprave podatkov praviloma prinesejo več dobrih lastnosti, a pogosto tudi kakšno slabo. Težave nastopijo, če se ta slaba lastnost nesistematično seli v podatke. Na primer: če atmosferska korekcija povzroča spremenjen (zmanjšan) razpon vrednosti na vseh posnetkih na približno enak način, ni težav, če pa se po nekem popravku zgodi, da se tu in tam kakšnemu spektralnemu kanalu drugače spremeni razpon vrednosti, kot gre na splošno pričakovati, utegnemo imeti v analizi sprememb s tem kanalom (komponento) težave.
- Splošna metodologija določanja sprememb na satelitskih posnetkih s pristopom razlikovanja podob (ki sem jo v raziskavi testirala), primerja podatke po principu piksel na piksel, in sicer z neposredno primerjavo vrednosti. Prav kombinacija uporabe takšnih aritmetičnih operatorjev, načina določitve mejnih vrednosti za

kategorizacijo sprememb in pikselno usmerjenega pristopa je, kot kaže, silno občutljiva na pogoj globalne primerljivosti in lokalne usklajenosti med podatki.

Podatke je torej načeloma smiselno sproti prečiščevati in nadzorovati doprinos nesistematičnih sprememb. Na kakšen način se napake porazdelijo v podatke pa ni enostavno oceniti. Če sam postopek povzroča veliko napak, je slab in ga ne bomo uporabili, napake bi v tem primeru tudi zlahka odkrili. Postopki, ki jih v praksi uporabljamo, povzročajo bodisi določen šum, ki je ali bolj ali manj predvidljiv bodisi grobe napake. Problem je torej v tem, da jih s hitrim pregledom podatkov, kakršna globalna opisna statistika je, težko zaznamo, vizualna analiza porazdelitve napak ter ocena njihove lokalne porazdelitve pa je precej zamudna. Identifikacija napak je vsekakor pomembna, ker jih moramo odpraviti, spremeniti ali popraviti, če želimo doseči cilj priprave podatkov – kar najvišjo primerljivost. Splošna težava pri daljinsko zaznanih podatkih je tudi ta, da (zaradi različnih tehnoloških in drugih okoliščin) praktično nikoli nimamo na razpolago ustreznih referenčnih vrednosti, na katere bi se sproti ali na koncu raziskave in priprave podatkov oprli.

V zvezi s pripravo podatkov so torej za podrobnejše raziskave odprta tri vprašanja. Prvič, kako časovno učinkovito reševati sledljivost napak oziroma sprememb lastnosti posameznih podatkov skozi posamezne korake priprave ob takšni razsežnosti podatkov, kot so časovne vrste satelitskih posnetkov? Za ilustracijo se samo spomnimo, da časovna vrsta z desetimi posnetki pomeni ob obravnavi npr. šestih spektralnih kanalov, spremljanje 60 (po vsebini precej kompleksnih) podatkov. Drugič, do kakšne mere je sploh smiselno odpravljati napake napak postopkov? Za potrebe časovnih analiz, kot se v praksi trenutno uporabljajo, bo treba ali podrobneje raziskati in na novo opredeliti učinkovitejše kriterije za prepoznavanje lastnosti daljinsko zaznanih podatkov (da bodo le ti dosegali visoko raven primerljivosti), ali poiskati ustrežnejše tehnike za določanje sprememb (ki ne bodo tako občutljive na naštetih okoliščinah). In tretjič, ali so globalni postopki priprave podatkov (kar po svoji naravi je večina v praksi uporabljenih postopkov in statističnih modelov reševanja problemov usklajevanja podatkov) res dovolj učinkoviti ali bi veljajo pozornost usmerjati v lokalne modele? Vemo, da imajo tako globalni kot lokalni postopki svoje prednosti in omejitve. Morda bi zato veljalo za začetek razmišljati vsaj v tej smeri, da bi za globalne postopke vpeljali učinkovit nadzor spremembe lastnosti popravljenih podatkov v ustreznem lokalnem merilu.

O algoritmih določanja sprememb oziroma izvedbi časovnih analiz

V zvezi s časovnimi analizami so se v prvi vrsti razprla vprašanja *metodološke* narave in v drugi vrsti vprašanja *vsebinske* narave. Poglejmo si najprej zaznamke k metodološkim oviram pri časovnih analizah.

Splošna ugotovitev opravljenih raziskav na različnih podatkih in v različnih okoliščinah je, da na podlagi primerjave stanj med posnetki vselej lahko dovolj zanesljivo prepoznamo obseg in lego *večjih sprememb* (pretvorb). To z drugimi besedami pomeni, da si s katerokoli tehniko določanja sprememb in katerimikoli podatki (identifikatorji lastnosti površja) lahko obetamo shemo t.i. rdečih con. Analiza velikih sprememb je torej navkljub težki zagotovitvi primerljivosti med podatki različnih datumov, senzorjev in okoliščin zajema praktično vselej izvedljiva. Ni pa ob tem nujno, da je identificirane spremembe mogoče tudi kvantitativno in prostorsko zanesljivo ovrednotiti. Največji problem časovnih analiz na podatkih satelitskih posnetkov je prisotnost *šuma* in posledično *navideznih* (nepravih in neželenih) *sprememb*.

Delež teh se razumljivo manjša sorazmerno z večjo primerljivostjo med podatki. V praksi pa je optimalno primerljivost s trenutno razpoložljivimi postopki pravzaprav nemogoče doseči.

Problem prisotnosti navideznih sprememb pride toliko bolj do izraza pri bolj subtilnih analizah, tj. analizah prehodov in zaznavanju tudi *manjših sprememb* (tranzicijah) ter pri analizi daljših časovnih vrst (daljšega zaporedja primerjave stanj, sekvenc), tj. analizi *trendov*.

Četudi se pri rezultatih analize prehodov in analize časovnih vrst lahko zatekamo k vizualno še sprejemljivim rezultatom, je kvantitativno podatke bistveno težje sistematično ovrednotiti in interpretirati oziroma rezultatom zaupati. Do težav pride predvsem zato, ker časovna vrsta redko in težko izpolni pogoje globalne in lokalne primerljivosti. Težave pa povzroča tudi to, da so prehodi v obstoječih tehnikah določanja sprememb praviloma določeni na predpostavki normalne porazdelitve razlik. Le če sta torej izpolnjena oba pogoja, tj. optimalna primerljivost med podatki sekvenc in normalna, okoli sredine (ničle) simetrična porazdelitev razlik (v podobi razlik), potem bo časovna analiza uspešna.

Glede na naravo sprememb v prostoru (spremembe praviloma zavzamejo majhen delež v obravnavanem prostoru in tako tudi v podatkih) drži predpostavka, da je porazdelitev razlik praviloma normalna in skoraj simetrična, a, poudarjam, le v optimalnih okoliščinah. Optimalne okoliščine v tem primeru pomenijo, da je odstranjen večinski del napak in šuma različnih virov (napake senzorja, napake postopkov predobdelave, oblaki, meglice in podobno). Upošteva tudi okoliščine zajema satelitskih posnetkov (meteorološki pogoji pred in lastnosti ozračja med snemanjem) pa so še toliko bolj redka realna predpostavka pri analizah sprememb na večjih območjih (večje območje, večje tveganje za prisotnost šuma).

Po več raziskavah na različno obdelanih podatkih, različnih indikatorjih lastnosti površja, različnih območjih in v različnih letnih časih prihajam do zaključka, da je predpostavka normalne in okoli ničle simetrične porazdelitve razlik pogosto precej tvegana. Je pa ključnega pomena, če na njeni osnovi temelji celotna kategorizacija sprememb. Če se namreč kriterij standardnega odklona uporabi na podatkih, ki pogoja normalnosti in simetričnosti okoli sredine ne izpolnjujejo, se zagreši nezanemarljiva napaka. Ocena kategorij sprememb namreč ni skladna z načrtovanimi razredi oziroma kategorijami sprememb, niti ne odraža realnega stanja. Posledice so najpogosteje naslednje: lahko pride do zamika kategorij v tem pogledu, da so vse spremembe prevrednotene ali podcenjene, pozitivne in negativne spremembe so neuravnotežene, lahko premočno prevladuje en razred. Takšna shema kategorij sprememb seveda ni primerljiva z drugimi časovnimi sekvencami.

Zastavi se torej vprašanje, kako ravnati s podatki podob razlik, ki ne izpolnjujejo pogoja normalne porazdelitve. Ena od možnosti je transformacija podatkov (npr. logaritmiranje) ter oblikovanje razredov sprememb na osnovi logaritemske porazdelitve. Toda s tem tvegamo doprinos novih napak in vprašanje je ali bi bili transformirani podatki tudi zares ustrezno prilagojeni. Druga možnost je, da jih izključimo iz časovne vrste. Ob izključitvah, kar je vsekakor nujna a slaba posledica, pa spet vstopimo v začaran krog pri časovnih analizah z daljinsko zaznanimi podatki – to je tanko mejo med številom razpoložljivih satelitskih posnetkov in oblikovanjem ustrezne in želene časovne vrste.

Z vsebinskega vidika velja časovne analize pretresti v luči odprtih možnosti obdelave podatkov sekvenc in možnosti interpretacije. Pri kvantitativni obdelavi sekvenc se v splošnem lahko odločimo za relativen pristop (zaporedne spremembe sekvenc) ali kumulativen pristop

(prirastki in upadi sekvenc glede na izhodiščno stanje). Odprto je vprašanje, kaj nam poda več (relativna ali absolutna primerjava) ter kako lahko sočasno ocenimo šum med sekvencami.

Šuma na sekvencah praktično ni mogoče oceniti, če nimamo zunanjih ali referenčnih podatkov. Takšni referenčni podatki bi na primer bili, da bi za določeno obdobje razpolagali tudi z opazovanjem in meritvami na terenu. Druga, precej nepraktična možnost za oceno šuma je, da subjektivno ocenimo relevantnost prehodov kategorij sprememb hkrati z natančno analizo lastnosti porazdelitve podobe razlik (tj. analiza sredine, razpona vrednosti, prisotnosti ekstremov, velikosti standardnega odklona, simetričnosti, nagnjenosti, večmodalnosti in podobno) med sekvencami. Jasno je, da če šuma med sekvencami ne moremo določiti, potem tudi ne vemo, koliko lahko zaupamo kvantitativnemu ovrednotenju sprememb.

Kadar časovne analize izvajamo na zveznih podatkih, to so na primer vse lastnosti površja podane z odbojnimi vrednostmi, radiancami, spektralnimi indeksi, glavnimi komponentmi in komponentami Kauth-Thomasove transformacije, za rezultat dobimo rang pozitivnih sprememb (prirastki v vrednostih), rang negativnih sprememb (zmanjšanja v vrednostih) in razred pretežno nespremenjenega stanja med sekvencami. Ob takšni naravi podatkov, še posebej če so tudi večrazsežni, se zastavi vprašanje, kaj na danih podatkih vzpostavljene kategorije sprememb sploh predstavljajo, sporočajo? V sklepni fazi interpretacije sprememb si seveda želimo odgovor na vprašanje »kaj je kam in v kaj prešlo« ter »kdaj se je to zgodilo, kako pogosto se ponavlja« in podobno. Na to pa si na naštetih zveznih podatkih lahko odgovorimo le skupaj z vizualno interpretacijo sekvence ali para zaporednih posnetkov in karte oziroma sloja sprememb, v najboljšem primeru tudi z uporabo podatkov drugih časovno primerljivih virov (raba tal / pokrovnost, DOF itn.). To je dolgotrajno in marljivo delo, pristop pa ni najbolj praktičen za proučevanje večjih območij. Zadevo bi si na videz lahko poenostavili s preoblikovanjem zveznih podatkov v izbrano število opazovanih razredov. Vendar menim, da bi se znova soočali s premoščanjem težav iskanja optimalnih mej, pri oceni šuma pa bi imeli opraviti z dvojno, vezano kategorizacijo.

Iz tega vidika so časovne analize na kategoričnih podatkih kot je raba tal / pokrovnost bolj uporabne in priljubljene. Vendar se ne gre slepiti: metodološki problemi (v tem primeru zagotovitev kakovostne in standardizirane klasifikacije), ki bo podajala zares primerljive kategorije skozi čas ni enostavna naloga niti hitra rešitev tudi v primerjavi z zagatami, ki jih imamo z interpretacijo in pripravo zveznih podatkov. Gotovo pa je, da je tako analiza, kot interpretacija kategoričnih podatkov (matrika sprememb) bistveno bolj sporočilna in obvladljiva.

Obravnavanje šuma in navideznih sprememb

Če želimo kvantitativno ovrednotiti rezultate sprememb, moramo rešiti problem prisotnih navideznih sprememb oziroma šuma. V raziskavi sem preverila možnost treh po naravi različnih načinov obravnave šuma, z namenom omiliti njegov prispevek v zaznavi sprememb. In sicer:

- možnost filtriranja sprememb (post prečiščevanje rezultatov analize sprememb),
- določanje sprememb na podlagi križne korelacije sosedstev v dveh datumih (sprememba mere in operatorja za določanje sprememb) ter
- določanje sprememb z uporabo večločljivostnega pristopa (združevanje informacij o spremembah v dveh prostorskih merilih).

Po razmisleku sem prišla do zaključka, da pri opazovanju vsestranskih sprememb (na zveznih podatkih na širšem območju), s katerimi sem se v disertaciji ukvarjala, filtriranje sprememb na podlagi različnih kriterijev ne pride v poštev. Predvsem zato, ker je nemogoče zajeti in opredeliti vse možne situacije in zanje ustrezne kriterije. Če pa bi obravnavali posamezen pojav ter spremembe v povezavi z njim, bi lahko določene spremembe dodatno kategorizirali oziroma filtrirali z drugimi podatki oziroma informacijami o površju (na primer zveza med komponento KTT vlažnosti in stopnjo NDVI oziroma prirastkom v vegetaciji med dvema sekvencama). Vendar bi morali vnaprej natančno raziskati značilne zveze med obravnavanimi spremenljivkami, pri tem pa upoštevati tudi spremenljivke, kot je letni čas. Dodatno bi lahko, na primer, ob analizi sprememb v urbanem okolju uvedli kakšen geometrijski filter za prečiščevanje pravih oblik sprememb in podobno. Vse naštetu bi lahko reševali z modelom odločitvenega drevesa ali vzpostavitev celovitega sistema za opazovanje danega pojava.

Prav tako kot filtriranje rezultatov sprememb se vpeljava križne korelacije sosedstev ni izkazala za uporabno. Rezultati križne korelacije sosedstev so za kategorizacijo sprememb in interpretacijo precej zapleteni. Pokazalo pa se tudi je, da identifikacija sprememb na podlagi nizke korelacije med dvema sosedstvoma ni učinkovita. Prav zaradi naštetih razlogov je pristop neobvladljiv tudi z vidika odstranjevanja navideznih sprememb. Razlog za neuspeh je verjetno tudi v tem, da se pri srednji prostorski ločljivosti uporabljenih posnetkov Landsat, tudi pri uporabi majhnih sosedstev (3 x 3), informacije preveč mešajo, da bi bila korelacija za njihovo oceno ustrezna mera.

Z vidika obravnave šuma in navideznih sprememb pa je dokazano boljša rešitev z vpeljavo v disertaciji predlaganega večločljivostnega pristopa določanja sprememb. Prednosti so naslednje: postopek je enostaven, razumljiv in učinkovit. Upošteva tako vrednosti posameznega piksla kot lastnosti njegove bližnje okolice (sosedstva), zato ga lahko obravnavamo tudi kot kontekstualno usmerjen pristop. Stopnjo šuma, ki ga želimo odstraniti, uravnavamo s poljubno izbiro grobega merila in informacij, ki jih ta podaja. Pristop je uporaben za vse vrste časovnih analiz, tudi če podatki niso optimalno primerljivi. Ne nazadnje, zaradi učinkovitega odstranjevanja navideznih sprememb pristop omogoča tudi kvantitativno ovrednotenje. Omejitve pa so naslednje. Predlagani večločljivostni pristop je primeren za opazovanje večjih sprememb na površju, problema opazovanja prehodov pa ne rešuje. Ta še vedno ostaja v domeni iskanja rešitve za doseganje optimalne primerljivosti med podatki. Prav tako ob obravnavi zveznih podatkov (ki ni predmetno usmerjena analiza) ostaja problem interpretacije dobljenih sprememb. Vendar z uporabo dodatnih virov podatkov lahko razmeroma dobro osmislimo rezultate. Večločljivostni pristop daje ob ustrezni interpretaciji tudi razumne rezultate daljših časovnih vrst, torej nam omogoča tudi vpogled v trend sprememb.

Za konec velja omeniti še *obseg dela* za izpeljavo časovnih analiz. V stalnem primežu med zagotavljanjem pogojev in zahtev metodologije časovnih analiz ter obsega dela, ki ga ob tem namenjamo pripravi in obdelavi podatkov ter njihovi kontroli, se seveda vprašamo ali je postopek mogoče če že ne popolnoma pa vsaj v veliki meri avtomatizirati. Odgovor je pogojno pritrdilen. Torej le pod pogojema:

- da so med usklajevanjem podatkov vključene številne kontrole in varovalni mehanizmi, ki znajo analizirati spremembe lastnosti podatkov, jih prečistiti oziroma kalibrirati ter ponovno ovrednotiti, ter
- da je skrčen obseg opazovanja.

Slednje lahko pomeni ali da je pristop bolj predmetno ali vsaj prostorsko kontekstualno usmerjen (sočasna obravnava sosedstva piksla), sistem pa razvit za opazovanje in ustrezno časovno analizo izbranega pojava (npr. kontinuirano dolgoročno spremljanje urbanizacije mesta ali zaraščanja gorskih pašnikov in podobno).

Pomemben dejavnik za uspešnost časovnih analiz pa je tudi *velikost opazovanega območja*. V splošnem velja, da bomo na manjših območjih bistveno lažje zagotovili optimalno primerljivost med podatki, torej bomo dobili tudi boljše in zanesljivejše rezultate časovnih analiz. Tako vsestranskih časovnih analiz kot procesno ali pojavno usmerjenih opazovanj sprememb. Pri obravnavi večjih območij ter opazovanju vsestranskih sprememb, predvsem pa pri kvantitativnih ocenah in njihovi interpretaciji, je treba biti bolj previden. Za večja območja zato velja raje razmišljati o časovni analizi posameznih pojavov ter kasnejšem združevanju informacij o posameznih opazovanih pojavih, tj. njihovem obnašanju v prostoru skozi čas.

6 OVREDNOTENJE METODOLOGIJE NA PODLAGI REZULTATOV

Večkrat sem že omenila, da se v praksi pri več razpoložljivih metodah soočamo z vprašanjem, katero metodo uporabiti. Vemo, da je bistvenega pomena najti ravnovesje med lastnostmi podatkov, ciljem modeliranja in pričakovano ravnijo rezultatov. S proučevanjem optimalne metodologije za analizo sprememb v danih tehnoloških, teoretičnih ter namembnostih okvirih sem želela prispevati k odstiranju zadreg pri praktičnem delu v obdelavi podatkov daljinskega zaznavanja srednje ločljivosti za določanje sprememb. V tem poglavju povzeman glavne ugotovitve z vidika implementacije posameznih faz v metodologiji za analizo sprememb ter ugotovitve, ki se nanašajo na časovne analize lastnosti površja Slovenije.

6.1 Splošne ugotovitve

Za glavno izhodišče doktorske disertacije, ki sem ga želela preveriti, je bila postavljena naslednja trditev: »Le z izpeljavo in analizo celovite metodologije lahko dosežemo kakovostno in še obvladljivo interpretacijo časovne analize izbranega površja Zemlje«.

Na podlagi končane raziskave hipotezo lahko sprejemem, vendar je trditev nujno bolj natančno opredeliti in razširiti: »Le z izpeljavo celovite metodologije, to pa pomeni:

- s skrbnim spremljanjem in nadzorom učinkovanja posameznega koraka v pripravi podatkov na spektralne lastnosti posnetkov,
- z odstranitvijo meteorološkega šuma in/ali večjih napak senzorja iz posnetkov ali izločitvijo tistih posnetkov iz časovne vrste, ki ne zadostijo zahtevani standardizaciji in lastnostim podatkov izbrane časovne vrste,
- z izbiro ustreznega načina opisa lastnosti površja za dani namen,
- s smiselno vzpostavitev mejnih vrednosti za kategorizacijo sprememb upošteva lastnosti izbranega indikatorja površja ali letnega časa opazovanja ter
- z učinkovito obravnavo navideznih sprememb oziroma odstranjevanjem šuma iz rezultatov,

lahko dosežemo kakovostno, zanesljivo in še obvladljivo vsestransko interpretacijo časovne analize izbranega površja Zemlje«.

