

# Detekcija klimatskih fluktuacija Hilbert-Huangovom metodom u podacima opservatorija Zagreb - Grič

---

**Petrov, Ana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:611298>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-02**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Ana Petrov

Diplomski rad

Detekcija klimatskih fluktuacija Hilbert-Huangovom  
metodom u podacima opservatorija Zagreb – Grič

Voditelj: prof. dr. sc. Branko Grisogono

Zagreb, 2016.

*Toplo se zahvaljujem svom mentoru dr. sc. Branku Grisogonu na ideji, iznimnom strpljenju i razumijevanju te na svim savjetima i konstruktivnim kritikama tijekom izrade ovog rada.*

*Osoblju državnog hidrometeorološkog zavoda, a posebno dr. Tanji Likso hvala na ustupljenim podacima.*

*Veliko hvala mojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci i razumijevanju tijekom cijelog školovanja.*

# Sadržaj

Sažetak.....	I
Popis kratica.....	II
1. Uvod.....	1
2. Pregled metoda.....	3
2.1. Analiza nestacionarnog vremenskog niza.....	3
2.2. Kontinuirana valićna transformacija.....	4
2.3. Hilbert-Huangova transformacija.....	5
2.3.1. Hilbertova transformacija.....	5
2.3.2. EMD metoda.....	6
3. Primjena EMD metode na klimatološke nizove.....	9
3.1. Karakteristike EMD metode.....	9
3.2. Konačno definiranje EMD metode korištene u ovom radu.....	11
3.3. Način obrade i interpretacije rezultata.....	12
3.4. Rezultati.....	14
3.4.1. Temperatura.....	14
3.4.2. Naoblaka.....	18
3.4.3. Oborina.....	21
3.4.4. Tlak.....	24
4. Validacija Hilbert-Huangove transformacije valićnom analizom.....	28
5. Zaključak.....	33
Literatura.....	34
Abstract.....	37
Dodatak A.....	38
Dodatak B.....	39

## Sažetak

Hilbert-Huangova transformacija empirijska je metoda za analizu periodičkih komponenti nelinearnih i nestacionarnih podataka. Sastoji se od dva dijela: metode empirijskog rastavljanja (eng. *Empirical Mode Decomposition*, EMD) i Hilbertove spektralne analize (HSA). EMD, metoda koja rastavlja originalne nizove na tzv. prirodne sastavne funkcije, (eng. *Intrinsic Mode Functions*, IMF) primjenjena je na godišnje i sezonske srednjake temperature, naoblake i tlaka, te na godišnje i sezonske sume oborine i globalnog zračenja opservatorija Zagreb-Grič, za razdoblje 1862.–2015.

Analizom dugoperiodičkih prirodnih sastavnih funkcija pokazan je značajan utjecaj koji Sjeverno-atlantska oscilacija (eng. *North Atlantic Oscillation*, NAO) ima na godišnje i sezonske nizove temperature, naoblake i oborine. Za ove iste elemente analiza otkriva blago odstupanje signala od prirodne varijabilnosti u posljednjih 30-ak godina, za što je najvjerojatnije odgovoran ljudski faktor.

Zatim je Hilbertova transformacija primjenjena na sve IMF dobivene iz niza godišnjih srednjaka tlaka, a dobiven Hilbertov spektar uspoređen je s valićnim. Pokazano je da HHT ima značajno poboljšanu frekvencijsku i vremensku razlučivost. Uz to, ta metoda ima jedinstvenu mogućnost prikaza frekventne modulacije unutar jednog perioda (eng. *Intrawave Frequency Modulation*, IFM).

## Popis kratica:

CWT - eng. The Continuous Wavelet Transformation

EMD - eng. Empirical Mode Decomposition

FT - eng. Fourier Transformation

HHT - Hilbert-Huangova transformacija

HSA - Hilbert Spectral Analysis

HT - Hilbertova transformacija

IFM - eng. Intrawave Frequency Modulation

IMF - eng. Intrinsic Mode Functions

NAO - eng. North Atlantic Oscillation

NOAA - eng. National Oceanic and Atmospheric Administration

OCA - Opća cirkulacija atmosfere

STFT - eng. Short Time Fourier Transformation

# 1. Uvod

Tema ovog rada je detekcija i analiza uzročnika fluktuacija u klimatskom nizu podataka opservatorija Zagreb – Grič, u periodu 1862.-2015. Podaci s opservatorija Grič dobiveni su neprekinutim nizom mjerenja od početka rada, 01.12.1861., do danas, te su kao takvi među najhomogenijima u Europi, što čini ovaj opservatorij jednim od najdragocjenijih izvora meteoroloških podataka u svijetu.