O predobdelavi in pripravi podatkov

Priprava podatkov za časovne analize je problematična iz več razlogov. Pri dolgem, večdesetletnem času opazovanja so se lahko zamenjali sateliti, senzorji in spremenile so se lastnosti senzorjev. Kljub zagotovitvi, da so posnetki vseh misij satelitov Landsat med seboj

primerljivi, se do zares visoke ravni te primerljivosti ni prav enostavno dokopati. Ob splošno poznanih težavah z izgubljanjem občutljivosti zaznavanja senzorjev Landsat tekom časa in vpogledu v obširno dokumentacijo o kalibraciji senzorjev Landsat MSS, TM in ETM+ na eni strani ter praktičnimi zagatami usklajevanja posnetkov na drugi strani, uvidimo, da so tehnološki in meteorološki pogoji zajema daljinsko zaznanih podatkov pomemben vir (vselej prisotnih) problemov. Drug vir so postopki obdelave daljinsko zaznanih podatkov, ki so po svoji naravi globalne transformacije. Za nameček so prav časovne analize, ki se na takšnih podatkih v praksi največ uporabljajo, izjemno občutljive na pogoj primerljivosti.

Predobdelava podatkov in priprava za določen namen ni vedno enostavna naloga. Postopki morajo biti zmožni odstraniti in odpraviti precej bolj zapletene pojave, kot je neka geometrijska naloga. Če so odprti za širok razpon okoliščin, niso vselej učinkoviti. Pogosto jih moramo sami programirati ali prilagajati danim podatkom. Ugotavljam, da je od vseh najtežje odpraviti atmosferske vplive, imajo pa zelo pomemben prispevek v doseganju optimalne primerljivosti posnetkov. Vsi postopki, ki odpravljajo atmosferski vpliv, so razmeroma občutljivi na izbiro referenčnega predmeta, na podlagi katerega atmosferski vpliv ocenimo. Neprijetno dejstvo in v literaturi redko omenjeno je, da različni predmeti ne dajejo dosledno primerljivih rezultatov med primerljivimi spektralnimi kanali. Zato se moramo sami odločiti, kateri najbolj ustreza danemu območju ali namenu raziskave. Dodatna slaba stran teh pristopov je tudi, da temne predmete praviloma izbiramo ročno, saj nam vselej prisotni šum na posnetkih preprečuje, da bi ta korak lahko zanesljivo avtomatizirali.

Velik praktični problem, ki sem ga v tej fazi priprave podatkov na uporabljenih postopkih, opazila, je, da se razpon vrednosti v različnih spektralnih kanalih lahko znatno spremeni, poleg tega pa se lahko menjajo tudi razmerja moči med spektralnimi kanali. To ima za posledico, da se precej nesistematično (tako med posnetki istega senzorja kot med posnetki različnih senzorjev) zamenjajo razmerja in razponi (t. i. senzibilnost) spektralnih kanalov. To je precej nevhvaležno izhodišče za usklajevanje podatkov.

Topografski popravki so, če so na danem območju učinkoviti, bolj predvidljivi. Kosinusni popravki z Minnaertovim modelom resda vnesejo v posnetke večje in bolj vidne spremembe, a za to si pri odpravljanju vpliva terena in osvetlitve navsezadnje prizadevamo. Prinesejo pa tudi nekaj slabih sprememb v podatke. To so prevelika poudarjenost pregibov reliefa v zdaj odpravljeni razgibanosti površja, v goratih in reliefno razgibanih predelih izgubimo del podatkov in bolj ali manj se lahko spremeni barvna integriteta posnetkov. Od naštetih slabih lastnosti je dobra stran ta, da se prvi dve pojavljata sistematično na vseh popravljenih posnetkih. Barvna spremenljivost predvsem v modro-zelenem spektru pa je znova dodaten odprt problem za reševanje in doseganje visoke primerljivosti.

Atmosferski in topografski popravki so absolutni popravki posnetkov. Dokončno usklajevanje med posnetki si skušamo priboriti s postopkom radiometrične standardizacije. Večina postopkov standardizacije izhaja iz prvin analize t. i. nespremenljivih predmetov skozi čas ali pa iz metod minimiziranja kvadratov odstopanj. Problem prvih za območje Slovenije je ta, da takšna potencialna območja niso preverjena tudi s terenskimi meritvami. Splošno uveljavljeni in ustrezni predmeti, kot je puščava ali svetle peščene plaže, pa tudi ne pridejo v poštev, saj jih v Sloveniji ni. Princip delovanja drugega pristopa je, da skušajo kar najbolj prilagoditi ali vpeti celotno podobo ali izbrano območje na izbrano referenčno podobo oziroma izsek. Postopek, ki sem ga uporabila za relativno uskladitev spektralnih kanalov med različnimi posnetki, je linearna regresija. V statističnem pogledu daje izjemno dobre rezultate. Srednje

vrednosti spektralnih kanalov so po postopku povsem usklajene. Tekom raziskave pa se je pokazalo, da je to dejstvo lahko precej zavajajoče. Ob podrobni analizi sem ugotovila, da se pri tem pogosto znatno spremeni gostota ali interval razpona vrednosti. Učinek ni sistematičen, ga pa lahko odkrijemo na podlagi odklonov koeficientov regresijske enačbe ter primerjave standardnih odklonov porazdelitve vrednosti. Torej tudi ta korak v pripravi podatkov ne rešuje optimalno zadane naloge pri usklajevanju različnih podatkov.

Glavni problem vseh treh postopkov je torej možno nesistematično spreminjanje intervala razpona vrednosti v posameznih kanalih. Ta učinek povzroča težave pri določanju predznaka in kategorije sprememb, saj so prav ti z anomalijo prilagojeni spektralni kanali pogosto vzrok za odklone od normalne in simetrične porazdelitve vrednosti v podobi razlik. Problem neuskklajenosti gostote razpona vrednosti bi nemara lahko rešili s postopkom prilagajanja histograma, vendar imam glede tega pomisleke. Predvsem gre pri tem za korenito transformacijo, vprašanje pa je v kolikšni meri je opazovana gostota histograma različna od drugih gostot histograma zaradi lastnih značilnosti scene in koliko zaradi posameznih popravkov. Dodaten, ne prav majhen vpliv na slabše doseganje optimalne primerljivosti pa ima tudi meteorološki šum, tj. prisotnost oblakov in meglic. Tekom priprave podatkov oblakov nisem odstranila iz posnetkov, ker noben poskus samodejne odstranitve ni bil dovolj uspešen (ne z mejnimi vrednostmi v termičnem kanalu, ne z razmerjem kanalov). Bodisi da niso zajeli vseh oblakov bodisi da so zajeli tudi druga območja z visokim/nizkim odbojem, ki jih nisem želela odstraniti. Prisotnost oblakov, če ni šlo za posamezen oblaček, brez dvoma pomeni velik doprinos težav v doseganju visoke primerljivosti. V nadaljevanju raziskav se je namreč tudi pokazalo, da je v postopku določanja sprememb prisotnost oblakov ena najbolj resnih omejitev za doseganje normalne in okoli ničle simetrične porazdelitve podobe razlik. Večino posnetkov, ki so tudi na testnih območjih imeli prisotne oblake, sem v končni obdelavi časovnih vrst morala izključiti iz analize. Maskiranje ali odstranjevanje kateregakoli vplivnega šuma (tak primer je na primer tudi voda), je torej prav tako pomemben predpogoj za doseganje primerljivosti med posnetki.

O izbiri ustreznega opisa lastnosti površja

Izbira ustreznega opisa lastnosti površja je pomembna predvsem z vidika interpretacije rezultatov časovnih analiz. Odbojne vrednosti je same zase precej težko interpretirati, saj nam povedo le ali se je odboj povečal ali zmanjšal. To, na kakšen način se na spremembe odzivajo posamezni predmeti, je pri vsestranskih analizah spremembe stanja stvar posamičnega vizualnega ovrednotenja ali pa primerjave na referenčni vir. V tem primeru karte sprememb lahko uporabimo zgolj kot kazalce za prostorsko umeščenost (razporeditev) vzorcev sprememb, neposredno pa ne povedo dosti o tem, kaj se je spremenilo. Če za opazovani pojav ustreza sporočilnost katere od spektralnih pretvorb podatkov, je izbira takšnega podatka vsekakor boljša opcija v luči interpretacije in karakterizacije sprememb.

O karakterizaciji in kategorizaciji sprememb

Ne najmanj pomembna opomba k implementaciji posameznih faz v metodologiji za analizo sprememb se nanaša na vzpostavitev mejnih vrednosti za kategorizacijo intenzitete ali jakosti sprememb. Kljub odločitvi, da sem za določitev mej med razredi izbrala kriterij standardnega odklona od sredine (ki je odvisen od lastnosti celotne populacije porazdelitve vrednosti in se v praksi največ uporablja), na podlagi raziskave na različnih podatkih ugotavljam, da ta mera pomembno zaznamuje lastnosti klasifikacije in karakterizacije sprememb. Njena omejitev je,

da daje relevantne rezultate le, če je izpolnjen pogoj normalne in okoli ničle simetrične porazdelitve vrednosti podobe razlik (tj. rezultata razlikovanja dveh stanj površja). Poudariti pa je treba, da se v sozvočju z naravno intenziteto letnih časov, lahko zgodi prehitra saturacija skrajnih razredov pozitivnih ali negativnih sprememb. Tak skrajni primer je na primer indeks NDVI v spomladanskem času na območjih s pestro vegetacijo.

O tehniki določanja sprememb

Pomemben dejavnik za izbiro tehnike ali algoritma za določanje sprememb je ali opazujemo posamezno sekvenco ali želimo opazovati več sekvenc. Tehnike, ki izhajajo iz principa razlikovanja podob, so enostavne za razumevanje in so z vidika dobljenih rezultatov ustrezne. Rezultate bolj kompleksnih tehnik bomo praviloma težje interpretirali. V primeru opazovanja ene sekvence zato velja preizkusiti predvsem različne operatorje in mere za določanje sprememb ter danemu namenu opazovanja izbrati najustreznejšo. Pri daljših časovnih analizah pa je najbolj pomembno, kako sestavimo časovno vrsto primerjanih stanj (kaj želimo opazovati) ter kako zagotovimo doslednost rezultatov med njimi.

Časovna analiza je smiselna, če dobimo tako zanesljivo sliko sprememb v prostoru (vzorec razmestitve sprememb) kot zaupanja vredno kvantitativno oceno (količina sprememb). Ker v praksi s pripravo podatkov redko dosežemo optimalno primerljivost, je pri določanju in ovrednotenju sprememb odločujočega pomena učinkovito odpravljanje ali preprečevanje navideznih sprememb. Izmed vseh tehnik in pristopov, ki sem jih v raziskavi obravnavala, se je z vidika obravnave šuma pokazalo, da je večločljivostni pristop s sočasnim obravnavanjem lastnosti sosedstva (združevanje informacij v izvornem in izbranem grobem merilu) učinkovita alternativa obstoječim tehnikam.

Sklep

Na splošno lahko povzamem, da je za časovne analize na satelitskih posnetkih priprava podatkov (pri daljših opazovanjih tudi oblikovanje časovne vrste) ključnega pomena. Vsekakor nujni so kakovostni topografski popravki in popravki osvetlitve scene ter maskiranje vplivnega šuma na posnetkih. Na podlagi opravljene raziskave sem prišla do zaključka, da je za potrebe časovnih analiz nujno odstraniti oblake in meglice, priporočljivo pa je odstraniti tudi večje vodne površine (reke, jezera), saj je njihov odboj precej spremenljiv (različna temperatura vode, spremenljivost v vsebnosti snovi, blata) in zato lahko moteč pri opredelitvah sprememb. Glede izkušenj z atmosferskimi popravki je situacija bolj protislovna. Vsekakor je smiselno digitalne vrednosti pretvoriti v odbojne, kar najbolj enostavno storimo skupaj s popravkom vpliva atmosferskega odboja. Prednost je gotovo tudi ta, da se v splošnem izboljša kontrast, torej posledično s tem tudi diferenciacija predmetov (v končni fazi tudi razlikovanje prehodov ali tranzicij sprememb). Zavedati pa se moramo, da vnašajo največ nepredvidljivih in od posnetka do posnetka različnih sprememb v lastnostih spektralnih kanalov, čeprav naj bi to bil absolutni postopek. Rešitev je morda v uporabi drugega, postopka za odpravljanje atmosferskih vplivov, ki ne temelji na identifikaciji temnih predmetov. Vsekakor ni realno pričakovati, da je na tej točki priprava podatkov zaključena. Med absolutno popravljenimi posnetki bodo še vedno prisotna odstopanja, zato je v sklepnih fazi priprave podatkov obvezna še radiometrična uskladitev.

Pri sami izvedbi analize sprememb sta pomembni dve zadevi. Nujno je izbrati tak postopek, ki omogoča obravnavo in odstranjevanje navideznih sprememb. Zelo koristno pa si je

zagotoviti tudi podatke drugih virov na katere lahko primerjamo in objektivneje ovrednotimo dobljene rezultate.

6.2 Analiza površja Slovenije

Namen raziskave na več testnih območjih je bil med drugim proučiti analizo sprememb s posnetki Landsat z vidika razlik v lastnostih površja Slovenije. Cilj je opredeliti tiste osnovne smernice, da bi analiza sprememb dala želene in kakovostne rezultate.

V ta namen sem opravila časovne analize na treh območjih: na širšem območju Ljubljana–Kranj, za Celjsko kotlino in Kras. Povzamem lahko naslednje.

Primerljivost podatkov je bilo najtežje zagotoviti za *širše območje Ljubljana–Kranj*. Razlog za to vidim tako v tem, da je to območje najbolj nehomogeno, saj so prisotna urbana središča, kmetijske površine in gozd, če naštejemo le najbolj značilne tipe, kot tudi da so bili popravki posnetkov za to območje najbolj težavni. Na eni strani je vzrok ta, da gre za največje območje, zato je bil pogostejše prisoten meteorološki šum, na drugi strani pa gre za razmeroma urbaniziran predel Slovenije, zato je ozračje nad njim bolj nasičeno s prahom in aerosoli, kontrast na posnetkih pa zaradi tega slabši in bolj spremenljiv.

Tudi analiza časovne vrste za celotno območje, čeprav je bila v časovnem pogledu najdaljša in z vidika stabilnosti vegetacije v najbolj ustreznem letnem času (poletje), ni dala dovolj zanesljivih kvantitativnih rezultatov (neodvisno od uporabljenega indikatorja lastnosti površja). Ker je na skoraj polovici posnetkov prisoten meteorološki šum, je bilo za tako veliko območje nemogoče zagotoviti optimalno primerjavo podatkov. Določenih je bilo preveč navideznih sprememb, precej porušena pa je bila tudi doslednost primerljivosti sekvenc. Analiza na izseku mesta Ljubljane je po drugi strani pokazala, da se na manjšem območju da spremljati vse večje posege, ki so se odvijali v tem prostoru v opazovanem času (npr. izgradnja obvoznice okoli Ljubljane, mesta intenzivnejše urbanizacije in podobno) ter rezultate tudi kvantitativno ovrednotiti.

Celjska kotlina z okolico je bila najmanjše testno območje in bi si s tega zornega kota smeli obetati dobre rezultate. Vendar je tudi v tem primeru rezultate časovnih analiz omejevala globalno in lokalno slabša usklajenost med podatki. Ta tokrat ni bila posledica meteorološkega šuma marveč razlik v zaznavanju visokih odbojnih vrednosti površja (urbanizirana območja imajo namreč razmeroma visok odboj). Kot glavni problem so se pokazale razlike v zaznavanju visokega odboja med senzorjema TM in ETM, načinu prevzorčenja podatkov v sprejemnih postajah (po metodi najbližjega soseda oziroma z bilinearno interpolacijo) ter v tem ali je bila opravljena tudi ortorektifikacija posnetkov.

Pokazalo se je, da je za zaznavo sprememb manjših in razdrobljenih prostorskih oblik (kar pri opazovanju urbanizacije spremljamo), različna občutljivost senzorja in s tem različna diferenciacija visokega odboja zelo moteča, saj je delež navideznih sprememb velik, neobvladljiv in neodstranljiv. Primerjavo moti tudi različno prevzorčenje surovih posnetkov. Pri posnetkih, ki so bili prevzorčeni z metodo najbližjega soseda je namreč diferenciacija vrednosti in predmetov bistveno večja in bolj razgibana kot pri posnetkih, ki so bili »zglajeni« z bilinearno interpolacijo. Nadalje se je na primeru Celjske kotline pokazalo, da ne glede na dobro globalno položajno usklajenost med posnetki, obstajajo lokalne neusklajenosti iz

naslova ortorektifikacije. Ortorektifikacija posnetkov Landsat se namreč opravlja na pregrobnih podatkih reliefa (250 m prostorska ločljivost) in je ni mogoče naknadno odpraviti. Vsi trije dejavniki povzročajo zaznavo velikega deleža navideznih razlik med posnetki.

Za opazovanje sprememb v urbanizaciji je poleg vseh okoliščin priprave podatkov ključnega pomena oblikovati časovno vrsto s podatki, ki na soroden način zaznavajo visoke odbojne vrednosti in na katerih so opravljeni enaki postopki predobdelave v sprejemnih pisarnah.

Območje Krasa je služilo kot primer opazovanja pretežno ruralnega območja z nekaj večjimi gradbenimi posegi (avtocesta) in značilnejšimi vegetacijskimi procesi. Podobno kot v zgornjih dveh primerih se pokaže, da je večje posege v prostor mogoče lepo spremljati, medtem ko ovrednotenje vegetacijskih procesov ni bilo mogoče zaradi prevelike obremenjenosti večine posnetkov z meteorološkim šumom.

7 POVZETEK

Odkar se človeštvo zaveda zanj prekomerno škodljivih, negativnih sprememb svojega udejstvovanja na Zemlji in s sateliti redno spremlja in opazuje dogajanje na površju, je analiza sprememb v prostoru (pokrajini) skozi čas ena vidnejših praktičnih aplikacij na področju uporabe podatkov daljinskega zaznavanja. Podatki daljinskega zaznavanja se od klasičnih meritev na zemeljskem površju bistveno razlikujejo v tem, da se kontinuirano zbirajo že več desetletij, torej nam frekventno osveženi arhivi satelitskih posnetkov površja zagotavljajo zadosten delež podatkov, da lahko opravljamo časovne primerjave. Na podlagi dolgotrajnih časovnih primerjav je mogoče spremljati in analizirati neposredne in posredne učinke dejavnikov v geografski stvarnosti, jih predvidevati ter navsezadnje pametneje načrtovati človekove posege v naravi in v urbanem prostoru.

V doktorski disertaciji sem obdelala in proučila celoten postopek priprave in obdelave satelitskih posnetkov za potrebe časovnih analiz površja. V teoretičnem delu sem predstavila širši nabor postopkov predobdelave satelitskih posnetkov ter podala bistvena izhodišča za modeliranje časovno-fizične razsežnosti prostora. Pri slednjem sem se ozrla v koncept naveze prostor – čas ter v načela, ki se uporabljajo za modeliranje statičnih in dinamičnih procesov. To mi je pomagalo, da sem lahko v raziskavi časovnih analiz na izbranih območjih vzpostavila in ovrednotila metodologijo za analize sprememb s podatki daljinskega zaznavanja srednje prostorske in časovne ločljivosti.

V praktičnem delu disertacije sem se ukvarjala s tehnikami poravnave posnetkov, tehnikami atmosferskih korekcij, popravki vpliva terena in osvetlitve površja, standardizacijo časovne vrste posnetkov ter z analizo, ovrednotenjem in interpretacijo sprememb. Kakovost postopka (učinkovitost metodologije) sem vrednotila glede na več izhodišč, ki so obravnavala različne naravne pogoje površja in okoliščine zajema. Na ta način sem dobila vpogled v robustnost metodologije in kritične točke v postopku priprave podatkov in določanja sprememb na površju. Precej pozornosti sem namenila analizi obnašanja postopkov priprave podatkov, odpravljanju slabosti uporabljenih postopkov ter nadzoru in prečiščevanju napak v podatkih, o katerih je v literaturi s tega področja manj informacij.

Analitični del doktorske disertacije je tako potekal na dveh ravneh: analiza postopkov priprave podatkov in ovrednotenje rezultatov časovnih analiz. Postopke sem proučevala tako, da sem za uporabljene predobdelave oziroma priprave podatkov vselej preverila, kakšen vpliv (oziroma učinek) imajo na lastnosti podob, tako v spektralnem kot v prostorskem pogledu. Pri tem sem uporabila standardne statistične teste in posamezni tehniki ustrezno upoštevala še druge dejavnike (na primer: simulacija vpliva položaja Sonca pri odpravi atmosferskih vplivov, učinek topografske normalizacije na različne naklone reliefa, rabo tal, prisojne in

osojne lege). Na ta način sem skrbela za sprotno zmanjševanje prenosa grobih napak, ki jih je pri tako velikem številu uporabljenih postopkov nujno upoštevati in ustrezno reševati. Rezultate časovnih analiz sem prav tako vrednotila glede na doseganje več ciljev: preglednost prostorskega vzorca sprememb (razmerje med pravimi in navideznimi spremembami), učinkovitost karakterizacije sprememb ter zmožnost kvantitativne obravnave rezultatov.

Izkušnje, ki sem jih dobila z izpeljavo celotnega postopka priprave, analize in interpretacije postopkov in podatkov, so pomembne za prostor Slovenije, saj izhajajo iz lastnosti in posebnosti površja Slovenije ter so uporabne za širšo množico uporabnikov in uporabnostnih namenov.

7.1 Splošne ugotovitve

Pred vsako primerjalno analizo je treba zadostiti določenim zahtevam. V primeru časovnih analiz površja je to visoka, če ne že popolna medsebojna primerljivost podatkov. Če ta pogoj ni izpolnjen, analize sprememb med zaporedjem posnetkov niso ne realne, ne zanesljive, skratka v kvantitativnem pomenu so neuporabne, saj vsebujejo veliko navideznih (nepravih) sprememb.

Priprava in usklajevanje podatkov

V prvem delu raziskave sem testirala pomen in vlogo postopkov priprave podatkov z različnimi tehnikami. Ker je položajna primerljivost satelitskih posnetkov osnovni pogoj prostorskega modeliranja in primerjalnih analiz sem posnetke natančno georeferencirala in medsebojno registrirala (geometrično standardizirala). Pokazalo se je, da so današnji algoritmi za samodejno poravnavo že tolikanj učinkoviti, da dosegajo zahtevano podpikselsko natančnost.

Sledilo je testiranje postopkov za radiometrično standardizacijo posnetkov. Začela sem s primerjavo in učinkovitostjo različnih atmosferskih popravkov. Prišla sem do zaključka, da je pri tehnikah, ki za oceno atmosferskega odboja na posnetkih uporabljajo temne predmete, rezultat zelo odvisen od narave temnega predmeta. To pomeni, da ne bomo dobili primerljivih rezultatov, če za temen predmet enkrat uporabimo globoko in čisto vodo, drugič gosto vegetacijo in tretjič globoko senco. Problem seveda nastopi, kadar na različnih posnetkih ne moremo zagotoviti podobnih temnih predmetov. Dokazala sem tudi, da različne tehnike (minimum v histogramu, linearna regresija) ne dajejo ne konsistentnih ne primerljivih rezultatov. V iskanju najboljših rešitev sem se odločila za razmeroma nevtralen pristop izbire temnega predmeta, ki ga predlaga Chavezova metoda vidljivosti. Obnašanje tehnike sem testirala glede na različne okoliščine in navsezadnje dokazala, da je tehnika med vsemi testiranimi primerna za popravke na območju Slovenije (vloga položaja Sonca). Pokazalo se je, da se v skladu s cilji atmosferskih popravkov izboljša kontrast, žal pa tudi, da so absolutni naravi postopka navkljub v rezultatih pogoste znatne spremembe gostote informacijskega razpona (zaloge vrednosti) posameznega spektralnega kanala. S podrobnejšo analizo sem nato ugotovila, da se ta slabost pojavlja precej nepredvidljivo, nisem pa uspela zanesljivo dokazati od česa v postopku je to odvisno. Vsekakor se je kasneje pokazalo, da je to prva pomembna kritična točka v zagotavljanju primerljivosti med podatki, ki pa je ni mogoče enostavno odpraviti.

Zaradi različnega položaja Sonca med različnimi datumi posnetkov sem v nadaljevanju ugotavljala učinkovitost štirih tehnik topografske normalizacije. Dokazala sem, da so kar tri neprimerne in neučinkovite v odpravljanju osvetlitve in razgibanosti površja (to so kosinusni, c-faktor in statistični model). Kot primeren za lastnosti površja Slovenije se je pokazal Minnaertov model topografske normalizacije. Poleg več dobrih lastnosti sem tudi v tej fazi priprave podatkov odkrila drugo kritično točko. Postopek ima (tokrat zaradi uporabe koeficientov linearne regresije) podobne učinke na spremembo gostote informacijskega razpona posameznega spektralnega kanala kot zgoraj opisani atmosferski popravek.

Ker so po atmosferskih in topografskih popravkih še vedno prisotne razlike med posnetki (spektralni kanali različnih ali istega senzorja med seboj niso povsem usklajeni), sem opravila še t. i. radiometrično standardizacijo z enostavno linearno regresijo. Na podlagi ovrednotenja lastnosti posnetkov v tem sklepnem koraku s primerjavo srednjih vrednosti spektralnih kanalov, sem ugotovila, da so posnetki oblikovanih časovnih vrst med seboj statistično dobro usklajeni. Pri določitvi sprememb pa se je pokazalo, da je njihova dobra globalna primerljivost zavajajoča. Pomembna je namreč tudi lokalna usklajenost, ki bi jo lahko opisali kot usklajevanje sorodnih tipov površja. To je torej tretja kritična točka v zagotavljanju optimalne primerljivosti med podatki, ki je obstoječa praksa še ne rešuje ustrezno.

Eden od ciljev disertacije je bil ovrednotenje metodologije priprave podatkov. Različne tehnike sem testirala zato, ker sem želela ugotoviti, katera kombinacija je najboljša za doseganje visoke primerljivosti med posnetki in razumeti tudi zakaj. S tega zornega kota lahko zaključim, da noben od obstoječih popravkov ni optimalen, saj je rezultate praviloma treba kalibrirati in prečiščevati (odstranjovati ali spreminjati ekstremne vrednosti).

Analiza sprememb

V drugem delu raziskave sem želela vzpostaviti in ovrednotiti časovne analize v različnih okoliščinah in na različnih podatkih (informacijah ali indikatorjih o lastnostih površja). Med drugim sem želela ugotoviti, kakšen je vpliv operatorja (načina izračuna) za določanje sprememb, kako se ta obnaša na neposredni primerjavi zveznih podatkov ter kako vzpostaviti splošen model kategorizacije in karakterizacije sprememb. Uporabila sem štiri različne operatorje (absolutno razliko, relativno razliko, simetrično relativno razliko in deljenje) in na podlagi obnašanja na majhnih in velikih številih ter v ekstremnih situacijah dokazala, da simetrična relativna mera ni nujno najbolj simetrična. Zaradi še drugih okoliščin in lastnosti se je pokazalo, da je operator relativne razlike vsestransko najbolj primeren za načrtovane časovne analize.

S testi na različno obdelanih podatkih ter ob predpostavki, da se v normalnih okoliščinah razlike porazdeljujejo približno normalno, sem prišla do zaključka, da je za opazovanje vsestranskih sprememb ustrezna mera za kategorizacijo jakosti sprememb delež standardnega odklona. Za ločevanje velikih sprememb (pretvorb) sem kot primerno ločnico lahko opredelila odmik 2 ali 2,5 standardnega odklona od sredine, za ločevanje med prehodi pa upošteva smiselno število razredov zadostuje razkorak 0,5 standardnega odklona (kar pomeni enajst razredov prehodov). Mejo, s katero opredeljujemo dopustno lastno variabilnost pojavov, sem vzpostavila pri odmiku 0,5 standardnega odklona od sredine, v obe smeri. Ob takšni razporeditvi razred, ki opisuje območja brez sprememb, praviloma zavzame nad 90 % površine območja.

Nato sem opravila številne analize sprememb na različnih podatkih, in sicer na odbojnih vrednostih površja, petih spektralnih indeksih (NDVI, TNDVI, enostavno razmerje, mineralni kompozit in hidrotermalni kompozit) ter na glavnih komponentah (PC). Časovne analize sem proučila na več časovnih vrstah in sicer za pomlad, poletje in jesen na treh različnih geografskih območjih: na območju Ljubljana–Kranj z okolico, za Celjsko kotlino ter Kras.

S takšnim mozaikom situacij sem želela preveriti ustreznost tehnik za določanje sprememb in uporabnost različnih podatkov o površju za časovne analize različnih tipov prostora. Prišla sem do naslednjih zaključkov.

- Z vsemi podatki v vseh okoliščinah lahko določamo večje spremembe v prostoru oziroma dobimo razmeroma relevanten prostorski vzorec za večje spremembe, ne pa nujno tudi zanesljive kvantitativne ocene sprememb. Različni postopki in različne okoliščine, ki vplivajo na lastnosti podatkov, namreč povzročajo znaten delež navideznih, neželenih sprememb.
- Za analize daljših časovnih vrst in časovne analize prehodov potrebujemo zelo visoko usklajene in prečiščene podatke, sicer rezultati niso zanesljivi in ne moremo razpoznavati pravih trendov sprememb v času. Kvantitativno ovrednotenje sprememb in/ali prehodov v časovnih vrstah je ob nepopolni primerljivosti sekvenc oziroma neustrezni obravnavi navideznih sprememb popolnoma onemogočeno.
- Zvezni podatki o lastnostih površja ali večja razsežnost spektralnih informacij so razmeroma zahtevni za interpretacijo vzorca sprememb. Vsebinsko lahko vzorec sprememb ovrednotimo šele z vizualno primerjavo posnetkov in karte sprememb ali s sočasno uporabo drugih razpoložljivih in časovno primernih virov podatkov.
- Kakovostne časovne analize bomo na večjih in bolj nehomogenih območjih razmeroma težko dosegli.
- V praksi je skoraj nemogoče zagotoviti ustrezno primerljivost med posnetki in tudi interpretacija zveznih podatkov pri sočasnem opazovanju več različnih pojavov je razmeroma zapletena.
- Zelo pomembno je tudi, da so uporabljeni podatki, tj. satelitski posnetki, ustvarjeni na čimbolj enak način (pomembna je identičnost postopka prevzorčenja surovih vrednosti v sprejemnih postajah, odzivnost sensorja na visoke oziroma nizke odbojne vrednosti ter izogibanje grobo ortorektificiranim posnetkom).

Glavni problem časovnih analiz je torej prisotnost navideznih ali nepravilnih sprememb. Te so posledica vseh ravni in okoliščin v praksi skoraj nikoli dosežene optimalne primerljivosti podatkov (satelitskih posnetkov).

7.2 Predlagane rešitve in njihova učinkovitost

Optimalno primerljivost med satelitskimi posnetki je zaradi različnih okoliščin in meteoroloških pogojev med zajemom, variacij v občutljivosti sensorjev ali različne predobdelave posnetkov v sprejemnih postajah v praksi navkljub celoviti metodologiji priprave in usklajevanja podatkov zelo težko doseči. Nikoli dosežena optimalna primerljivost podatkov je glavni razlog za slabšo učinkovitost časovnih analiz na podatkih satelitskih posnetkov. Še posebej to velja za pikselno usmerjene pristope določanja sprememb na

osnovi razlikovanja podob. Ti namreč izhajajo iz neposredne primerjave vrednosti in so zato tolikanj bolj občutljivi na vse neuskklajenosti med podatki. Neuskklajenost povzroča nezanemarljiv delež navideznih (nepravih) sprememb in s tem onemogoča kvantitativno ovrednotenje rezultatov časovne analize. Moti tudi prostorski vzorec identificiranih sprememb ter njihovo karakterizacijo in kategorizacijo. Ker optimalne primerljivosti podatkov pri obravnavi daljših časovnih vrst verjetno ne bomo uspeli doseči samo s skrbno pripravo podatkov, se je kot prva alternativna rešitev ponudila učinkovita obravnava navideznih sprememb. Kot druga alternativna rešitev pa izbira druge mere in operatorja za določanje sprememb.

Teh dveh nalog sem se v raziskavi lotila in našla učinkovit postopek odpravljanja navideznih sprememb, ki je posebej primeren za zvezne podatke (odbojne vrednosti, spektralne indekse, glavne komponente in podobno). Navidezne spremembe ali šum v kategoričnih podatkih ali v ozko usmerjeni analizi sprememb (npr. posamičnega pojava ali procesa na površju v času) namreč lahko obvladujemo z različnimi kriteriji prečiščevanja sprememb, t. i. filtriranjem. Pri opazovanju vsestranskih sprememb na površju (predmetno neusmerjena opazovanja) pa smo za to prikrajšani, saj je z uporabo kriterijev nemogoče opredeliti vse situacije in kombinacije (poglavje 5.7.1).

Predlagani večločljivostni pristop z uporabo združevanja informacij v dveh prostorskih merilih (grobem in izvornem), kjer informacije o spremembah v grobem merilu pridobimo na podlagi obravnave izbrane bližine sosedstva (in se s tem odmaknemo od pikselskega pristopa k prostorsko (lokalno) kontekstualnemu pristopu), daje učinkovito rešitev obvladovanja navideznih sprememb. Z uporabo opisanega pristopa (poglavje 5.7.2.1) sem dosegla odstranitev navideznih sprememb do te mere, da je omogočeno razumno kvantitativno ovrednotenje večjih sprememb, pa tudi opazovanje globalnega trenda sprememb v daljših časovnih vrstah. Omejitev predlaganega pristopa je, da ne rešuje tudi problema šuma pri opazovanju manj izrazitih sprememb, prehodov.

Ker pa predlagani pristop še vedno dopušča prisotnost navideznih sprememb pri obravnavi večjih območij, kjer bomo pregovorno imeli slabše primerljive podatke, sem v raziskavi preverila še drugo alternativno rešitev, tj. določanje sprememb na osnovi korelacije sosedstev (poglavje 5.7.2.2). Gre torej za odmik od določanja sprememb na podlagi pristopa z neposrednim razlikovanjem podob. Pokazalo se je, da korelacija kot mera za identifikacijo sprememb ni primerna za analize sprememb posnetkov srednje prostorske ločljivosti. Razlogi so naslednji. Informacija o spremembah, kot jo kaže koeficient korelacije, je precej razdrobljena, rezultat pa daje vtis, kot da je prisotnega veliko naključnega šuma. V srednje ločljivostnem merilu posnetkov Landsat je tudi precej podvržena vplivu standardnega odklona v sosedstvih, kar se vidi tako, da so robovi ob homogenih površinah površja pretirano poudarjeni (visok koeficient korelacije). Vidni kanali nasploh slabo razlikujejo območja očitnih sprememb in območja, kjer do sprememb ni prišlo. Velika omejitev pristopa je tudi zapletena razmejitev sprememb od območij brez sprememb z uporabo mejne vrednosti koeficienta korelacije in dodatnih kriterijev (naklona in presečišča regresijske premice). Ta namreč ni enoznačna za opazovanje vsestranskih sprememb, saj moramo opredeliti skupne optimalne mejne vrednosti (interval) za vse tri koeficiente in za različne situacije lastnosti površja. Tudi s takšno kategorizacijo informacij, kot jo zahteva pristop korelacije sosedstev, podatkov o spremembah ne prečistimo do te mere, da bi dobili v rezultatih presežek v primerjavi z ostalimi pristopi določanja sprememb.

7.3 Zaključki

Med raziskavo in različnimi analizami so se odpirala številna nova vprašanja in dileme, kako pristopati k iskanju odgovorov in boljših rešitev od obstoječih. V luči nadaljevanja raziskav bi bilo vsekakor nujno in smiselno:

- proučiti uporabnost in učinkovitost drugih metod atmosferskih popravkov, ki upoštevajo tudi lastnosti ozračja v času zajema podatkov (predvsem z vidika sistematičnosti pri rezultatih popravkov) oziroma, ki ne temeljijo zgolj na obravnavi temnih predmetov,
- proučiti ključne kazalce za zagotavljanje primerljivosti informacij shranjenih v posameznih spektralnih kanalih posnetkov ter izpopolniti metode nadzora sprememb v spektralnih kanalih po uporabljenih popravkih, saj verjamem, da je to lahko eden od načinov, da zagotovimo visoko primerljivost med podatki različnih datumov in s tem zanesljivejše rezultate časovnih analiz površja,
- poiskati možnosti za več samodejnosti pri pripravi in obdelavi podatkov,
- preizkusiti in opredeliti značilnejše odnose med različnimi indikatorji površja, ki jih lahko pridobimo iz satelitskih posnetkov ali v kombinaciji z drugimi dejavniki prostora (nakloni, usmerjenost, nadmorska višina, osončenost) za različne opazovane pojave, kar bi lahko znatno nadgradilo vsebinsko razlikovanje in razvrščanje sprememb,
- poiskati učinkovite tehnike za opazovanje subtilnejših prehodov (tranzicij) opazovanih pojavov,
- pri izdelavi modela sprememb na zveznih podatkih uporabiti odločitvena drevesa (vzročno posledičnih zvez ali strojnega učenja) in različne omejitvene pogoje (filtriranje oblik, korelacije med topografskimi in spektralnimi indikatorji površja) za nadaljnje izločevanje šuma in navideznih (nepravih) sprememb ter vsebinsko sporočilno karakterizacijo vzorcev sprememb,
- pri analizi časovnih vrst proučiti tudi kompleksnejše pristope od sekvenčnih primerjav stanja,
- predvsem pa preizkusiti in raziskati učinkovitost predmetno oziroma kontekstualno orientiranega pristopa v časovnih analizah (s trirazsežno segmentacijo, spektralnimi gručami, razvojem in uporabo različnih referenčnih krivulj za obravnavane lastnosti območja).

Doktorska disertacija je poskus celovitega pristopa k analizi sprememb s podatki daljinskega zaznavanja srednje prostorske in časovne ločljivosti. Čeprav se je raziskava nanašala le na satelitske posnetke Landsat, so ugotovitve metodološkega pristopa uporabne in veljavne tudi širše. Disertacija prinaša vpogled v vse faze priprave podatkov za časovne analize satelitskih posnetkov, jih kritično ovrednoti in odstira slabe strani, ki jih le ti lahko prinašajo v končen rezultat in na katere moramo biti pozorni. Predlagan večločljivostni pristop za določitev sprememb med časovnimi sekvencami satelitskih posnetkov, ob sočasnem nadzoru navideznih (nepravih) sprememb, je uporaben za opazovanje različnih večjih in intenzivnejših pojavov na površju. Ob zagotavljeni in doseženi visoki primerljivosti podatkov torej tudi za analizo daljših časovnih vrst. Uporaba predlaganega pristopa je široka predvsem zaradi enostavnosti operatorjev, ki jih vpeljuje ter neodvisnosti na vrsto zveznih podatkov

(indikatorjev lastnosti površja). Ne odpravlja pa problema navideznih oziroma nepravilnih sprememb pri opazovanju manj izrazitih sprememb, prehodov.

Predstavljena metodologija časovnih analiz satelitskih posnetkov ponuja vpogled v zgodovino večjih dogodkov in procesov v prostoru skozi čas ter nam prepušča več načinov njihovega proučevanja. S spoznavanjem in razumevanjem vzrokov in posledic v naši okolici v preteklosti pa smo lahko tudi boljši analitiki in načrtovalci prihodnosti. Upam, da sem z disertacijo prispevala koristen drobec tudi v širok nabor raziskav okolja z daljinsko zaznanimi podatki.

8 SUMMARY

8.1 Background

Satellite data offers an unique utility for monitoring and quantifying large scale land cover change over time. Consequently, change detection has become a significant part of the remote sensing research over the last decades (Smits and Bruzzone, 2003; Lunetta and Elvidge, 2000; Jensen, 1996). The goal of remote sensing change detection is to detect the geographic location of changes, identify their type (if possible) and quantify their amount. If long term imagery time series are handled trends can be recognised.

Suitable timing and cross comparison of satellite imagery are central to surface studies ranging from understanding and monitoring various natural and man-made disturbances to quantifying climate-driven shifts in ice and biogeography or vegetation phenology (Coppin et al., 2004; Liang, 2004). Changes range from major, large in reflectance shift and/or size, easily detectable transformations to more subtle differences arising from slight changes in the natural characteristics of land cover (i.e transitions). Regardless of the magnitude of the change process there are several important considerations to be taken into account when performing remote sensing change detection (Coppin et al. 2004; Im and Jensen, 2005). First, we have to pay attention to the remote sensing system characteristics such as spatial, radiometric and temporal resolution. These considerations give us important restrictions as to what can be observed on the Earth's surface and in what way. This is followed by environmental considerations such as atmospheric conditions at the time of acquisition, climatologic conditions that trigger soil moisture, various man-made conditions and other natural and phenological cycle characteristics. These allow for an improved understanding of the inherent differences in surface reflectance under a variety of conditions.