Kako bismo opisali i razumjeli svijet oko nas, pripadni podaci se trebaju prikupiti i interpretirati. Analiza podataka temeljna je karika između mjerenja i zaključaka koje donosimo na temelju tih mjerenja. Budući da je krajnji cilj svakog znanstvenog istraživanja steći bolje razumijevanje prirode oko nas, od izuzetne je važnosti da metode za analizu podataka ne budu ni na koji način ograničavajuće.

Fourierova transformacija, uvedena početkom 19. st., donijela je revoluciju u obradi signala, omogućavajući uvid u energijski sadržaj vremenskog niza. Takve zasluge dovele su do njene široke upotrebe, čak do te mjere da je Fourierova transformacija postala sinonim za spektralnu analizu (Huang i sur., 1998). Međutim, nemogućnost da se nosi s nestacionarnim pojavama pokazala se problematičnom. Naime, podaci prikupljeni iz stvarnog svijeta najčešće su upravo takvi - nisu periodični i mijenjaju se u vremenu, a uz to su i puni šuma, isprekidani, i rezultat su mnogih, najčešće nelinearnih kombinacija procesa. Linearne metode za opis takvih podataka nisu idealne, a poteškoće koje nastaju ako se takve metode koriste za analizu nelinearnih sustava su brojne.

Kako bi uistinu razumjeli svijet oko nas, važno je da ne pokušavamo ugurati svijet u matematičke jednadžbe već da ih neprestano pokušavamo proširiti kako bi se mogle nositi s izazovom interpretacije ćudljivog svijeta oko nas. Čini se da se Hilbert-Huangova transformacija (HHT), relativno nova metoda, uspijeva nositi s tim izazovom.

HHT je efikasan i adaptivan alat razvijen upravo kao odgovor na ograničenja dotadašnjih, tradicionalnih metoda. Sastoji se od dva dijela; prvi i ključni dio je metoda empirijskog rastavljanja (eng. *Empirical Mode Decomposition*, EMD). EMD, lokalno i automatski izdvaja 'prirodne' frekvencije kojima signal oscilira, omogućujući tako rastav signala na prirodne sastavne funkcije (eng. *Intrinsic Mode Functions*, IMF). Tek na takve jednostavne funkcije može se valjano primjeniti Hilbertova transformacija (HT), drugi dio HHT metode. Hilbertovom transformacijom računamo trenutne frekvencije svake IMF, kao funkcije vremena. Pristup HHT metode jedinstven je i potpuno različit od pristupa već postojećih metoda za analizu podataka i omogućuje fizikalno smisleniji vremensko-frekvencijsko-energetski prikaz vremenskog niza.

Ovaj se rad na svojevrsan način nadovezuje na diplomski rad Valentine Radić, (2004). Radić (2004) je u svojem radu primjenila EMD metodu na godišnje i sezonske srednjake temperature, naoblake i tlaka, te na godišnje i sezonske sume oborine i globalnog zračenja opservatorija Grič.

U dosadašnjim analizama ovih klimatoloških nizova korištene su linearne metode koje, iako korisne, nisu u potpunosti prikladne za analizu takvih podataka. Tako su primjenom kliznog srednjaka za otkrivanje dugoperiodičkih varijacija (Šinik, 1985) potvrđene značajne klimatske fluktuacije temperature zraka, globalnog zračenja i naoblake. Linearna regresija za procjenu trendova (Gajić-Čapka, 1993) ukazuje na kvazi periodičke oscilacije oborine, dok je Fourierova i singularna spektralna analiza (Gajić-Čapka, 1993; Belušić, 2001) pokazala poveznice između sezonskih i godišnjih varijacija.