A large number of change detection methods have been evolved and they differ in their refinement, robustness and complexity. In general change detection techniques can be grouped into two types (Coppin et al., 2004; Lu et al. 2004; Singh 1989): image differencing techniques and post-classification comparison techniques. The main difference between the two types is that image differencing methods can identify the location and the magnitude of change but can usually not identify the type of land use or surface changes that have taken place in the area. Post-classification techniques can identify the location and provide the change category by comparing two different time imageries. However, both pieces of information (on the change) strongly depend on the accuracy of the individual classification.

8.2 Research hypothesis, aims and working approach

Change detection on remotely sensed data is primarily based on the comparison principle. The main characteristic of the majority of the current change detection techniques is to root on the direct image differencing based on arithmetic operators. Thus, it is of key importance to ensure adequate comparability between the time series imagery. This imposes that the data should be harmonised and standardised in as many aspects as possible, which requires geometric and radiometric pre-processing and standardisation of the time series imagery we are interested in. Additionally, through the review of remote sensing change detection applications it was perceived that the majority of studies are more often than not focused on the observation of a specific process or event (such as forest cover studies, urban change, devastating hazards observation, etc.). Given that change detection studies based on traditional change detection techniques are mainly event or specific process oriented, the main research subject of the dissertation was anticipated regarding the apparent relation described just now. Therefore, the main research aim was to re-evaluate the asserted methodology in view of monitoring the surface processes and their changes as a whole. For this reason the research was focused on:

- the analysis of the entire asserted steps in the data pre-processing phase, its behaviour, effectiveness and effects on image characteristics, and
- change detection techniques and their capabilities,

with the main objective:

- of resolutely evaluating its efficiency alongside the derogatory effects they may have and that propagate into the final results.

Given the depicted starting-point the following hypothesis was set: “If holistic change detection methodology has been implemented and carefully analysed, a reliable interpretation of identified non-selective changes for the area of interest can be completed.”

The goal of the dissertation is to examine and re-evaluate the role of the methodology as a collection of all decisions regarding the appropriateness of data selection, data pre-processing and the change analysis technique in view of the quality and reliability achieved in the final results.

Therefore, this doctoral dissertation treats the complete methodology for spatio-temporal analysis on middle spatial resolution satellite imagery, i.e. Landsat, and values its identified critical points at non-selective surface change observation. In order to achieve greater objectivity the study was performed within the following framework:

- Three case study areas were determined with the main objective of ascertaining different geographic circumstances and therefore observing different (but not isolated) processes that took place in the areas (Figure 14).
- Change detection was performed and evaluated for different spectral information and data transformations (all of them in continuous form): raw digital numbers (DN), radiances, reflectances, several spectral indexes (NDVI, mineral composite, hydrothermal composite), principal components and Kauth-Thomas components,

with the main goal to obtain an insight into the best relation between the change detection technique and the surface spectral characteristics arrangement.

- Time series of images have been organised also in a way that would provide an examination of the season's influences and its effects to the anticipated change detection results, as well as to a level of attainable comparability within seasonally based time series analysis.

First, data pre-processing was performed. This included five levels (see also figure 1):

- georeferencing and geometric registration,
- atmospheric corrections (the use of different dark objects and various techniques were examined),
- topographic normalization (the effectiveness of the cosine, Minnaert, c-factor and statistical model were studied),
- radiometric standardisation (linear regression was applied) and
- spectral transformations (different surface characteristics indicators were calculated).

Second, change detection analysis was performed. This encompassed the following (see also figure 1):

- an analysis of different change detection operators (absolute difference, % relative difference, symmetric difference and division),
- determination of change magnitude (thresholds) categorisation that would be useful for continuous data in general (by % change, by standard deviation from the mean),
- bi-temporal change detection on different data sets,
- different time series change detection with regard to the case study area, season and data spectral transformation,
- first level evaluation of the change detection results,
- noise and/or false change treatment,
- testing other change detection operators (i.e. piecewise neighbourhood correlation) and development of a contextual multi-level change detection technique that can efficiently treat noise,
- second level evaluation of the change detection results based on the contextual multi-level change detection model (quantitative change information assessment).

Third, conclusions and considerations linking theoretical propositions and practical experience regarding the change detection methodology were drawn.

8.3 Results

The research demonstrated that it is – in practice – barely possible to achieve optimally comparable time series of Landsat imagery that could be directly followed with reliable change detection. The geometric consistency of Landsat imagery can be reached rather easily. However, among the multi-temporal Landsat imagery it is difficult to obtain radiometric consistency. The main reasons for this appear to be in the following:

- inherent differences in the imagery acquisition conditions,
- variations in the sensor characteristics (Landsat MSS, TM and ETM+) and sensor sensibility loss,
- differences in imagery pre-processing implemented at space agencies (i.e. different product level pre-processing of used data),
- solar angle, and
- imagery correction techniques that are not always able to fulfil all requirements and may produce systematically inconsistent results when time series data are under consideration.

Consequently, the identified changes are biased with noise or seeming (false) changes that are not easily separated from the true changes. Their contribution can reach such dimensions that appropriate quantitative evaluation of detected changes becomes unachievable. Thus all of these issues can seriously obscure efficient surface change detection, regardless of the used change detection technique or observed change processes.

8.3.1 About data pre-processing and preparation

In the first part of the practical work the role and impact of data preparation with various techniques was examined. Sub-pixel *spatial co-registration* is a prerequisite to change detection. It was shown that recent automatic registration algorithms are able to accomplish the task when Landsat images are considered and therefore global geometric transformations are mostly appropriate.

Atmospheric corrections

A comparison and examination of the behaviour of various atmospheric corrections was performed. I reached the conclusion that by the means of dark object saturation methods the result depends greatly on the nature and characteristics of the dark object used to estimate the impact of path radiance. This means that the results among the belonging (pair-wise) spectral bands are not comparable if deep clean water is used on one occasion and dense vegetation or a deep shadow is used on another. The problem deepens if the same type of a dark object can not be located and used on different images. It was further proven that different approaches (such as minimum histogram value saturation, linear regression) do not yield neither consistent nor comparable results with different datasets. In search of the best solution the Chavez COST model was implemented in the end. The technique was tested taking into account various circumstances (the position of the sun, defining minimum values) and ascertained that this technique is the most appropriate for adjustments on the territory of Slovenia. It was shown that it improves the contrast in accordance to the goals of atmospheric influences. A great problem of this method is that the range or density distribution of reflectance values in various spectral bands can vary greatly, and the relations of power between the spectral bands can also change. This weak point appears rather unpredictably (unsystematically), however, I did not manage to discover what within this procedure determines this. As a consequence, the relations and range (i.e. sensibility) of the spectral bands change rather unsystematically (within the data from the same sensor as well as within the data from different sensors). Later, during the change detection analysis, it was shown that this is a rather unsatisfactory starting point for adjusting data, for it is the first important critical point in ensuring the comparison between data and as such cannot be easily dismissed.

Topographic corrections

Topographic corrections are more predictable, if they are efficient in a given area. Due to the various positions of the sun during the various dates of satellite images the efficiency of the four topographic normalisation techniques has been ascertained. I have proven that three of them are inappropriate and inefficient in abolishing the illumination and diversity of surface relief (i.e. the cosine, c-factor and static model). The Minnaert topographic normalisation model has proven to be suitable for the characteristics of the Slovene land surface. The positive points of it are: efficiency in abolishing the diversity and lighting of the land surface; the negative points are: a great emphasis on the relief borders (i.e. ridges, valleys), loss of a part of data in parts where the incident angle of the sun rays is greater than 90 degrees and the change of the colour integrity of the satellite images (a slight overestimation in band 1 due to which the images are bluish in colour). The positive side of the enumerated negative characteristics is that the first two appear systematically on all adjusted satellite images. The colour changes in the blue-green spectrum represent the problem for achieving high comparability. Within this phase of data preparation we can also notice a critical point that marks the characteristics of data in a non-systematic way. The procedure has (this time due to the use of linear regression coefficients) similar effects upon the change in the histogram range of the reflectance information within the individual spectral band as the previously described atmospheric adjustment.

Relative radiometric standardisation

Because there are still differences amongst the satellite images even after atmospheric and topographic adjustments (the spectral bands from different or from the same sensor are not entirely adjusted to each other), radiometric standardisation also needs to take place. Most of the standardisation procedures derive from the elements of analysing the so-called invariant objects through time or from the methods of minimising the squares of discrepancies. The problem of the first method in the territory of Slovenia is that such potential areas are not verified with field measurements. The generally recognised and appropriate objects such as deserts or light sandy beaches do also not come into play, for they can not be found in Slovenia. The principle of the second approach is that it tries to adjust or include the entire image or chosen area within the selected reference image or subset. I decided to use linear regression as the procedure for the relative adjustment of spectral bands between the various images. On the basis of evaluating the characteristics of the images and the comparison of the mean values of the spectral bands of the adjusted and referential image it was discovered that it statistically gives extremely good results. When defining the changes it arose that their good global comparability is misleading. The local adjustment that could be described as adjustment of similar surface types is also important. Using a detailed analysis I have also ascertained that even within this procedure the density of the reflectance vales interval or the range of histogram often changes significantly. The effect is not systematic but can be discovered on the basis of the deviation of the regression coefficients (slope and offset) and the comparison of the standard deviations from the value dispersion. Therefore, this step of data preparation does not solve the optimally set task of adjusting various data, thus the third critical point in ensuring the optimal comparability of data does so far not function sufficiently in practice.

The main problem of all three procedures thus lies in the possible unsystematic changing of the interval range of the reflectance values or the histogram density within the individual

bands. This effect causes problems when defining the scope and category of changes, for it is these – through anomalies – adjusted spectral bands that are often the cause for the deviations from the normal and symmetrical division of values in the difference image. An additional, not so small influence, on the poorer reaching of optimal comparability is also given by the meteorological noise, i.e. the presence of clouds and haze. During the data preparation the clouds were not removed from the images, because none of the automatic elimination attempts were successful (not with the threshold values in the thermal bands, nor with the relation of bands). When not dealing with a single cloud their presence was undoubtedly perceived as a great new problem in achieving high comparability. In the continuation of the researches it was also discovered that in the process of defining changes the presence of clouds is one of the most serious limitations for achieving normal and around zero symmetrical distribution image differences. I had to disregard most of the images that included clouds in the test areas from my analysis. Masking or removing any sort of influential noise (such as water) is thus an equally important precondition for achieving comparability amongst the images.

One of the goals of this dissertation is to evaluate the data preparation methodology. I have tested various techniques because I wished to discover which combination is the best for achieving high comparability amongst the images and understand why this is the case. From this aspect I can conclude that none of the existing adjustments is optimal, for the results have to – as a rule – be calibrated and cleaned (extreme values have to be removed or changed).

8.3.2 About change detection analysis

On the selection of the appropriate description of the surface characteristics

The selection of the appropriate description of the land surface characteristics (surface indicator) is important especially from the aspect of interpreting the temporal analysis results. The reflective values are hard to interpret in themselves, for they merely tell us whether the reflection has increased or decreased. In which way individual objects react to changes (in the general analysis of condition changes) depends on the individual visual evaluation of the comparison as regards the source of reference. In this case we can use the maps of changes merely as indicators for the spatial placement (division) of the patterns of changes, which do not directly tell us much as regards what has changed. If the information from one of the spectral transformation is appropriate for a specific purpose, the selection of such data is certainly a better option in the light of interpreting and characterising changes.

On the characterisation and categorisation of changes

Not the least important comment on the implementation of the individual phases in the methodology for analysis changes deals with the establishment of boarder values for the categorisation of intensity or strength of changes. Regardless of the decision that I have chosen the standard deviation from the mean criterion (which depends on the characteristics of the entire population division of values and is most commonly used in practice), it was ascertained (on the basis of research) that this measure importantly marks the characteristics of the classification and characterisation of changes. Its limitation is that it offers relevant results only if the condition of normal and around zero symmetrical distribution of difference images is fulfilled. It needs to be emphasised that in accordance to the natural intensity of

seasons, the greatest positive or negative changes classes can saturate extremely quickly. Such a border example is the NDVI index in spring, across areas with rich vegetation.

On the technique of defining changes

The techniques that emerge from the principle of image differentiation are easily understandable and appropriate as regards the obtained results. Results obtained through the use of more complex methods will be harder to interpret. In the case of observing one sequence (before and after) it is thus worthwhile to try various operators and measures for defining changes and select the one most suitable for our intentions. At the analysis of longer time lines it is important how we construct the time line of comparable states (what we wish to observe) and how we ensure the consistency of their results.

The results of the change analysis derived from various data, in various areas and during various seasons have shown that the use of image differentiation methods that are based on the direct comparison of the pixel value and on not optimally adjusted data, does not reach the desired results. Temporal analysis is appropriate if we obtain a reliable image of the changes in space (the pattern of change displacement) as a trustworthy quantitative evaluation (amount or size of changes). In this research it was clearly shown that even with a wholesome and carefully planned preparation of data it is almost impossible to achieve an optimum and general comparability. Thus it is – at defining and evaluating the changes – of vital importance to treat and efficiently eliminate the seeming changes. From all of the methods and approaches that I have dealt with within the research it was shown – from the aspect of treating noise occurring from the seeming changes – that the contextual multi-level change detection model that incorporates spatial neighbourhood dependence is an efficient alternative to the existing techniques of differentiating images on the pixel basis (see below). The introduction of the second measure for evaluating changes and the other operator (i.e. pairwise neighbourhood correlation, see Im and Jensen, 2005) on the Landsat images did not offer useful results. The third possibility of treating seeming changes is filtration. However, it appears that with non-selective observation of processes and occurrences on the land surface or with the so-called contextual changes efficient filtering of seeming changes (e.g. with the introduction of decision trees on the basis of the geometrical characteristics of objects and the limitations or correlations and relations in connection with other factors and similar) is not possible due to the complexity of the situation.

8.3.3 Proposed solution: A contextual multi-level change detection model

Dissertation introduces a contextual multi-level change detection method that incorporates spatial neighbourhood dependence and is able to efficiently control the majority of false change information. The model is based on focal information logic that gives averaged change information in a slightly reduced spatial scale – within the specified neighbourhood. It is based on the fact that in a larger geographic area (e.g. a 3 x 3 pixel window or 90 m spatial resolution for Landsat data) the information of the changes will tend to level abrupt change information if a small spatial scale change is present, and will show the averaged difference if the majority of pixels in the observed window are subjected to change. Computing the piecewise change information between two time-successive data sets provides valuable information regarding the location and numeric change value derived from using contextual information within the specified neighbourhood.

The procedure is as follows (see also figure 48 for results):

- Spectral information for a slightly coarser scale (for example 90 m spatial resolution) is computed for images or areas of interest. This may be accomplished with a specified neighbourhood mean value annotation.
- Change differentiation between images is performed on a coarser resolution scale and change magnitude categorisation is applied (see Chapter 5.5.1 and Table 12 for transition between classes and its definition).
- Upper positive and negative changes are reclassified so that the mask of important changes based on the neighbourhood context characteristics is prepared.
- Change differentiation is calculated on the original data scale (i.e. 30 m spatial resolution for Landsat data), then categorisation is applied, and finally a mask (or a mask with a buffer) of an arbitrary specified magnitude of changes (obtained in the previous step) is overlaid in order to restrict merely the contextually supported changes.

The information derived from a specific neighbourhood of pixels contains change information associated with the central pixel and its contextual neighbours. Two neighbourhood configurations were explored in the study using Landsat multi-spectral imagery. The smaller neighbourhood sizes (i.e. a 3 x 3 pixel window) provided sound detailed change information at the cost of introducing a few point shaped noises. Larger neighbourhood sizes (i.e. 5 x 5) were useful for removing this noise but introduced certain inaccurate information such as certain weakened or even removed linear feature changes (i.e. discontinuity in the highway corridor or roads) and removed smaller point feature changes (i.e. small complex house constructions). When combined with the original spatial scale change detection results, using 3 x 3 neighbourhoods yielded superior results.

The proposed method is appropriate for monitoring various greater and intensive processes on the Earth's surface with middle spatial resolution imagery. It has also proven to be suitable for a quantitative estimation of changes related to the various processes and/or of the coincident description of their trends. If any external data, for example land cover for a reference point in time, is introduced, a fairly reliable "from-to" change information can be extracted (even on a continuous type of data such as for example reflectance data).

8.4 Conclusions

Data preparation is crucial for multi-temporal change detection analysis. By all means necessary are qualitative topographic adjustments and masking the influential noise of the images. On the basis of the conducted research I have come to the conclusion that for the needs of a temporal analysis it is necessary to remove the clouds and haze, and it is also advisable to remove the larger water surfaces (rivers, lakes) for their reflection is rather changeable (various water temperatures, changes in the contents of the water, mud) and can thus present a great disturbance while determining the changes. As regards the experience with atmospheric adjustments the situation is more contradictory. It is certainly worthwhile to convert the digital numbers into reflectances, which is easiest done together with the adjustment of the influence of path radiance. The advantage is certainly also that this in general improves the contrast, consequently offering better object differentiation (which also

means better differentiation between transitions). However, we have to realise that they introduce the most unpredictable and from image to image different changes in the characteristics of spectral bands, even though this should be an absolute procedure. The solution most probably lies in the use of another procedure for eliminating atmospheric influences that does not rely only on the identification of dark objects. Of course it is not realistic to expect that the data preparation is concluded at this stage. Amongst the absolutely adjusted images we will still find deviations, thus a quality relative radiometric adjustment is necessary in the final phase of data preparation.

This dissertation contributes to certain general as well as Landsat imagery specific insights into the observed critical points of existing change detection methodology, including data pre-processing and change detection techniques. It offers some proposals on how to improve the procedure (contextual multi-level change detection model), as well as opens certain issues that are still to be answered (atmospheric, topographic and standardisation procedures that are to become more consistent and that give way to the more systematic results in the variety of imagery circumstances). Hence, remote sensing change detection still remains a broad research endeavour for the future.