Ovaj rad dodatno uključuje analizu podataka EMD metodom za 13 godina proteklih u međuvremenu, tj. 2002-2015., primjenu Hilbertove transformacije, te analizu kontinuiranom metodom "valića" (eng. *The Continuous Wavelet Transformation, CWT*), a sve u svrhu detaljnije provjere mogućnosti koje HHT pruža. Naime, iako se HHT do sada pokazao izuzetno učinkovitim, sama tehnika nije konačno teorijski definirana (Huang i sur., 1999) pa je cilj ovog rada, uz već spomenutu analizu godišnjih i sezonskih srednjaka i suma, i eksperimentalno doprinijeti boljem razumijevanju same metode.

Motivacija za ovakav pristup i samu temu radnje je veliko opće i specijalističko zanimanje za klimatske promjene tijekom zadnjih desetljeća. Klima je kompleksan sustav, a mnogi fizikalni procesi koji vode do promjena u tome sustavu i dalje su nerazjašnjeni. Kako je efikasnost i moć HHT analize do sada pokazana njenom uspješnom primjenom na brojne probleme na području biomedicine, strojarstva, financija i geofizike (Huang i sur., 1999), te je u svim dosadašnjim studijama dala preciznije rezultate od bilo koje tradicionalne metode (Huang i sur., 2005), njena primjena na ove podatke mogla bi dopridonijeti boljem razumijevanju uzroka recentnih klimatskih fluktuacija na području grada Zagreba.

U nastavku će ukratko biti objašnjena problematika vezana uz analizu nestacionarnog signala, te će biti data kratka teorijska podloga metoda korištenih za analizu i obradu podataka.



## 2. Pregled metoda

### 2.1. Analiza nestacionarnog vremenskog niza

Kako bismo iz vremenskog niza podataka mogli izvući dodatne informacije i zaključke, na te podatke primjenjujemo matematički transformat. Transformat omogućuje uvid u frekvencijski sadržaj signala, odnosno pokazuje koje sve frekvencije i kojim intenzitetom tj. amplitudom se pojavljuju. Kako bi se preveo signal iz vremenske u frekvencijsku domenu i obrnuto, koriste se razne metode, a među njima najčešće korištena i najpopularnija je Fourierova transformacija (eng. *Fourier Transformation*, FT). Ukoliko primjenimo FT na signal dobit ćemo savršeno jasan prikaz frekvencijskog sadržaja, odnosno harmonijskih funkcija koje se pojavljuju u tom signalu. Međutim, ono što nećemo dobiti je podatak o vremenu u kojem se određena harmonijska funkcija pojavljuje. U slučaju da je promatrani signal stacionaran, tj. njegov frekvencijski sadržaj se ne mijenja u vremenu, FT će biti adekvatan izbor; naime, informacija o tome kada se koja frekvencijska komponenta pojavljuje nam nije potrebna, jer su sve komponente prisutne u svakom trenutku. Ipak, kao što je poznato, većina signala s kojima se susrećemo u stvarnosti je nestacionarna.

Za takve signale problem se pokušao riješiti razvojem vremenski kratke Fourierove transformacije (eng. *Short Time Fourier Transformation*, STFT), nove transformacije koja bi istovremeno promatrala vremenske i frekvencijske odnose signala. U odnosu na standardni FT razlikuje se po upotrebi vremenskog prozora, odnosno analizirajućeg otvora željenih svojstava u obje domene koji je pomičan u vremenu. U tu svrhu koristi se vremenska funkcija različita od nule u jednom kratkom vremenskom periodu. Način funkcioniranja STFT je da takav prozor kontinuirano pomičemo po vremenskoj osi, od početka prema kraju signala, tako da prozorom uvijek obuhvaćamo samo određene stacionarne segmente signala. Zatim vršimo Fourierovu transformaciju za svaku kružnu frekvenciju, dobivajući na taj način 3-D grafički prikaz s vremenom na jednoj, frekvencijom na drugoj i amplitudom na trećoj osi.

Iako smo na ovaj način zadovoljili zahtjev vremenske lokalizacije spektralnih komponenti, STFT ima ozbiljan nedostatak. Radi se o problemu razlučivosti u dobivenoj vremensko-frekvencijskoj ravnini. Problem razlučivosti ima svoje izvoriste u Heisenbergovom principu neodređenosti koji kaže da je nemoguće istodobno točno ustanoviti brzinu čestice i njezin položaj u prostoru. Preneseno na ovaj slučaj, ne možemo znati koja spektralna komponenta postoji u točno određenom trenutku, možemo samo znati koji frekvencijski pojasevi postoje u nekom vremenskom intervalu. Tako, kada bismo odabrali beskonačno širok prozor, dobili bi čistu

Fourierovu transformaciju s idealnom frekvencijskom i nul-vremenskom rezolucijom. U suprotnom, manji vremenski prozor značio bi bolje zadovoljen zahtjev stacionarnosti i bolju vremensku, a lošiju frekvencijsku rezoluciju.

Princip neodređenosti fundamentalni je zakon kojeg nije moguće izbjeći, no moguće je donekle ga zaobići. Upravo iz tog razloga nastala je valićna transformacija.

## 2.2. Kontinuirana valićna transformacija

Osnovna ideja CWT-a je da omogućava promjenjivu veličinu prozora pri analizi različitih frekvencijskih komponenti signala, za razliku od STFT-a u kojem je odabrani prozočić fiksna tijekom cijele transformacije. Na taj način postići ćemo dobru vremensku i lošu frekvencijsku rezoluciju na visokim frekvencijama i lošu vremensku i dobru frekvencijsku rezoluciju na niskim frekvencijama. To je poželjno budući da se visoke frekvencije bolje razlučuju u vremenu dok se one niske bolje razlučuju u frekvenciji. Za parametar skale,  $a > 0$  i položaj  $b$ , CWT je definirana izrazom:

$$C(a,b;f(t),\psi(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

gdje  $f(t)$  signal kojeg se analizira, dok je  $\psi^*(t)$  kontinuirana funkcija u vremenskoj i frekvencijskoj domeni zvana matični valić (eng. *mother wavelet*). Matični valić je izvorišna funkcija iz koje dalje generiramo ostale valiće koji su njegova translirana i skalirana verzija. Konstantno mijenjajući vrijednosti skale - parametar  $a$ , i poziciju - parametar  $b$ , računamo konvoluciju takvih valića i signala, dobivajući tako koeficijente  $C(a,b)$ . Izračunati koeficijenti mjera su sličnosti između dilatiranog/translatiranog matičnog valića i signala u vremenu  $b$  i iznosa skale  $a$  (Kijewski-Correa i Kareem, 2006). Ti koeficijenti će imati relativno veliku vrijednost ukoliko su oni bliski, a relativno malu vrijednost u suprotnom. Kao i sa STFT-om dobit ćemo dvodimenzionalnu reprezentaciju jednodimenzionalnog signala, no u ovom slučaju sa značajno poboljšanom rezolucijom.

Analiza valićima dostupna je tek posljednjih tridesetak godina i postala je jako popularna, posebice među primjenjenim matematičarima. Usprkos nedostacima koji će biti diskutirani u posljednjem poglavlju, posebno je korisna u analiziranju podataka s postupnom promjenom frekvencije.

Do pojave HHT metode, analiza valićima bila je najbolja dostupna metoda za analizu nestacionarnih signala i zato će u ovom radu biti korištena kao referenca kojom će se procjenjivati učinkovitost nove metode.

## 2.3. Hilbert-Huangova transformacija

HHT metoda originalno je formulirana 1995. pod imenom *Empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis* (EMD-HSA). Huang i sur. (1998) usavršili su je, nakon čega je metoda stekla veliku popularnost.

Kako je već spomenuto ranije u uvodu, sastoji se od dva dijela; u prvom, EMD dijelu, podaci se rastavljaju na određeni broj prirodnih sastavnih funkcija, dok se u drugom dijelu na dobivene IMF primjenjuje Hilbertova transformacija.

### 2.3.1. Hilbertova transformacija

Kao STFT i CWT tako nam i Hilbertova transformacija služi za vremensko-frekvencijski prikaz nestacionarnog signala. HT proizvoljne funkcije  $x(s)$  definirana je kao:

$$H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \text{PV} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(s)}{t-s} ds, \quad (2)$$

gdje je PV Cauchy-eva glavna vrijednost integrala. PV integrala se računa zbog singulariteta koji se pojavljuje u slučaju kada  $t$  poprimi jednaku vrijednost kao i  $s$ , na način da se interval oko točke singulariteta isključi iz integracije.