LITERATURA IN VIRI

- Allen, J.F. 1983. Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM* 26, 11: 832–843.
- Al-Taha, K., Barrera, R. 1997. Identities through time. V: Frank, A., Kuhn, W., Haunold, P. (ur.). *Temporal data in geographic systems*. Vienna, TU Vienna, str. 233–244.
- Armstrong, M.P. 1988. Temporality in spatial databases. *Proceedings of GIS/LIS88*, vol. 2: str. 880–889.
- Bidirectional reflectance distribution function 2006.
<http://en.wikipedia.org/wiki/BRDF> (15.10.2006).
- Brandt, J.J.E., Bunce, R.G.H., Howard, D.C., Petit, S. 2002. General principles of monitoring land cover change based on two case studies in Britain and Denmark. *Landscape and Urban Planning* 62: 37–51.
- Brockwell, P.J., Davis, R.A. 1996. *Introduction to time series and forecasting*. New York, Springer-Verlag: 420 str.
- Brown, L. 1992. A Survey of Image Registration Techniques. *ACM Computing Surveys* 24, 4: 325–376.
- Callahan, K.E. 2003. Validation of radiometric normalization procedure for satellite derived imagery within a change detection framework. MSc. thesis. Logan, Utah, Utah State University: 70 str.
- Chalermwat, P. 1999. High Performance Automatic Image Registration for Remote Sensing. Phd. Thesis. Fairfax, Virginia, George Mason University: 140 str.
<http://citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/24191/http://zSzzSzwww.science.gmu.edu/zSzzSzprachyazSzthesis.pdf/high-performance-automatic-image.pdf>
- Chander, G., Markham, B. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 11, part 2: 2647–2677.
- Chander, G., Markham, B.L., Barsi, J.A. 2007. Revised Landsat 5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
http://landsat.usgs.gov/resources/files/L5TM_postcal_v11.pdf (5.3.2006).
- Chatfield, C. 2004. *The analysis of time series. An introduction*. Sixth Edition. Boca Raton, London, New York, Washington D.C., Chapman & Hall/CLC: 333 str.
- Chavez, P.S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24: 459–479.
- Chavez, P.S. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55, 9: 1285–1294.
- Chavez, P.S. 1996. Image-based corrections - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62, 9: 1025–1036.
- Cohen, W.B., Fiorella, M., 1998. Comparison of methods for detecting conifer forest change with Thematic Mapper Imagery. V: Elvidge, C., Lunetta, R. (ur.). *Remote Sensing Change*

- Detection: Environmental Monitoring Applications and Methods. Ann Arbor Press: str. 89–102.
- Collins, J.B., Woodcock, C.E. 1996. An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment* 50: 267–279.
- Coppin, P., Bauer, M.E. 1994. Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimise extraction of forest cover change features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32: 918–927.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Lambin, E. 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing* 25, 25: 1565–1596.
- Crist, E.P., Cicone, R.C. 1984. A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data - The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 22, 3: 256–263.
- Crist, E.P., Kauth, R.J. 1986. The tasseled Cap De-Mystified. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52, 1: 81–86.
- Dai, X., Khorrarn, S. 1998. The effects of misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36: 1566–1577.
- Derganc, J., Zupan, J. 2006. Zakaj je nebo modro? *Kvarkadabra – časopis za tolmačenje znanosti*. http://www.kvarkadabra.net/index.html?vprasanja/teksti/modro_nebo.htm (22.9.2006).
- Dolenc, S., 2000. O meri in merjenju časa. *Kvarkadabra.net – številka 4 (april 2000)*. http://www.kvarkadabra.net/zgodovina/teksti/merjenje_casa.htm (25.6.2004).
- Eastman, J.R., 2006. *Idrisi Andes. Guide to GIS and image processing*. Worcester, MA, Clark Labs: 328 str.
- Egenhofer, M.J., Golledge, R.G. (ur.) 1988. *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*. New York, Oxford University Press: 276 str.
- Electromagnetic scattering 2006. <http://en.wikipedia.org/wiki/Scattering> (10.9.2006).
- Elvidge, C.D., Yuan, D., Weerackoon, R.D., Lunetta, R.S. 1995. Relative radiometric normalization of Landsat Multispectral Scanner (MSS) data using and automatic scattergram-controlled regression. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61, 10: 1255–1260.
- Erdas Field Guide 2005. Atlanta, Erdas Inc.: 705 str.
- Eric, P.C., Cicone, R.C. 1984. A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data - The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 22, 3: 256–263.
- Eric, P.C., Cicone, R.C. 1984. Application of the tasseled Cap Concept to Simulated Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 50, 3: 343–352.
- ESA Space and Major Disasters 1999 – 2007. International Charter »Space and Major Disasters«. http://www.disasterscharter.org/main_e.html, <http://www.esa.int/esaEO/index.html> (22.9.2006).
- Fedorov, D., Fonseca, L.M.G., Kenney C., Manjunath B.S. 2002. Automatic Registration and Mosaicking System for Remotely Sensed Imagery. http://regima.dpi.inpe.br/publications/spie_fedorov.pdf (3.3.2003).
- Fonseca, L.M.G., Manjunath, B.S. 1996. Registration Techniques for Multisensor Remotely Sensed Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62, 9: 1049–1056.
- Frank, A., Kuhn, W. in Haunold, P. (ur.) 1997. *Temporal data in geographic systems*. Vienna, TU Vienna: 256 str.
- Frank, A.U., 1997. Qualitative temporal reasoning in GIS-ordered time scales. V: Frank, A., Kuhn, W. in Haunold, P. (ur.) *Temporal data in geographic systems*. Vienna, TU Vienna: str. 127–149.

- Fung, T., LeDrew, E. 1987. Application of principal components analysis to change detection. *Photogrammetric Engineering of Remote Sensing* 53: 1649–1658.
- Girard, M.-C., Girard, C.M. 1999. *Traitement des données de télédétection*. Paris, Dunod: 529 str.
- Gonzales, R.C., Woods, R.E. 2002. *Digital Image Processing*. Second Edition. New Jersey, Prentice Hall Inc.: 793 str.
- Gu, D., Gillespie, A. 1998. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel Sun-Canopy-Sensor geometry. *Remote Sensing of Environment* 64: 166–175.
- Hall, F.G., Strebel, D.E., Nickelson, J.E., Goetz, S.J. 1991. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. *Remote Sensing of Environment* 35: 11–27.
- Heuvelink, G.B.M. 1998. *Error Propagation in Environmental Modelling with GIS*. London, Taylor & Francis: 127 str.
- Hočevar, M., Kušar, G., Cunder, T. 2004. Monitoring in analiza zaraščanja kraške krajine v GIS okolju. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 75: 21–52.
http://www.ff.uni-lj.si/oddelki/geo/Publikacije/Dela/files/Dela_22/009_krevs.pdf (28.5.2007).
- Im, J., Jensen, J.R. 2005. A change detection model based on neighbourhood correlation image analysis and decision tree classification. *Remote Sensing of Environment* 99: 326–340.
- Jamnik, R. 1987. *Verjetnostni račun*. 2. predelana izdaja. Ljubljana, DMFA: 276 str.
- Jensen, J.R. 1983. Urban/suburban land use analysis. V: Jensen, J.R. (ur.). *Manual of Remote Sensing*, Second Edition. American Society of Photogrammetry 2: str. 1571–1666.
- Jensen, J.R. 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, Second Edition. New Jersey, Prentice Hall, Upper Saddle River: 316 str.
- Kaufman, Y.J. 1988. Atmospheric effect on spectral signature. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26, 4: 441–451.
- Kauth, R. J., Thomas, G. S. 1976. The tasseled cap - A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of Remotely Sensed Data*. Purdue University, West Lafayette, Indiana: 41–57.
- Khorram, S., Biging, G.S., Chrisman, N.R., Colby, D.R., Congalton, R.G., Dobson, J.E., Ferguson, J.E., Goodchild, R.L., Jensen, J.R., Mace, T.H. 1999. Accuracy assessment of remote sensing-derived change detection. *ASPRS Monograph*. Bethesda: Maryland: 64 str.
- Kobler, A., Hočevar, M., Džeroski, S. 2000. Forest border identification by rule-based classification of Landsat TM and GIS data. V: *ICML-2000 Workshop on machine learning of spatial knowledge*. Stanford University: 62–69.
- Kobler, A., Hočevar, M., Kušar, G. 2002. Uporaba multispektralnih satelitskih posnetkov in metod GIS za zaznavanje ter napoved zaraščanja / Detection and prediction of spontaneous afforestation using multispectral satellite data and GIS methods. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 69: 277–308.
- Krauss, K. 2000. *Photogrammetry Volume 1. Fundamentals and Standard Processes*. Fourth edition. Bonn, Dümmler Verlag: 397 str.
- Krevs, M. 2004. Spreminjanje urbane rabe tal v Ljubljani. *Dela* 22: 55–65.
- Kwarteng, A.Y., Chavez, P.S. 1998. Change detection study of Kuwait city and environments using multitemporal Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 19: 1651–1662.
- Langran, G. 1989. A review of temporal database research and its use in GIS applications. *International Journal of GIS* 3, 3: 215–232.
- Langran, G. 1992. *Time in geographic information systems*. New York, Taylor&Francis: 189 str.
- Langran, G., Chrisman, N.R. 1998. A framework for temporal geographic systems. *Cartographica* 25, 3: 1–14.

- Levec, J. 2006. Ocenjevanje sprememb pokrovnosti gozda in rabe prostora s satelitskimi posnetki na območju Loške doline. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška Fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 92 str.
- Li, H., Manjunath, B.S., Mitra, S.K. 1995a. A contour-based Approach to Multisensor Image Registration. *IEEE Transactions on Image Processing* 4, 3: 320–334.
- Li, H., Manjunath, B.S., Mitra, S.K. 1995b. Multisensor Image Fusion Using the Wavelet Transform. *CVGIP: Graphical Model and Image Processing* 57, 3: 235–245.
- Liang, S. 2004. Quantitative Remote sensing of Lands Surfaces. New York, Willey-Interscience: 560 str.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. 1994. Remote sensing and image interpretation. Third edition. New York, John Wiley&Sons: 750 str.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., Moran E. 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing* 20, 25: 2365–2407.
- Malila, W.A. 1980. Change vector analysis: an approach detecting forest changes with Landsat. Proceedings of the 6th International Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data. West Lafayette, Indiana, Purdue University: str. 326–335.
- Markham, B. L., Barker, J. L., 1986. Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectances and At-Satellite Temperatures. EOSAT Landsat Technical Notes, No. 1.
http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/pdfs/L5_cal_document.pdf.
- Markham, B. L., Barker, J.L. 1987. Radiometric properties of U.S. processed Landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment* 22: 39–71.
- Markham, B.L., Chander, G. 2003. Revised Landsat 5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-Calibration Dynamic Ranges. White Paper.
<http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/pdfs/L5TMLUTIEEE2003.pdf>.
- Mather, P.M. 2004. Computer processing of remotely-sensed images. An Introduction. Third edition. Chichester, John Willey and Sons Ltd: 324 str.
- McCormick, N. 1999. Satellite-based forest mapping using the SILVICS software user manual. Software, user manual, and demonstration data-sets. Joint Research Centre, Ispra, Italy: 134 str.
http://eurolandscape.jrc.it/forest/silvics/silv_man.pdf.
- Mezgec, I. 2006. Barve neba in Sonca. *Kvarkadabra – časopis za tolmačenje znanosti*.
http://www.kvarkadabra.net/index.html?pojavi/teksti/barve_neba.htm (22.9.2007).
- Myneni, R.B., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G., Nemani, R.R. 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386: 698–702.
- Narava in površje 2005. Kazalci okolja 2005: Narava in površje.
http://nfp-si.eionet.eu.int/Dokumenti/pdf/kazalci_okolja_2005_Narava_povrsje.pdf (10.6.2007).
- NASA 2007. The Landsat-7 Science Data User's Handbook.
<http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html> (18.7.2007).
- Neumann von, J. 1966. The Theory of Self-Reproducing Automata. Univ. of Illinois Press.
- Optical Imaging Systems 2006. Canada Center for Remote Sensing.
http://ccrs.nrcan.gc.ca/optic/index_e.php (17.11.2006).
- Oštir, K. 2006. Daljinsko zaznavanje. Ljubljana, Založba ZRC: 250 str.
- Oštir, K., Stančič, Z., Podobnikar, T., Vehovar, Z. 2000. Pridobivanje in uporaba prostorskih podatkov visoke ločljivosti pri načrtovanju omrežja mobilne telefonije. V: Hladnik, D., Krevs, M., Perko, D., Podobnikar, T., Stančič, Z. (ur.). *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1999-2000*. Ljubljana, Založba ZRC: str. 143–152.

- Oštir, K., Veljanovski, T., Podobnikar, T., Stančič, Z. 2003. Application of satellite remote sensing in natural hazard management: the Mount Mangart landslide case study. *International Journal of Remote Sensing* 24, 20: 3983–4002.
- Petit, C. C., Lambin, E. F. 2001. Integration of multi-source remote sensing data for land cover change detection. *International Journal of Geographical Information Science* 15, 8: 785–803.
- Peuquet, D., 1994. It's about time: A Conceptual framework for the representation of temporal dynamics in Geographic Information Systems. *Annals of the Association of American Geographers* 84, 3: 441–461.
- Radiometric Correction of Satellite Images: When and why radiometric correction is necessary 2006. <http://cwcaribbean.aoml.noaa.gov/bilko/module7/lesson3/> (17.2.2006).
- Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J., Aguado, I. 2003. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 41, 5: 1056–1061.
- Richards, J.A. 1986. Remote sensing digital image analysis. An introduction. Berlin - Heidelberg, Springer-Verlag: 281 str.
- Richter, R. 1996. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region. *Computers & Geosciences* 22: 675–681.
- Richter, R. 2006. ATCOR for IMAGINE 9.1. München, Geosystems: 107 str.
- Ridd, M.K., Liu, J. 1998. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote Sensing of environment* 63: 95–100.
- Sabins, F.F. 1996. Remote sensing – principles and interpretation. New York, W.H. Freeman: 494 str.
- Schott, J.R., Salvaggio, C., Volchok, W.J. 1988. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sensing of Environment* 26: 1–16.
- Singh, A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 10: 989–1003.
- Skumavec, D., Šabić, D. 2005. Pokrovnost tal v Sloveniji 1993-2001 = Land cover in Slovenia 1993-2001. Statistični urad Republike Slovenije. <http://www.stat.si/doc/pub/tr-815-05.pdf> (28.5.2007).
- Smith, J.A., Tzeu Lie Lin, T.L., Ranson, K.J. 1980. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogrammetric Engineering of Remote Sensing* 46: 1183–1189.
- Snodgrass, R.T. 1997. Temporal databases. V: Frank, A., Kuhn, W. in Haunold, P. (ur.) Temporal data in geographic systems. TU Vienna: str. 189–231.
- Songh, C., Woodcock, C.E., Seto, K.C., Lenney, M.P., Macomber, S.A. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment* 75: 230–244.
- SSKJ, 1994. Slovar slovenskega knjižnega jezika. Ljubljana, Državna založba Slovenije.
- Šumrada, R. 2005. Tehnologija GIS. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 300 str.
- Sunar, F. 1998. An analysis of changes in a multi-date data set: a case study in the Ikitelli area, Istanbul, Turkey. *International Journal of Remote Sensing* 19: 225–235.
- Teillet, P.M., Guindon, B., Goodenough D.G. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 8: 84–106.
- Townshend, J.R.G., Justice, C.O., Gurney, C., McManus, J., 1992. The Impact of Misregistration on Change Detection. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing* 30, 5: 1054–1060.
- Tukey, J.W. 1977. Exploratory data analysis. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley: 688 str.
- Tutin, T. 2004. Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing* 25, 10: 1893–1924.

- Vasiliev, I. 1997. Design issues to be considered when mapping time. V: Frank, A., Kuhn, W. in Haunold, P. (ur.). Temporal data in geographic systems. Vienna, TU Vienna: str. 245–256.
- Veljanovski, T. 2002. Prenos napak in sledljivost položajne natančnosti podatka v prostorskem modeliranju. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 87 str.
- Veljanovski, T. 2003. Poravnava daljinsko zaznanih podob: večsenzorske, večspektralne in veččasovne registracijske tehnike. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 151 str.
- Veljanovski, T., Oštir, K. 2004. Poravnava daljinsko zaznanih podob: pregled in ovrednotenje samodejnih registracijskih tehnik. V: Podobnikar, T., Perko, D., Krevs, M., Stančič, Z., Hladnik, D., Čeh, M. (ur.). Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2003-2004: str. 303–316.
- Veljanovski, T., Oštir, K., Zakšek, K. 2007. Impact of atmospheric and topographic pre-processing on Landsat image characteristics.
http://www.eurac.edu/NR/rdonlyres/10055A9D-3B1D-458C-97DE-E492C0BED63C/0/TN_Veljanovskietal.pdf (15.3.2007).
- Vincini, M., Frazzi, E. 2003. Multitemporal evaluation of topographic normalization methods on deciduous forest TM data. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 41, 1: 2586–2590.
- Vrščaj, B. 2006. IRENA 12 Sprememba rabe zemljišč. Izbrani kazalci za področje kmetijstva in okolja. Ljubljana, Kmetijski inštitut Slovenije in Agencija Republike Slovenije za okolje.
- Watkins, T. 2007a. Principal Component Analysis in Remote Sensing.
<http://www.sjsu.edu/faculty/watkins/princmp.htm> (10.3.2007).
- Watkins, T. 2007b. The Tasseled Cap Transformation in Remote Sensing.
<http://www.sjsu.edu/faculty/watkins/tassel.htm> (10.3.2007).
- Weiss, E., Marsh, S.E., Pfirman, E. S. 2001. Application of NOAA-AVHRR NDVI time-series data to assess changes in Saudi Arabia's rangelands. *International Journal of Remote Sensing* 22, 6: 1005–1027.
- Wolfram, 2007. History of cellular automata.
<http://www.wolframscience.com/reference/notes/876b> (12.2.2007).
- Worboys, M.F. 1992. Object-oriented models of spatiotemporal information. *Proceedings of GIS/LIS92* 2: 825–834.
- Worboys, M.F. 1997. Unifying the spatial and temporal components of geographical information. V: Frank, A., Kuhn, W. in Haunold, P. (ur.). Temporal data in geographic systems. Vienna, TU Vienna: str. 113–125.
- Yuan, D., Elvidge, C.D. 1993. Application of relative radiometric rectification to Landsat data for use in change detection. *Workshop Proceedings Atmospheric Correction of Landsat Imagery*. Defense Landsat Program Office, Torance, California: str. 162–166.
- Yuan, D., Elvidge, C.D. 1996. Comparison of relative radiometric normalization techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 51: 117–126.
- Yuan, D., Elvidge, C.D. 1998. NALC land cover change detection pilot study: Washington D.C. area experiments. *Remote sensing of environment* 66: 166–178.
- Zakšek, K. 2007. Air temperature determination from Land surface temperature model of high spatial and temporal resolution. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: 143 str.
- Zakšek, K. 2006. Analiza vidnosti s prostorskim kotom odprtega neba. *Geografski vestnik* 78, 2: 97–109.

PRILOGE

PRILOGA A: TEORETIČNO OZADJE POSTOPKOV OBDELAVE DALJINSKO ZAZNANIH PODATKOV

- A1 Kalibracija senzorja in točnost zaznave podatkov daljinskega zaznavanja
- A2 Registracija podob
- A3 Modeliranje atmosferskih pogojev in prenosa energije
- A4 Metoda ujemanja gruč
- A5 Dozierjeva metoda ali metoda IPW
- A6 Spektralni indeksi

PRILOGA B: SEZNAM POSNETKOV IN NJIHOVIH LASTNOSTI

PRILOGA C: PROGRAMSKE REŠITVE

PRILOGA D: REZULTATI ANALIZ

PRILOGA A: TEORETIČNO OZADJE POSTOPKOV OBDELAVE DALJINSKO ZAZNANIH PODATKOV

- A1 Kalibracija senzorja in točnost zaznave podatkov daljinskega zaznavanja
- A2 Registracija podob
- A3 Modeliranje atmosferskih pogojev in prenosa energije
- A4 Metoda ujemanja gruč
- A5 Dozierjeva metoda ali metoda IPW
- A6 Spektralni indeksi

A1 KALIBRACIJA SENZORJA IN TOČNOST ZAZNAVE PODATKOV DALJINSKEGA ZAZNAVANJA

Kalibracija senzorja in ovrednotenje točnosti zaznave sta postopka s katerima se pri praktičnem delu s satelitskimi posnetki uporabniki ne srečujemo, sta pa temeljna za razumevanje lastnosti podatkov daljinskega zaznavanja. Še posebej tistih lastnosti, ki povzročajo radiometrične razlike med posnetki.

Rezultat postopka je radiometrična in geometrična konsistentnost (poenotenje) po celotnem posnetku. Poglejmo podrobneje, kako oba koraka to zagotavljata.

1.1 Kalibracija senzorja

Glavni elementi kalibracije senzorja so (Optical Imaging Systems, 2006; NASA, 2006; Liang, 2004):

- absolutna radiometrična kalibracija,
- relativna radiometrična kalibracija (poenotenje),
- spektralna kalibracija in
- geometrična kalibracija.

Z *absolutno radiometrično kalibracijo* določimo odziv sistema na znane nadzorovane vhodne signale. Sistemi za daljinsko zaznavanje so zasnovani tako, da radiometrične značilnosti (signale) tarč, ki so predmet zanimanja, zbirajo le v območju, kjer je znano, da je izhodni signal v linearnem sorazmerju z vhodnim signalom (glej sliko 1). Senzor tako za vsak spektralni kanal zabeleži nekakšen svetlostni ton ali t. i. digitalni nivo signala (digital signal level, *DSL*), ki je v linearni zvezi z vhodnim signalom (to je največkrat kar sevanje ali radianca *L*). Povezana sta z naslednjo enačbo (Optical Imaging Systems, 2006):

$$DSL = G \cdot L + D, \quad (1)$$

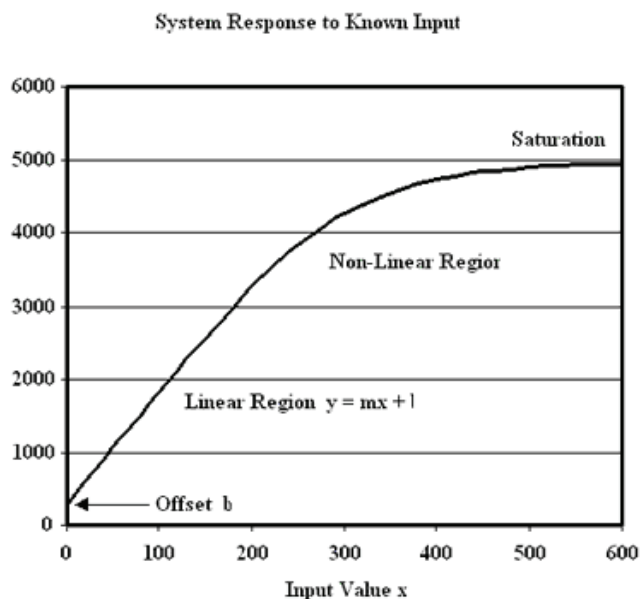
kjer je *DSL* digitalni nivo signala (tudi: kvantizirana kalibrirana vrednost signala QCAL), ki ga zazna senzor, *G* količina prirastka (angl. gain) in *D* temni tok (angl. dark current) oziroma prispevek elektronskega šuma v senzorju.