Jednadžba (2) predstavlja filter koji pomiče faze svih frekvencijskih komponenti za  $-\pi/2$  radijana, računajući na taj način imaginarni dio signala. Ovako definirani  $x(t)$  i  $H[x(t)]$  čine kompleksno konjugirani par pa je analitički signal  $z(t)$  jednak:

$$z(t) = x(t) + i H[x(t)]. \quad (3)$$

Jednadžba (3) može se napisati u eksponencijalnoj formi kao:

$$z(t) = A(t) e^{i\theta(t)}, \quad (4)$$

gdje su  $i = \sqrt{-1}$ ,  $A(t) = \sqrt{x^2 + H[x(t)]^2}$ ,  $\theta(t) = \tan^{-1} \frac{H[x(t)]}{x}$ .

U eksponencijalnom zapisu signala (4),  $A(t)$  je amplituda,  $\theta(t)$  je faza, dok frekvenciju računamo pomoću:

$$\omega(t) = \frac{d(\theta(t))}{dt}. \quad (5)$$

Frekvencija izračunata prema (5) je trenutna te na nju ne utječe načelo neodređenosti. Koncept trenutne frekvencije može se činiti paradoksalnim, zbog definicije frekvencije kao recipročne vrijednosti perioda. Međutim, intuitivno se može predočiti kao frekvencija sinusnog vala koji lokalno odgovara oscilatornim karakteristikama promatranog signala.

Brojne su prednosti koje zbog mogućnosti prikaza trenutne frekvencije Hilbertova transformacija ima naspram CWT-a, a koje će detaljnije biti diskutirane u posljednjem poglavlju. Nedostatak je taj što Hilbertovu analizu nije moguće primjeniti na svaki signal. Transformacija primjenjena na neki proizvoljni  $x(t)$  generirat će i negativne frekvencije, koje nemaju fizikalnog značenja. Valjane rezultate moguće je dobiti samo ukoliko je signal monokomponentan ili usko pojasan, zbog čega je potrebno podatke filtrirati (Lee i Park, 1994). Međutim, filtriranje u frekvencijskom prostoru linearni je operator, a linearni operator primjenjen na nelinearni niz rezultirat će nizom koji je lišen harmonika i stoga nepotpun. Iz tog razloga Hilbertova transformacija u prošlosti bila je gotovo neupotrebljiva. Njena prava vrijednost došla je do izražaja tek kada su Huang i sur. (1998) predstavili metodu empirijskog rastavljanja.

### 2.3.2. EMD metoda

EMD metoda u biti je algoritam koji svaki kompleksni multikomponentni niz podataka može rastaviti u konačni set monokomponentnih funkcija. Te funkcije formiraju kompletnu i približno ortogonalnu bazu originalnog signala i označene su kao prirodne sastavne funkcije. IMF su klasa funkcija temeljenih na lokalnim karakteristikama i za njih u svakom trenutku postoji fizikalno smisljena trenutna frekvencija.

Svaki IMF predstavlja jednostavnu harmonijsku funkciju čija su amplituda i frekvencija funkcije vremena. Takve IMF moraju zadovoljiti dva nužna uvjeta:

- (1) u cijelom nizu podataka broj ekstrema i broj nultočaka mora biti jednak ili se razlikovati maksimalno za jedan;
- (2) u svakom trenutku, srednja vrijednost ovojnice definirane lokalnim maksimumom i ovojnice definirane lokalnim minimumom treba biti nula.

Takozvanim procesom prosijavanja svaka funkcija se može rastaviti na ovako definirane IMF, koje su pogodne za daljnu analizu Hilbertovom transformacijom. Proces prosijavanja, kako su ga originalno opisali Huang i sur. (1998), započinje identifikacijom svih lokalnih ekstrema niza  $x(t)$ . Svi lokalni maksimumi (minimumi) povežu se sa polinomom 3. stupnja kako bi formirali gornju (donju) ovojnicu. Gornja i donja ovojnica obično obuhvate sve podatke, a njihov srednjak označimo kao  $m_1$ . Razlika između originalnog niza i  $m_1$  prvi je protomod

$$x(t) - m_1 = h_1. \quad (6)$$

$h_1$  je moguća prva IMF ukoliko su zadovoljena gore spomenuta dva nužna uvjeta. Ukoliko uvjeti nisu zadovoljeni, proces prosijavanja se ponavlja onoliko puta koliko je potrebno da dobiveni niz zadovolji definiciju IMF. U iterativnom postupku  $h_1$  može se tretirati tek kao proto-IMF, koji preuzima ulogu originalnog niza u sljedećoj iteraciji:

$$h_1 - m_{11} = h_{11}. \quad (7)$$

Nakon  $k$  iteracija,

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}, \quad (8)$$

traženi uvjeti približno su zadovoljeni i  $h_{1k}$  postaje prva IMF, koju označimo sa  $c_1$ ,

$$c_1 = h_{1k}. \quad (9)$$

Pitanje koje se ovdje postavlja jest kada se točno iteracijski postupak zaustavlja. Postoje dva moguća različita kriterija. Prvi, kojeg su upotrijebili Huang i sur. (1998), jest kriterij koji je određen Cauchyjevom uvjetom konvergencije. Uvjet zahtjeva izračunavanje normirane kvadratne razlike između dvije potencijalne IMF funkcije dobivene u susjednim iteracijama:

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}^2(t)}. \quad (10)$$

Ukoliko je kvadratna razlika  $SD_k$  manja od neke unaprijed određene vrijednosti, iteracijski postupak bit će zaustavljen. Ovaj uvjet je strog, pa ga je stoga vrlo teško primijeniti u praksi. Kod njega se postavljaju i dva pitanja. Prvo, koliki mali  $SD_k$  je dovoljno mali, te drugo, ovaj kriterij ne ovisi o definiciji same IMF. Kvadratna razlika može biti dovoljno mala, ali to ne garantira da će funkcija imati isti broj nul-točaka i ekstrema.

Kako bi popravili ove nedostatke, Huang i sur. (1999, 2005) predložili su drugačiji kriterij zaustavljanja, koji predlaže da proces prosijavanja prestaje tek kad broj nul-točaka i ekstrema su (i) jednaki ili se razlikuju najviše za jedan, i (ii) ostanu takvi barem  $S$  sljedećih iteracija. Nakon opsežnih testiranja Huang i sur. (2005) predlažu da bi optimalni raspon za  $S$  trebao biti između 3 i 8, dok je niži broj poželjniji.

Prva IMF trebala bi sadržavati najfiniju skalu tj. oscilacije najkraćeg perioda koje se zatim oduzimaju od signala :

$$x(t) - c_1 = r_1. \quad (11)$$

Ostatak,  $r_1$ , još uvijek sadrži varijacije dužeg perioda. Taj ostatak zatim se tretira kao posve novi niz koji biva podvrgnut istom procesu prosijavanja koji je gore opisan, kako bi se dobila sljedeća IMF niže frekvencije. Cijela procedura može biti primjenjena na sve sljedeće  $r_j$ -ove:

$$\begin{aligned} r_1 - c_2 &= r_2 \\ &\dots \\ r_{n-1} - c_n &= r_n. \end{aligned} \quad (12)$$

Cijeli iterirajući postupak se zaustavlja kad je zadovoljen bilo koji od sljedećih kriterija: bilo da je komponenta ili reziduum postao dovoljno malen da je manji od neke zadane vrijednosti, ili kada ostatak postane monotona funkcija iz koje se više ne mogu izvući daljnje IMF funkcije. Čak i ako originalni signal ima srednju vrijednost jednaku nuli, konačni ostatak ipak može biti različit od nule.

Ako signal ima neku tendenciju (rasta ili pada), upravo će taj konačni ostatak pokazati kakva je ta tendencija. Sumiranjem svih IMF funkcija i konačnog ostatka dobivamo originalni signal:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j + r_n. \quad (13)$$

Na ovaj način originalni niz rastavljen je na  $n$  IMF-ova i na reziduum  $r_n$ , koji predstavlja trend.