Senzor torej ustvari podobo z zaznanimi vrednostmi *DSL*, te vrednosti pa nato lahko pretvorimo v fizikalne količine, podobo sevanja *L*, in sicer z obračanjem enačbe 1:

$$L_k = \frac{DSN_k - D_k}{G_k}, \quad (2)$$

$k = 1 \dots 7$ ali 8 (spektralni kanali) za Landsat TM ali ETM+.

Torej sta *G* in *D*, v ustreznih enotah, potrebna koeficienta za radiometrično kalibracijo vsakega posameznega spektralnega kanala senzorja. Njune vrednosti se v sorazmerju s časom nekoliko spreminjajo, in sicer kakor senzor izgublja občutljivost (Optical Imaging Systems, 2006; Markham et al., 2003; Chander in Markham, 2003; 2007). Na opisan način se senzor nastavi v postopku kalibracije pred izstrelitvijo satelita.



Slika 1: Hipotetična krivulja kalibriranega odziva, z območjem, kjer je zveza linearna. Linearno zvezo opisujeta funkcijska parametra: naklon m in presečišče b (vir: Optical Imaging Systems, 2006).

Figure 1: Hypothetical calibration response curve, with linear relationship region of slope m and intercept b (source: Optical Imaging Systems, 2006).

Relativna radiometrična kalibracija ali poenotenje poskrbi za to, da med kalibracijskim postopkom določimo, kako se sistem odziva na signale, ki prihajajo iz različnih delov posnetka (Optical Imaging Systems, 2006). Pri tem igra pomembno vlogo optika sensorja ter sistem delovanja detektorjev v sensorju. Leče namreč vplivajo tako, da je svetloba, ki jo leče prepuščajo proti sistemu detektorjev, manjša, bliže ko je robovom leč. Vpliv uporabe sistema detektorjev pa je v tem, da imajo vpleteni (aktivni) detektorji lahko različen odziv na isti nivo vhodnega signala, kar lahko povzroči, da se po podobi pojavljajo »proge« (angl. striping). Z relativno radiometrično kalibracijo odpravljamo opisane pojave in s tem dosežemo enotnost po podobi, tj. poenotenje za celotno vidno polje sensorja.

Spektralna kalibracija predstavlja določitev odzivnosti sensorja na svetlobo pri različnih valovnih dolžinah (Optical Imaging Systems, 2006). Postopek spektralne kalibracije temelji na merjenju intenzitete znanega signala (znane valovne dolžine) v celotnem razponu valovne dolžine, in sicer kot odziv na funkcijo valovne dolžine. Odzivna funkcija se meri in določa za vsak spektralni kanal, in sicer pred izstrelitvijo satelita v tirnico. Pomembno namreč je, da poznamo lego in širino vsakega spektralnega kanala, kot tudi da razumemo zunanje prispevanje, torej prispevke iz drugih spektralnih kanalov.

Geometrična kalibracija skrbi za odpravljanje napak, ki so posledica odklonov v optičnem sistemu ali neporavnosti zaradi zajema z več diskretnimi detektorji (Optical Imaging Systems, 2006). Geometrični odkloni so tako lahko prisotni ali med različnimi spektralnimi kanali ali med informacijami različnih detektorjev. Testiramo jih tako, da opazujemo ravnost oziroma ukrivljenost vrstic v podobi ter geometrijo poznanih zemeljskih tarč.

Trenutno so, žal, le redki posnetki opremljeni z indikatorji o točnosti podatkov, najsi radiometričnih najsi geometričnih, tako da uporabnik lahko prenos napak omili le tako, da tudi sam izpelje ustrezne kalibracijske postopke (popravke) in tako preverja točnost podatkov.

Kalibracijske postopke sensorja delimo na (Optical Imaging Systems, 2006; NASA, 2006):

- kalibracija pred izstrelitvijo satelita (angl. prelaunch calibration),
- kalibracija na krovu po izstrelitvi satelita (angl. onboard calibration) ter
- nadomestna kalibracija (angl. vicarious calibration).

Kalibracija pred izstrelitvijo satelita poteka v nadzorovanih pogojih v laboratoriju. Sensorje se podrobno testira, in sicer z vidika radiometričnih, spektralnih, polarimetričnih in geometričnih lastnosti. Oprema, čas in trud za takšno testiranje so znatni, vendar s tem lahko pridobimo pomemben vpogled v kakovost delovanja in učinkovitost sensorja. Takšna informacija nadalje pripomore k stabilnosti operacij v življenjski dobi ali misiji satelita, ko je ta umeščen v svoji tirnici.

Kalibracija na krovu po izstrelitvi satelita, ki bi bila primerljiva s kalibracijo pred izstrelitvijo, bi bila zagotovo najbolj učinkovita kontrola delovanja sensorja, vendar zaradi številnih razlogov to nikdar ni mogoče. Kljub temu se delovanje sensorja na krovu skuša oceniti z začasnimi kontrolami spektralnih, polarimetričnih in geometričnih lastnosti sensorja. V ta namen se uporabi radiometrične referenčne tarče, kot so luč na plovilu in/ali odbojne panoje, točko globoko v vesolju, Sonce in Luno.

Nadomestna kalibracija se nanaša na tehnike, ki uporabljajo svetle in homogene naravne ali umetne točke/tarče na površju Zemlje (npr. suho rečno korito ali peščena plaža), za kalibracijo sensorjev po izstrelitvi. Gre za primerjavo teh tarč kot jih zajame senzor, ki bo kalibriran ter en ali več poznanih, dobro kalibriranih (referenčnih) sensorjev na satelitih ali na nosilcih v zraku ali na tleh. Na podlagi primerjave podatkov o isti tarči je razliko mogoče prenesti v posodobitev kalibracijskih koeficientov proučevanega sensorja.

Cilj kalibracije je torej pridobiti parametra prirastek (angl. gain) in zamik (angl. bias, offset) za vsak detektor in za vsak spektralni kanal. Opisani trije postopki se razlikujejo predvsem po tem, katere podatke uporabljajo za kalibracijo.

Kalibracijski postopki so sicer strogo zapovedani, vendar se pogosto zgodi, da se testiranje in kalibracija sensorja izvajata mesece ali celo leta preden se senzor zares znajde v vesolju (Optical Imaging Systems, 2006; NASA, 2006; Markham et al., 2003; Chander in Markham, 2003; 2007). V času, ko senzor umeščen na svoji tirnici opravlja delo, se lastnosti sensorjevih detektorjev in filtrov pogosto spremenijo in tako kalibracija pred izstrelitvijo satelita za dani senzor ni več optimalna. Navzlic testiranju v termalnem vakuumu v laboratoriju, je senzor po izstrelitvi satelita postavljen v novo okolje, kar skupaj z učinki staranja pred in po izstrelitvi vodi k degradaciji odzivnosti v času. To pravzaprav velja za vse sensorje, ki so nameščeni na Zemljinih opazovalnih satelitih. Predvsem pa za starejše posnetke, kjer delovanje sensorjev ni bilo venomer dosledno nadzorovano in zabeleženo. Zaradi opisanih težav so lahko tudi podatki (posnetki) istega opazovalnega sistema radiometrično nedosledni.

1.2 Točnost zaznave

Točnost zaznave ali zanesljivost produktov daljinskega zaznavanja zajema tri korake (Optical Imaging Systems, 2006):

- pridobitev podob daljinskega zaznavanja in izpeljava ocene pridobljenih informacij iz podob z uporabo ustreznih algoritmov,
- pridobitev neodvisnih meritev, idealno je, če so to spektrografske terenske meritve na površju za vzorce na danem območju, ki niso bile vključene v razvoj samih algoritmov predobdelave posnetkov,
- za identične (ali podobne) lokacije in čase se opravi primerjava informacij o podobah in ocena glede na neodvisne meritve.

Cilj postopka točnosti zaznave je pridobiti končno oceno kakovosti oziroma oceno natančnosti satelitskega posnetka (Optical Imaging Systems, 2006), kot ga uporabnik dobi v roke (npr. natančnost podobe je 95 % v ravninskih predelih in 90 % v hribovitih predelih ali podobno). Seveda postopek ni enostaven, največji problem običajno predstavlja manjko meritev na površju, s čimer bi sicer najbolj kakovostno lahko določili točnost in odmike informacij zbranih na nekem posnetku tako v spektralnem kot geometričnem smislu. Dodatno pa takšno oceno otežuje tudi vpliv t. i. zunanjih parametrov, ki prav tako učinkujejo na natančnost dobljenih rezultatov (in bi potemtakem morali biti obravnavani v oceni točnosti zaznave postopka). Med omenjene zunanje parametre štejemo kot osvetlitve (Sonca na površje Zemlje), kot pogleda (senzorja na površje), atmosferske pogoje, topografske učinke, lastnosti površja in ostale, ki jih obravnavajo poglavja 3.3 do 3.6.

A2 REGISTRACIJA PODOB

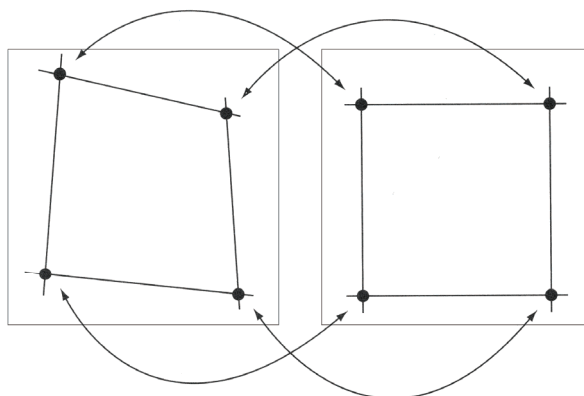
S poravnavo podob umestimo novo podobo v izbran koordinatni sistem, in sicer preko primerjave z že georeferencirano ali poravnano podobo. Cilj je odpraviti neskladja, ki so posledica kota in časa snemanja ter vpliva oblike reliefa. Lahko gre za odpravljanje razmeroma zapletenih in po podobi neenakomerno in nelinearno razporejenih popačenj, lahko pa za določen zasuk in/ali premik. Ker je situacij in kombinacij poravnave zaradi različnih okoliščin in namenov (poravnava med različnimi satelitskimi sistemi, različnimi senzorji, različnim časom zajema) veliko, se registracijske tehnike razlikujejo predvsem v načinu in algoritmih iskanja značilnih (kontrolnih) točk ter mere za ovrednotenje kakovosti (mere podobnosti) parov kontrolnih točk (Brown, 1992; Fonseca in Manjunath, 1996; Toutin, 2004; Girard in Girard, 2001; Oštir, 2006). Vsem registracijskim tehnikam je skupen splošen postopek registracije, ta zajema štiri korake (Brown, 1992, Fonseca in Manjunath, 1996):

- prepoznavanje značilnih predmetov,
- ujemanje predmetov (slika 2),
- prostorska transformacija (slika 3) ter
- interpolacija ali prevzorčenje poravnane podobe.

Prvi korak, *prepoznavanje značilnih predmetov*, predstavlja strategijo za iskanje in določanje značilnih predmetov, na katerih bodo slonele kontrolne točke. Najpogosteje izbiramo med: primerjavo na osnovi intenzitetnih vrednosti, kontrastov in gradientov, izločanjem robov ali kontur, značilnih površin ali območij, določanjem in iskanjem karakterističnih predmetov kot so npr. ogljišča, križišča ali preseki linij in ostri prevoji krivulj, pa potem določanjem na osnovi medsebojnih odnosov ter višje stopenjskih struktur in semantičnih opisov ter določanjem značilnih predmetov in, redkeje, primerjavo na t. i. shematski model (v primeru poravnave satelitskih posnetkov površja npr. na elemente topografske karte območja). Prostor značilnih predmetov nam določa na čem bo potekal postopek ujemanja. Dejstvo je, da pravilna in dobra izbira prostora značilnih predmetov izrazito poveča kakovost registracije ali poravnave podob. Predvsem je to pomembno, kadar je ta prostor izbran tako, da omogoča določeno ignoranco variacij, ki bi sicer lahko bile zelo moteče ali pa bi celo onemogočale določitev ujemanja značilnih predmetov.

Drugi korak registracije, *ujemanje predmetov*, je določitev in izbira merila za ugotavljanje podobnosti/ustreznosti med značilnimi predmeti. S prvim korakom je v tesni zvezi, kar nadalje pomeni, da obstajajo smiselne kombinacije obeh izbir. Tako so npr. nekatere uveljavljene kombinacije naslednje:

- strukture izstopajočih/karakterističnih predmetov (tj. nespremenljive lastnosti podobe) se najpogosteje izločajo ob sočasni uporabi statičnih mer podobnosti kot so križna korelacija s predhodnim filtriranjem ali brez, seštevek absolutnih razlik in/ali fazna korelacija v frekvenčni domeni;
- strukture kot so robovi, obrisi ali meje, torej po geometričnih lastnostih krivulje in območja, običajno zahtevajo mere podobnosti, ki temeljijo na vsoti kvadratov razlik med sosednjimi točkami;
- strukturne in sintaktične metode uporabljajo še bolj specializirane mere podobnosti, da lahko preverjajo lastnosti tako določenih predmetov, za primer pa lahko služi mera minimalne spremembe v entropiji.

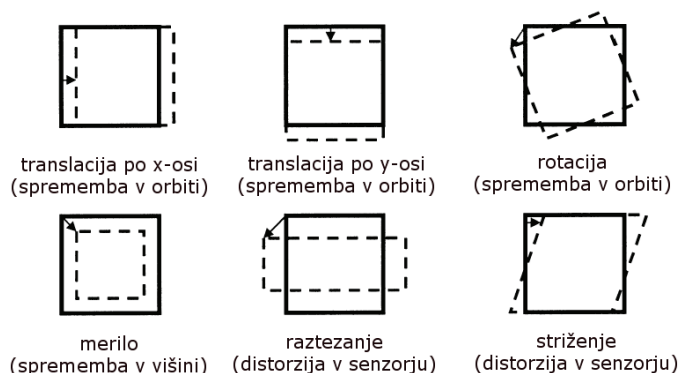


Slika 2: Princip prostorske relokacije slikovnih elementov z uporabo veznih (kontrolnih) točk.

Figure 2: Pixel spatial relocation principle on the basis of control points identification.

Kombinacije (in s tem izbira mere podobnosti) so zelo pomembne, ker odločajo o tem kako bo transformacija določena oziroma odločijo o tem kaj se ujema in kaj ne. Informacija, ki se v prvem koraku izloči za značilne predmete na obeh podobah, se v drugem koraku ovrednoti. Kriterij, ki ga postavimo za ustrezno mero podobnosti, torej izloči optimalna ujemanja in zavrže slaba. Mera podobnosti tako določa test ustreznosti za vsako možno ujemanje. Pri tem dobra kombinacija poskrbi tudi za pravilno in učinkovito obravnavanje vplivov šuma/variacij na registracijo.

Tretji korak, *iskalni prostor*, je skupina ali prostor vseh možnih *transformacij*, izmed katerih želimo izbrati tisto, ki bo v danem primeru najbolje poravnala podobi. Glede na to, kakšen tip deformacij predvidevamo (slika 3), v osnovi razlikujemo globalni model ali globalni iskalni prostor ter lokalni model oziroma lokalni iskalni prostor (slika 4).

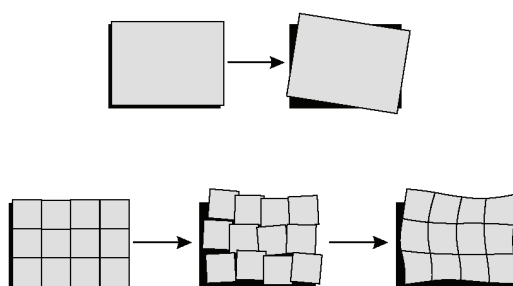


Slika 3: Elementi možnih prostorskih transformacij digitalne podobe pri registraciji.

Figure 3: Possible spatial transformation elements for digital images in image registration procedure.

Vrsta vzroka ali deformacija, zaradi katere podoba ni ustrezno poravnana z neko drugo, določa tip transformacije (slika 4). Transformacija je v primeru registracije način preračuna

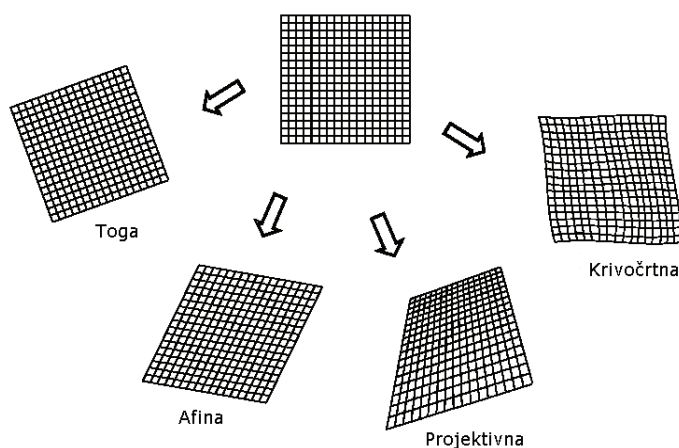
lokacij točk ali slikovnih elementov iz ene podobe v nove (poravnane) lokacije v drugi podobi. Če z enotno enačbo prekartiramo celotno podobo, pravimo takšni transformaciji globalna transformacija. Enačba pri tem je funkcija lokacij prve podobe, in velja za vse dele podobe. Glavna lastnost torej je, da parametri transformacijske funkcije niso odvisni od specifične lokacije. Med najbolj tipične primere globalnih transformacij uvrščamo (slika 5): afino, projektivno, perspektivno in polinomsko transformacijo. V določenih situacijah, pri posebnih lastnostih podob, pa potrebujemo bolj lokalni pristop, kjer posamezne predele podobe prekartiramo ločeno in neodvisno od ostalih predelov, po t. i. lokalnih transformacijah.



Slika 4: Shema globalne (zgoraj) ter lokalne poravnave podob (spodaj).

Figure 4: Scheme of global (upper) and local (lower) transformation in image registration.

Četrty korak, *interpolacija ali prevzorčenje poravnane podobe*, omogoča izbiro načina prekartiranja poravnane podobe glede na opredeljeno transformacijo. Najpogosteje izbiramo med interpolacijo z metodo najbližjega soseda, bilinerano interpolacijo ter kubično konvolucijo. Med seboj se razlikujejo predvsem po tem, koliko in katere elemente sosedstva upoštevajo v preračunu za nove svetlostne vrednosti (poravnane) podobe.



Slika 5: Tipični primeri globalnih transformacij.

Figure 5: Typical examples of global transformations.

Satelitske podobe imajo običajno geometrijska popačenja takšne narave, da se na podobi bolj ali manj enakomerno stopnjujejo v neki smeri (sistematično), na primer proti ali stran od roba podobe (kar izhaja iz načina in lastnosti sistemov zajema). Takšna popačenja lahko odpravljamo z globalnim modelom, in tako tudi polinomske metode običajno dajo zadovoljliv rezultat. Nasprotno, letalski posnetki, predvsem zaradi več variabilnosti/nestabilnosti pri samem snemanju) vsebujejo bistveno več lokalnih popačenj. Zato se v fotogrametriji za odpravljanje geometričnih napak pogosteje uporabljajo lokalne metode (Girard in Girard 1999).

Iskalna strategija opredeljuje način ali izvajalni prostor celotnega modela registracije. Različne programske arhitekture iskalnih strategij omogočajo optimalno reševanje vrste registracijskih nalog, poskrbijo za izvedbeno učinkovitost in skrbijo za kakovost registracijske tehnike. Primeri iskalnih strategij so: sekvenčno odločanje, relaksacijsko ujemanje, hierarhične metode, odločitvena drevesa in ujemanje grafov, dinamično ali linearno programiranje itn. Praviloma gre za zelo kompleksne programske rešitve.

Registracija podob je samodejen postopek, izvajamo jo z registracijskimi programi, ki običajno vsebujejo več povezanih modulov: modul za iskanje in ovrednotenje kontrolnih točk, modul za transformacijo ter modul za prevzorčenje ali prekartiranje poravnane podobe (Fedorov et al., 2002). Iz pregleda registracijskih metod se je pokazalo (Veljanovski, 2003; Veljanovski in Oštir, 2004), da področje registracije podob ni preprosto, saj prav posebnosti podob daljinskega zaznavanja (gibanje opazovalnih sistemov, raznolikost senzorjev, časovnost zajema in podobno) narekujejo iskanja algoritmov, ki so lahko učinkoviti za tako različne situacije. Cilj vseh je čimbolje obvladovati lastnosti podobe, znati »prebrati« in »spustiti« moteče šume na podobi ter najtežja naloga – najti zadostno število dovolj kakovostnih kontrolnih točk. Na osnovi pregledane literature in virov se pokaže, da vse v enem (eni tehniki) ni mogoče, zato je treba tudi med registracijskimi tehnikami najti tisto, ki je najbolj primerna za delovanje na lastnostih, ki jih imata referenčna in poravnana podoba.

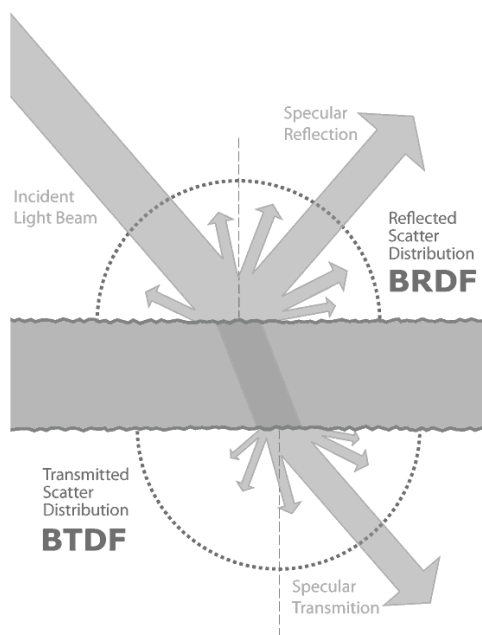
Pri uporabi samodejnih algoritmov za poravnavo podob, je smiselno poznati kdaj in zakaj so določene tehnike iskanja značilnih predmetov ali kontrolnih točk ustrezne in kdaj in zakaj ne. Ugotoviti je torej treba (Veljanovski, 2003; Veljanovski in Oštir, 2004):

- kako učinkovite so različne tehnike pri določenih tipih popačenj (zasuk, prekrivanje, razteg, premik),
- kako in kdaj jih lahko zmoti preveliko popačenje (robustnost tehnike),
- v katerih okoliščinah so posamezne tehnike iskanja kontrolnih točk najbolj učinkovite,
- kakšna je dejanska položajna natančnost poravnanih podob (ne samo statistična ocena),
- za koliko, in na kakšen način to lahko določamo (kateri kazalci nam to najbolj podajajo), se poravnana podoba razlikuje od svojega originala (kakšen vpliv ima na spektralne in geometrijske lastnosti podobe).

Georeferenciranje je torej postopek s katerim posnetek umestimo v izbran koordinatni sistem. Registracija podob pa je postopek s katerim dva satelitska posnetka, preko ustrezne primerjave, natančno preložimo enega čez drugega. Pri tem dosežemo, da istim predmetom oziroma območjem na zemeljskem površju, ki so jih zaznali senzorji na obeh posnetkih, ustrezajo (konvencionalno) enake koordinate.

A3 MODELIRANJE ATMOSFERSKIH POGOJEV IN PRENOSA ENERGIJE

Metode modeliranja atmosferskih pogojev skušajo oceniti odboj piksla (tarče), ki doseže senzor. Ta problem rešujejo zapleteni numerični modeli, ki jim je skupno to, da prenos energije določajo na podlagi ene od različic (slika 6) dvosmerne funkcije porazdelitve odboja (angl. bidirectional reflectance distribution function, BRDF) ter da za njeno določitev uporabljajo številne podatke o stanju atmosfere v času snemanja.



Slika 6: Skica dvosmerne funkcije porazdelitve odboja, BRDF (vir: Bidirectional reflectance distribution function, 2006).

Figure 6: Scheme of bidirectional reflectance distribution function, BRDF (source: Bidirectional reflectance distribution function, 2006).

Dvosmerna funkcija porazdelitve odboja (BRDF), označimo jo z $f_r(\Omega_e, \Omega_i)$, opisuje delež odbitega valovanja na dani površini v določeni smeri (določen z vektorjem Ω_e) glede na vpadno valovanje iz smeri Ω_i , pri dani valovni dolžini. Prvi jo je definiral F. Nicodemus leta 1970 (Bidirectional reflectance distribution function, 2006; Richter, 2006; Liang, 2004). Zaradi prostorskega kota (tj. trirazsežni kot oziroma kot površine sfere), ki se meri v steradianih (sr), ima BRDF enoto prostorskega kota sr^{-1} . Spektralna BRDF, označimo jo z $f_r(\lambda, \Omega_e, \Omega_i)$, ki opisuje BRDF kot funkcijo valovne dolžine λ , ima enoto $\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$.

BRDF je pravzaprav optična lastnost opazovane površine materiala, vendar ne gre za fizikalno količino, ki bi jo lahko izmerili, saj je po definiciji določena preko neskončno majhnega prostorskega kota v obeh smereh, proti viru osvetlitve in proti opazovalcu (senzorju). Mogoče pa jo je modelirati na podlagi količin, ki jih integriramo preko para prostorskih kotov: od vira proti poljubnemu opazovalcu. BRDF ima na ravnih (gladkih)

površinah nekaj zelo dobro definiranih lastnosti, še posebej to, da je recipročno simetrična. To pomeni, da je njena vrednost enaka, tudi kadar je smer vir – opazovalec zamenjana. To pa ne drži za strukturirane oziroma sestavljene površine. Zato je veliko raziskav opravljenih prav za določitev dobrih modelov, ki to razmerje empirično ali na podlagi primerljivih fizikalnih meritev opisujejo za različne naravne površine.

Pogosto se za matematično funkcijo, ki opisuje način, kako se valovanje razprši na površini, uporablja tudi izraz dvosmerna funkcija porazdelitve sipanja (angl. bidirectional scattering distribution function, BSDF). V praksi pa se izkaže (slika 6), da gre za obravnavo prenosa energije v tem smislu, da se funkcija deli na dve komponenti: odbito (od površine) in oddano (ki pronica skozi površino), ki ju nato obravnavamo ločeno kot BRDF in BTDF (angl. bidirectional transmittance distribution function). Za daljinsko zaznavanje je torej zanimiv prenos tiste energije, ki se odbije v smeri proti senzorju.

A4 METODA UJEMANJA GRUČ

Glavni problem pri večini metod atmosferske korekcije, ki so obravnavane v poglavju 3.5.2, je, da je določitev optične globine aerosolov vezana na neke specifične pogoje oziroma razlike. Metoda ujemanja gruč skuša to pomanjkljivost premostiti, in sicer na tak način, da v prvo vrsto postavi pridobivanje ocene prostorske razporeditve obremenitve ozračja z aerosoli v splošnih pogojih. Poleg tega vpeljuje tudi tretjo komponento energijskega ravnovesja – atmosferski popravek za učinek sosedstva (angl. adjacency effect). Metoda je verjetno najbolj učinkovita, a v primerjavi z doslej predstavljenimi tudi najbolj zapletena za uporabo.

Če želimo natančneje določiti učinke aerosolov, moramo poleg optične globine aerosolov oceniti tudi posamičen albedo sipanja in fazno funkcijo (Liang, 2004; Richter, 2006). Zadnji dve spremenljivki lahko določimo na podlagi klimatoloških podatkov o aerosolih (te bodo v prihodnosti lahko zagotavljali tudi sateliti, kot sta MODIS in MISR). Ta atmosferska korekcija poteka v treh korakih:

- ocena optične globine aerosolov,
- popravek učinka sosedstva in
- obnova odboja površja.

Algoritem, ki ga ta tehnika uporablja za *oceno optične globine aerosolov*, je podoben tehniki ujemanja histogramov, s to razliko, da ujemanje histogramov ne poteka med območji čistega ozračja in megličastimi območji. Sloni namreč na predpostavki, da je povprečen odboj vsakega tipa pokrovnosti, pod različnimi atmosferskimi pogoji (tj. od čistega do megličastega ozračja), enak. Ker so IR kanali (kanali 4, 5 in 7) manj občutljivi na prisotnost aerosolov, se te tri kanale uporabi za klasifikacijo pikselov v razrede pokrovnosti. Ujemanje histogramov povprečnega odboja se izvrši ločeno v vseh vidnih kanalih (kanali 1-3). Sledi proces glajenja in ocena končne optične globine aerosolov.

Če pa je ozračje nasičeno z aerosoli in so prisotni tudi tanki oblaki, potem so tudi v IR kanalih (4, 5 in 7) prisotne posledice sipanja v ozračju. V tem primeru je treba najprej opraviti prilagajanje odboja v IR kanalih z ujemanjem histogramov, nato pa opravimo analizo gruč. Uporabimo lahko katerokoli tehniko (K-Means ali druge), število razredov pa mora biti razmeroma veliko (od 20 do 50), odvisno od tega, kako kompleksno je površje in koliko tipov pokrovnosti zato lahko pričakujemo.

V naslednjem koraku je treba ločiti območja s čistim ozračjem od območij z meglicami. Odvisno od lastnosti podob, uporabimo enega od treh načinov določanja megličastih območij:

- z uporabo četrte komponente Kauth-Thomasove transformacije – vendar metoda ni učinkovita, če je površje zelo svetlo;
- z določitvijo najvišjega odboja v vsaki gruči, nato pa s segmentacijo določimo območja najvišjega odboja in ta predstavljajo megličaste predele – vendar metoda ne dela dobro, če na podobi ni dovolj megličastih območij ter
- s prostoročno določitvijo (torej vizualno interpretacijo) območij meglic.

Na drugi strani, v vidnih kanalih, določimo odboj površja območij s čistim ozračjem, tako da uporabimo kriterij minimalnega odboja površja (tj. iščemo površine z majhnimi odbojnimi vrednostmi). V tem koraku lahko vnesemo določeno napako, katere velikost je odvisna

predvsem od svetlosti površja. Če pa obstajajo površine z nizko odbojnostjo, kot so gosta vegetacija, vodne površine ali mokra tla, potem je ta napaka zelo majhna.

Nato opravimo ujemanje povprečnega odboja vsake gruče v območjih s čistim ozračjem in v megličastih območjih. Glede na odboj površja lahko nato z vpoglednimi tabelami ocenimo optično globino aerosolov v megličastih območjih. Ker pa je optična globina aerosolov ponavadi »mehkeje« razporejena kot pa odboj površja, je smiselno ocenjeno optično globino aerosolov zgladiti s premičnim nizkoprepustnim filtrom velikosti okna 5 x 5.

Učinek sosedstva na površju je posledica kompleksnega večkratnega sipanja v sistemu ozračje – površje Zemlje. Nasploh učinek sosedstva bolj prizadene visoko ločljivostne podatke kot nizko ločljivostne podatke. Preprosto povedano gre za to, da ugotovimo kolikšen je v dani vrednosti piksla tudi prispevek sosednjih pikselov. Vrednost piksla je odvisna od neposrednega kontrasta, ki ga ima s svojimi sosedi, še zlasti, če ozračje ni čisto. Posledica odnosa sosedstva je, da se sicer temni piksli pokažejo svetlejši in svetlejši piksli temnejši. Na podobi se ta učinek kaže tako, da podobe delujejo zamegljene in imajo slabši kontrast. Z večanjem ločljivosti se problem sosedstva kaže kot učinek *med* sosednjimi piksli. Kadar je prostorska ločljivost majhna, pa gre za t. i. problem mešanja, kjer se problem sosedstva kaže kot učinek *znotraj* piksla.

Študije učinka sosedstva lahko razdelimo v dve večji skupini, in sicer takšne, ki (Kaufman, 1989; Liang, 2004):

- uporabljajo točkovno funkcijo razširjanja v atmosferi (angl. atmospheric point spread function, PSF), ki se določi ali na podlagi Monte Carlo simulacij ali simulacij prenosa, in funkcijo prilagajanja prenosa v atmosferi (angl. atmospheric modulation transfer function, MTF), ter takšne, ki
- razvijejo empirične formule.

Za prvo skupino je značilno, da so računsko zelo zahtevne, pri čemer doseženi rezultati niso nujno zadovoljivi – še posebej za uporabo na visoko ločljivih podobah. Problem je v tem, da v primeru »razgibane« atmosfere, kjer prevladuje večkratno sipanje ali pa če je odbojnost površja močna (intenziteta povratnega valovanja je namreč odvisna od odbojnosti površja), povratno valovanje ni enostavno konvolucija atmosferske PSF z odbojnostjo površja. Učinek sosedstva je značilen le kadar večkratna interakcija med atmosfero in površjem prevladuje. Račun se vrši v zapletenih numeričnih modelih, ki rešujejo t. i. trirazsežni prenos energije.

Prav zaradi računske zahtevnosti in ne dovolj dobre končne natančnosti ($\approx 75\%$), so različni avtorji skušali s simulacijami prostorske (pri različnih zenitnih kotih sonca) in atmosferske (pri različnih optičnih globinah aerosolov) heterogenosti prepoznati razmerja, ki bi jih lahko opisali s splošnim empiričnim funkcijskim odnosom (Tanré, 1981; Evans, 1999; Liang, 2001). Na tak način so za dvorazsežno (2D) funkcijo prenosa energije pridobili empirično utežno funkcijo $g(s)$, ki v konvoluciji s pravo stopenjsko funkcijo odboja površja $r(s)$ določa t. i. »efektivni« odboj r_e (Liang, 2001; 2004):

$$r_e = \int g(s) \cdot r(s) ds, \quad (3)$$

kjer je s razdalja od centralne lokacije. Koeficienti ustrezajoče empirične funkcije zasedejo naslednje vrednosti:

$$g(s) = f_1(\tau)^{e(-1.42352s)} + f_2(\tau)^{e(-12916.05s)}, \quad (4)$$

kjer je τ optična globina aeroslov ter sta $f_1(\tau) = 0.00289\tau$ in $f_2(\tau) = 0.0714189\tau^3 - 0.0610574\tau^2 - 0.439108\tau + 0.995683$.

Očitno je, da prvi člen v enačbi 4 predstavlja prispevek pikslov iz ozadja (okolice) in drugi člen prispevek trenutnega piksla in njegovih najbližjih sosedov. Prispevek iz okolice je v močni odvisnosti od optične globine aerosolov. Če je ta majhna (ozračje je zelo čisto) bo imel glavni prispevek k vrednosti piksla kar piksel sam. Z večanjem optične globine, se večja prispevek iz okolice (učinek sosedstva).

V trirazsežni obliki, ki je uporabna za podobe, zapišemo opisane empirične funkcije v diskretni obliki. »Efektivni« odboj na satelitski podobi r_e je:

$$r_e = \frac{\sum_i^N \sum_j^N r_{ij} g_{ij}}{\sum_i^N \sum_j^N g_{ij}}, \quad (5)$$

kjer je g_{ij} relativni prispevek piksla (i, j) in ga je mogoče integrirati iz enačbe 4 po pikslu (i, j) :

$$g_{ij} = \iint_{x_i, y_i} g(\sqrt{x^2 + y^2}) dx dy. \quad (6)$$

V enačbi 5 N predstavlja velikost okna v katerem vsi piksli prispevajo k vrednosti centralnega piksla in ga lahko določimo z mejno vrednostjo α (npr. $\alpha = 12$ pikslov):

$$r_e = \frac{\sum_i^\alpha \sum_j^\alpha r_{ij} g_{ij}}{\sum_i^\alpha \sum_j^\alpha g_{ij}}. \quad (7)$$

Pri testiranju učinkovitosti opisane metode so avtorji dokazali, da je metoda z empiričnimi funkcijskimi odnosi po kakovosti in točnosti rezultatov atmosferskih popravkov primerljiva s simulacijskimi metodami.

A5 DOZIERJEVA METODA ALI METODA IPW¹

Metoda temelji na Dozierjevem delu (1981; 1990) in za razliko od metod opisanih v poglavju 3.6.2, ki izhajajo izključno iz modeliranja geometrije opazovanja ter oblike reliefa, vpeljuje še nekatere druge spremenljivke. Metoda se razmeroma pogosto uporablja, saj je dostopna v odprtokodnem programskem sistemu IPW.

V osnovi izhaja iz formulacije, da je skupna vpadna kratkovalovna energija E seštevek treh komponent: direktnega sončevega obseva E_{DIR} , difuzne energije E_{DIF} in odboja iz soseske E_{SOSED} :

$$E = E_{DIR} + E_{DIF} + E_{SOSED}. \quad (8)$$

Direktni sončev obsev na horizontalni ravnini izrazimo takole:

$$E_{DIR_H} = \cos(\theta) E_0 e^{\left(\frac{-\tau_0}{\cos(\theta)}\right)}, \quad (9)$$

kjer je θ zenitni položaj Sonca, E_0 izven planetarno sončevo sevanje (angl. extraterrestrial solar irradiance) ali osončenost na vrhu ozračja in τ_0 optična globina atmosfere. Izven planetarno sončevo sevanje predstavlja vpadno sončevo energijo oziroma valovanje na vrhu ozračja. Odvisno je od astronomske razdalje med Soncem in Zemljo D , torej tudi od dneva v letu d_n . Če privzamemo, da je $\overline{E_0}$ sončevo sevanje pri srednji razdalji med Soncem in Zemljo $D = 1$, lahko za aproksimacijo izven planetarnega sončevega sevanja na katerikoli dan v letu uporabimo enačbo:

$$E_0 = \frac{\overline{E_0}}{D^2} = \overline{E_0} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi d_n}{365}\right) \right]. \quad (10)$$

Za določitev direktnega sončevega obseva na nagnjeni ravnini pa uporabimo enačbo:

$$E_{DIR_r} = \cos(\alpha) E_0 e^{\left(\frac{-\tau_0}{\cos(\alpha)}\right)}, \quad (11)$$

kjer torej zamenjamo zenitni položaj sonca θ za vpadni kot α .

Za modeliranje difuznega obseva na spremenljivem terenu metoda uporabi podatek o deležu vidnega neba *Sky* (angl. sky-view factor). Delež vidnega neba podaja razmerje oziroma delež difuznega obseva točke relativno glede na odprto horizontalno ravnino. Z drugimi besedami, med pobočji je difuzna osončenost z neba zmanjšana zaradi manjšega deleža vidnega neba²

¹ IPW: Image Processing Workbench: Sistem za obdelavo podob za okolje UNIX.
http://freegis.org/database/viewobj?obj=188&_ZopeId=34872907A23cTx5mhXc

² Ker zemeljsko površje načeloma ni omejeno z matematičnim horizontom, ampak s horizontom, ki ga omejuje relief, le ta vpliva tudi na difuzno osončenost. Na ravnini je poljubna ploskev bolj izpostavljena difuzni osončenosti kot v ozki dolini s temnimi pobočji, saj prihaja večina difuzne osončenosti iz neba, tega pa se na odprtem vidi neprimerno več. Ob predpostavki, da je difuzna osončenost izotropna – neodvisna od smeri, se kaže vpliv oblike reliefa v deležu vidnega neba, ki pove, koliko celotne nebesne poloble je vidno nad poljubno točko. Najprimernejša mera za izražanje deleža vidnega neba je prostorski kot. Prostorski kot poljubnega predmeta z izbranega opazovališča podaja razmerje med površino tega predmeta s krogelno

(za izračun glej npr.: Zakšek, 2006; 2007). Delež difuznega obseva je tako odvisen od naklona in usmerjenosti površja, deleža vidnega neba in izotropnega (angl. anisotropy), tj. neodvisno od smeri, širjenja difuznega obseva $F^\downarrow(\tau_0)$:

$$E_{DIF_H} = Sky \cdot F^\downarrow(\tau_0). \quad (12)$$

Za določitev deleža obseva odbitega od sosednjih lokacij metoda predpostavi, da ga je mogoče modelirati na osnovi razmerja povprečnega odbitega sevanja, ki ga prilagajamo preko t. i. konfiguracijskega faktorja terena C_T . Konfiguracijski faktor terena vključuje tako anizotropičnost obseva (osončenosti) kot vpliv geometrije med posamezno lokacijo (piksлом) in njeno okolico (sosedji). Ob predpostavki, da je odboj od površja izotropičen in da je delež vidnega neba na neskončno dolgem pobočju S , $(1 + \cos S)/2$, konfiguracijski faktor terena lahko aproksimiramo:

$$C_T \approx \frac{1 + \cos \theta_p}{2} - Sky, \quad (13)$$

kjer je θ_p naklon površja v dani točki. Odbita energija iz okoliškega terena (površja) pa je potem:

$$E_{SOSED_T} = C_T \cdot F^\downarrow(\tau_0) \cdot \bar{R}, \quad (14)$$

pri čemer je \bar{R} nekakšen ekvivalent odboja okoliškega površja.

Ker je osnovna ideja topografskih popravkov med drugim tudi pretvorba opazovane radiance v vsakem pikslu v odboj R , metoda ponudi naslednjo enačbo za ta izračun:

$$R = \frac{\pi L}{F} = \frac{\pi L}{\cos(\alpha) E_0 e^{(-\tau_0/\cos(\theta))} + (Sky + C_T \bar{R}) F^\downarrow(\tau_0)}. \quad (15)$$

Kakorkoli se zdi, da Dozierjeva metoda nemara najbolj kompleksno obravnava tako modeliranje geometrije opazovanja, predvsem pa lastnosti sončevega obseva površja, Liang (2004) navaja tudi nekatere pomanjkljivosti metode. Prva je predpostavka o izotropični porazdelitvi difuznega obseva (angl. sky radiance), saj je v naravi večinoma ravno drugače. Namreč piksli, ki imajo enak naklon, lahko prejmejo precej različen delež vpadnega sončevega obseva, če imajo različne usmerjenosti. Zaradi te posplošitve lahko račun za obnovo odboja površja vpelje tudi velike napake. Metoda je dodatno kritizirana tudi zato, ker ne ponuja alternative oceni direktnega sončevega obseva, ki ga ne moremo natančno določiti iz meteoroloških podatkov (klimatoloških pogojev ozračja). Kljub temu sem metodo na kratko predstavila, saj združuje modeliranje dveh sistemov, ki sta nedvomno močno povezana: geometrije opazovanja in širjenja sončevega obseva.

površino, ki ima polmer enak oddaljenosti opazovališča do predmeta. Če vidimo celotno nebesno poloblo, znaša delež vidnega neba 1, v primeru, da smo omejeni z reliefom ali rastjem, pa je ta delež manjši. Izračunamo ga iz povprečnega višinskega kota obzorja (Zakšek, 2006; 2007).

A6 KLASIFIKACIJA

Glavni namen klasifikacije satelitskih in drugih posnetkov je prepoznavanje predmetov na zemeljski površini. Z digitalno klasifikacijo določimo razrede rabe tal z upoštevanjem spektralnih informacij, to je opazovanjem svetlostnih tonov na večspektralnih posnetkih. Tako pri vizualni interpretaciji kot pri digitalni obdelavi skušamo piksele na podobi razdeliti v razrede ali skupine, na primer: voda, iglasti gozd, listnati gozd, koruza.

Postopek klasifikacije satelitskih posnetkov razdelimo na nekaj korakov (Jensen, 1996):

- izbira primernih posnetkov,
- predobdelava, če je potrebna,
- priprava testnih območij,
- razvrščanje v razrede,
- prepoznavanje razredov in
- ovrednotenje rezultatov.

Klasifikacijo posnetkov omogoča tako imenovani *spektralni podpis* ali spektralni odziv. To je značilen način odboja elektromagnetnega valovanja v odvisnosti od valovne dolžine. Na sliki 7 je prikazan spektralni podpis treh različnih tipov tal: vode, prsti (golih tal) in zelene vegetacije. Vidimo, da se odbojnost močno spreminja z valovno dolžino in prav odvisnost odboja od valovne dolžine je tista, ki omogoča določanje spektralnih lastnosti in s tem ločevanje med različnimi predmeti.

Spektralni podpis je značilna lastnost predmeta. Žal pri klasifikaciji nimamo na voljo celotnega podpisa predmeta, ki ga opazujemo. Namesto tega imamo množico diskretnih vrednosti, ki predstavljajo odboje v različnih kanalih uporabljenega senzorja. V splošnem velja, da večje število kanalov olajša ločevanje predmetov in s tem klasifikacijo. Seveda pa z nekritičnim dodajanjem informacij rezultatov vedno ne izboljšamo. V sosednjih kanalih imajo predmeti pogosto le rahlo različno odbojnost in torej ne prinašajo novih podatkov.

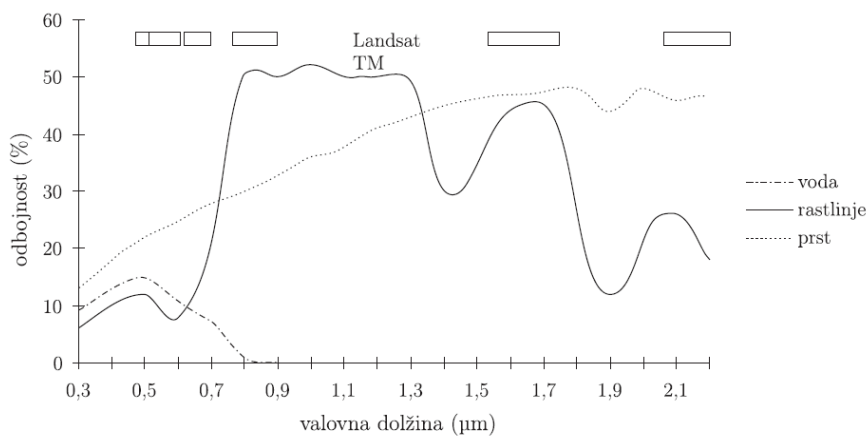
Kadar govorimo o razredih, moramo ločevati med informacijskimi razredi in spektralnimi razredi. Informacijski razredi so tiste kategorije, ki jih skušamo na podobah prepoznati, na primer različne vrste poljščin, vrste gozdov, geološke strukture in podobno. Spektralni razredi pa so skupine podobnih pikselov, glede na njihove sive vrednosti v posameznih kanalih. Glavni namen pri klasifikaciji je iskanje povezave med spektralnimi in informacijskimi razredi. Pri tem je le redko mogoče dobiti povezavo enega spektralnega razreda z enim informacijskim. Pogosto obstajajo spektralni razredi, ki ne ustrezajo nobenemu informacijskemu razredu; po drugi strani pa širokemu informacijskemu razredu pripada večje število spektralnih razredov. V gozdu, na primer, se spektralni razredi ločijo po starosti, vrsti in gostoti dreves, pa tudi osvetljenosti in tako dalje.

Glede na metodo dela delimo klasifikacijo podob na:

- nenadzorovano in
- nadzorovano.

Glavna razlika med obema je način, kako ustvarimo spektralne podpise. Pri nadzorovani klasifikaciji operater določi manjša območja, kjer je določen tip rabe tal, računalniški program

pa iz njih izračuna spektralne podpise. Pri nenadzorovani klasifikaciji pa podpise ustvari program z matematičnim združevanjem (angl. clustering) v n-razsežnem spektralnem prostoru.



Slika 7: Spektralni podpis različnih tipov tal (vode, prsti in vegetacije). Označeni so tudi kanali senzorja Landsat TM (vir: Oštir, 2006 - prirejeno po Richards, 1986).

Figure 7: Spectral signature for different landuses (water, vegetation, soil). Spectral bands of Landsat TM are shown as well (source: Oštir - 2006, after Richards, 1986).

A7 SPEKTRALNI INDEKSI

S spektralnimi razmerji lahko opazimo drobne razlike v spektralnih odzivih različnih tipov površja. Z različnimi kombinacijami spektralnih kanalov poudarimo različne lastnosti površja, ki na izvornih podatkih niso tako očitne. Spektralni indeksi pogosto vključujejo kombinacijo velikega števila kanalov, kot na primer indeks zelene vegetacije (angl. green vegetation index, GVI), ki je za Landsat določen kot (Oštir, 2006):

$$GVI = -0.2848 TM1 - 0.2435 TM2 - 0.5436 TM3 + 0.7243 TM4 + 0.0840 TM5 - 0.1800 TM7 \quad (16)$$

V spodnji preglednici so prikazani izračuni t.i. prilagojenih vegetacijskih indeksov (Liang, 2004), ki skušajo zmanjšati vpliv tal pod vegetacijo – to so t. i. tlem prilagojeni vegetacijski indeksi (angl. soil-adjusted vegetation index, SAVI), MSAVI (angl. modified soil-adjusted vegetation index), TSAVI (angl. transformed SAVI). Znani so še trije prilagojeni indeksi, ki skušajo zmanjšati vpliv atmosfere v podatkih: globalni indeks opazovanja okolja (angl. global environment monitoring index, GEMI), na tla in atmosfero neodvisen vegetacijski indeks (angl. soil and atmospherically resistant vegetation index, SARVI) ter na aerosole neobčutljiv vegetacijski indeks (angl. aerosol-free vegetation index, AFVI). Spektralni kanali uporabljeni v tabeli so: IR kanal ali kanal 4 (*IR*) rdeči kanal ali kanal 3 (*R*) ter modri kanal ali kanal 2 (*B*).

Indeks	Razmerje spektralnih kanalov
Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = \frac{(IR - R) \cdot (1 + L)}{IR + R + L}$ $L = \text{koef. gostote vegetacije } (0,1)$
Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI)	$MSAVI = IR + 0.5 - \sqrt{(IR + 0.5)^2 - 2(IR - R)}$
Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index (TSAVI)	$TSAVI = \frac{\gamma(IR - \gamma R - b)}{\gamma IR + R + \gamma b + X(1 + \gamma^2)}$ <p>γ in b sta naklon in presečišče linije tal (angl. soil line) X = prilagoditveni faktor za minimiziranje talnega šuma</p>
Global Environment Monitoring Index (GEMI)	$GEMI = \frac{\eta(1 - 0.25\eta) - (R - 0.125)}{1 - R}$ $\eta = \frac{2(IR^2 - R^2) + 1.5IR + 0.5R}{IR + R + 0.5}$
Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index (SARVI)	$SARVI = \frac{(IR - RB) \cdot (1 + L)}{IR + RB + L}$ $RB = IR - \beta(B - R)$ <p>β = stabilizacijski koef. vsebnosti aerosolov, $\beta=1$ L = koef. gostote vegetacije (0,1)</p>
Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index 2 (SARVI2)	$SARVI2 = \frac{2.5(IR - R)}{1 + IR + 0.6R - 7.5/B}$

PRILOGA B: SEZNAM POSNETKOV IN NJIHOVIH LASTNOSTI

V raziskavi so bili uporabljeni posnetki, ki so prosto dostopni na spletu ter posnetki, katerih uporabo so mi prijazno omogočile naslednje slovenske institucije:

- Gozdarski institut Slovenije (GIS),
- Statistični urad Republike Slovenije (SURS),
- Založba Modrijan in
- Znanstvenoraziskovalni center ZRC SAZU.

Spodnja preglednica prikazuje seznam (po vrsticah) in lastnosti (po stolpcih) posnetkov Landsat, uporabljenih v praktičnem delu raziskave. Med lastnosti štejejo: senzor, pot in vrstica snemanja, zapis podatkov, število spektralnih kanalov, velikost zajete scene, prostorska ločljivost, način prevzorčenja v sprejemni postaji, opravljena ortorektifikacija v sprejemni postaji, leto zajema ter institucija, ki mi je omogočila uporabo podatkov.

Posnetek	Senzor	Path	Row	Format	Kanali	Velikost scene	Ločljivost [m]	PO-P	PO-O	Leto	Dostop
1973-08-06	MSS 1	206	28	TIF	4:7	1	28.5	CC	orto	1973	splet
1978-08-23	MSS 3	204	28	TIF	4:7	1	28.5	CC	orto	1978	splet
1981-06-15	MSS 2	205	28	TIF	4:7	1	28.5	CC	orto	1981	splet
1991-09-10	TM 5	190	28	TIF	1:7	1	28.5	CC	orto	1991	splet
1992-08-18	TM 5	191	28	CEOS	1:7	1	30	CC		1992	ZRC
1992-08-20	TM 5	189	28	CEOS	1:7	1	30	CC		1992	ZRC
1992-08-27	TM 5	190	28	CEOS	1:7	1	30	CC		1992	ZRC
1992-08-28	TM 5	189	28	TIF	1:7	1	28.5		orto	1992	splet
1993-05-26	TM 5	190	28	BSQ	1:7	1	30	NN		1993	SURS
1993-06-20	TM 5	189	28	BSQ	1:7	1/4	30	NN		1993	SURS
1993-06-20	TM 5	189	28	BSQ	1:7	1/4	30	NN		1993	SURS
1993-08-21	TM 5	191	28	BSQ	1:7	1	30	NN		1993	SURS
1995-07-26	TM 5	191	28	BSQ	1:7	1	30			1995	GIS
1996-06-03	TM 5	190	28	CEOS	1:7	1	30	CC		1996	ZRC
1996-06-03	TM 5	190	29	CEOS	1:7	1	30			1996	GIS
1999-08-07	ETM+ 7	190	28	CEOS	1:9	1	30			1999	ZRC
1999-08-07	ETM+ 7	190	28	CEOS	1:9	1	30	NN		1999	GIS
1999-09-15	ETM+ 7	191	28	HDF	1:9	1	30			1999	ZRC
1999-09-15	ETM+ 7	191	28	HDF	1:9	1	30			1999	GIS
2000-08-02	ETM+ 7	189	28	TIF	1:9	1	28.5	NN	orto	2000	splet
2000-08-16	ETM+ 7	191	28	TIF	1:9	1	28.5		orto	2000	splet
2000-09-10	ETM+ 7	190	28	TIF	1:9	1	28.5	NN	orto	2000	splet
2001-05-24	ETM+ 7	190	28	ERDAS	1:9	1	30			2001	Modrijan
2001-08-03	ETM+ 7	191	28	HDF	1:9	1	30	NN		2001	GIS
2002-05-18	ETM+ 7	191	28	HDF	1:7	1	30	NN		2002	GIS
2003-03-18	ETM+ 7	191	28	HDF	1:9	1	30	NN		2003	GIS
2005-05-27	TM 5	190	28	CEOS	1:7	1	30	NN		2005	SURS, ZRC
2005-06-19	TM 5	191	28	CEOS	1:7	1	30	NN		2005	SURS, ZRC
2005-06-21	TM 5	189	28	CEOS	1:7	1	30	NN		2005	SURS, ZRC
2005-07-30	TM 5	190	28	CEOS	1:7	1	30	NN		2005	ZRC

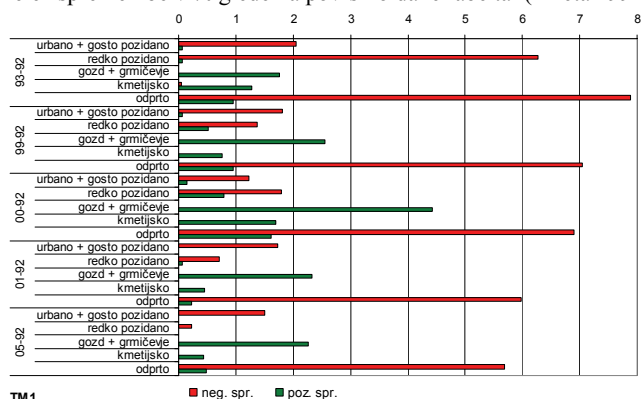
PRILOGA C: PROGRAMSKE REŠITVE

Glej priloženi CD

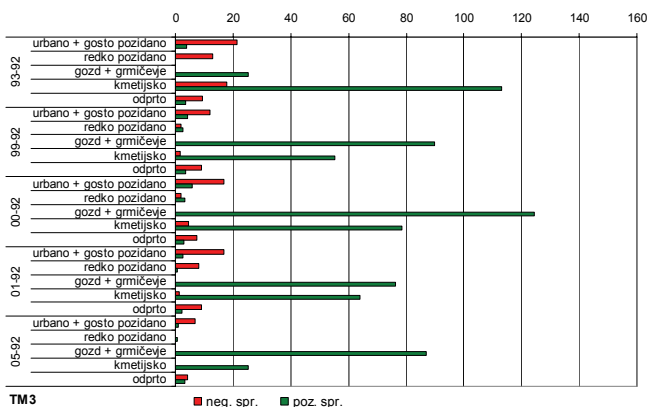
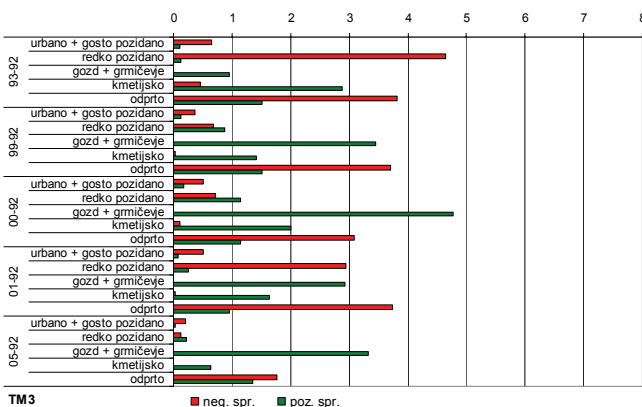
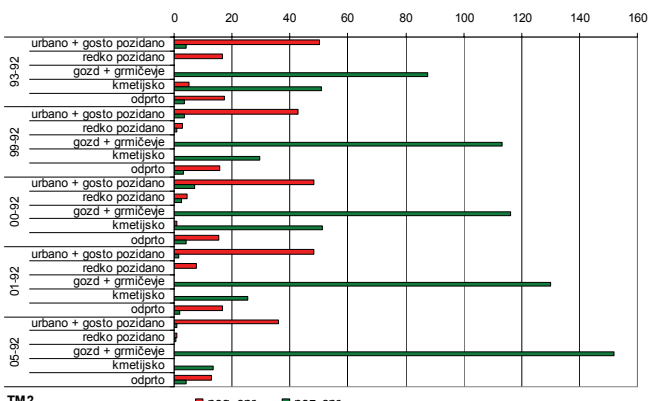
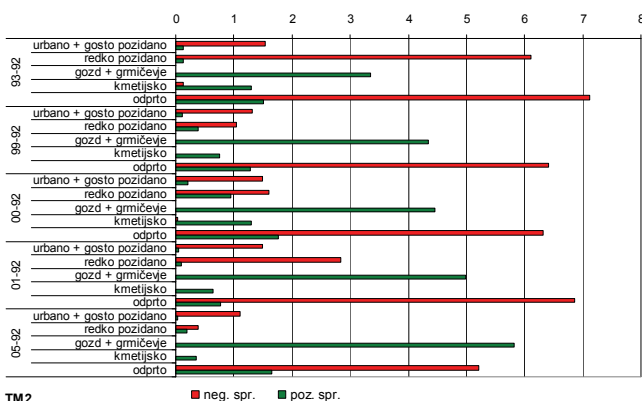
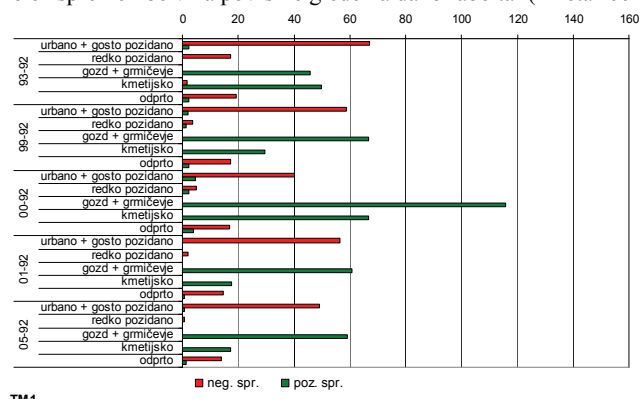
PRILOGA D: REZULTATI ANALIZ

Podpora poglavju 5.7.2.1.3: Deleži sprememb v posameznih razredih rabe tal / pokrovnosti. Spodnji grafi za vsak posamezen spektralni kanal prikazujejo ovrednotena razmerja določitve sprememb z večločljivostnim modelom določanja sprememb za časovno vrsto izseka mesta Ljubljane, poletje, odbojne vrednosti. Na levi strani so prikazani ocenjeni relativni deleži sprememb v posameznem razredu rabe tal, na desni pa ocenjeni ha površine, ki ji ti deleži zavzamejo v naravi.

Delež spremembe v % glede na površino dane rabe tal (iz leta 1992)



Delež spremembe v ha površine glede na dano rabo tal (iz leta 1992)



se nadaljuje...

... nadaljevanje