### 3. Primjena EMD metode na klimatološke nizove

U radu su korišteni godišnji i sezonski srednjaci temperature, naoblake i tlaka zraka te godišnje i sezonske sume količine oborine mjerene na opservatoriju Zagreb-Grič ( $\varphi=45^{\circ}49'$  N,  $\lambda=15^{\circ}59'$  E, H=157 m). Sezonke vrijednosti računane su iz tri mjeseca u godini koji predstavljaju određenu sezonu, odnosno ožujak, travanj i svibanj predstavljaju proljeće, lipanj, srpanj i kolovoz predstavljaju ljeto, itd. Podaci su dobiveni od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ). Valja napomenuti da je opservatorij Grič prvih 125 godina bio vođen od strane Geofizičkog odsjeka, dok zadnjih 30 godina opservatorij pripada DHMZ-u.

Iako izvorno zamišljen kao nastavak na diplomski rad Radić (2004), u ovom radu neće biti analiziran niz globalnog zračenja. Naime, sama mjerenja globalnog zračenja na opservatoriju Grič nisu vršena, pa je Radić podatke za svoj rad preuzela iz Penzar i sur. (1992). Pripadni podaci računati su velikim dijelom iz naoblake tako da ta dva niza pokazuju vrlo visoku negativnu korelaciju. Zbog toga, svi zaključci doneseni za niz naoblake gotovo su potpuno suprotni, tj. skoro antisimetrični no što bi bili za niz globalnog zračenja. Uz to, ne postoji jedinstvena relacija kojom bi se iz niza naoblake izračunalo globalno zračenje pa nije moguće sa sigurnošću utvrditi da je niz iz Penzar i sur. (1992) valjano nastavljen.

Prije same primjene EMD metode na spomenute zagrebačke klimatološke nizove ukratko će biti opisana osnovna svojstva koja karakteriziraju tu metodu. Kao i svaka metoda, tako i HHT ima svoje prednosti i nedostatke koje je potrebno razumjeti kako bi se dobiveni rezultati mogli pravilno interpretirati.

#### 3.1. Karakteristike EMD metode

##### a) *EMD kao adaptivna metoda*

Kako bismo se učinkovito nosili sa nelinearnošću i nestacionarnošću podataka, metoda koja se koristi za spektralnu analizu trebala bi biti adaptivna. Kod metoda koje uključuju rastavljanje podataka, zahtjev za adaptivnošću znači zahtjev za postojanjem adaptivne baze, tj. *a posteriori* definirane baze koja je temeljena i izvedena iz podataka (Huang i Wu, 2008). Na taj način podacima se omogućava da govore sami za sebe, bez da ih unaprijed ograničimo matematičkim pravilima.

Ovakav pristup potpuni je zaokret od dotadašnjeg, tradicionalnog pristupa. Trenutno dostupne metode za spektralnu analizu imaju *a priori* definiranu bazu i nisu adaptivne. Primjer su trigonometrijske funkcije u Fourierovoj analizi. Nakon što se baza jednom odredi, analiza se svodi na računanje konvolucije signala i baze.

Ovakva paradigma matematički je ispravna i rigorozna. Međutim, krajnji cilj analize nije pronaći matematička svojstva podataka, već razumjeti fizikalne mehanizme skrivene u podacima. Na taj način dobiveni rezultati, iako matematički točni, neće biti potpuno informativni.

EMD metoda intuitivna je i direktna, a njen produkt, prirodne sastavne funkcije, čine adaptivnu bazu. Takva baza empirijski zadovoljava sve matematičke zahtjeve koje metoda za rastavljanje vremenskog niza treba zadovoljavati, uključujući konvergenciju, kompletnost, ortogonalnost i jedinstvenost (Huang i sur., 1998).

#### *b) EMD kao vremensko varijabilni filter*

Metoda polazi od jednostavne pretpostavke da se većina signala iz prirode sastoji od mnogo superponiranih, koegzistirajućih, jednostavnih oscilatornih modova. To je razumljivo, budući da je izmjereni set podataka najčešće rezultat različitih fizikalnih uzroka koji se događaju u različitim vremenskim intervalima. Osnovna ideja je da bi nakon rastavljanja svaka IMF trebala izdvojiti i prikazati po jedan od tih modova, kojemu bi zatim bilo moguće lakše pronaći fizikalni uzrok (Huang i Shen, 2005). Upravo u ovome leži najveća snaga ove metode. HHT je detaljno i iscrpno testiran, a rezultati koje je pokazao značajni su upravo po tome što je uspješno izdvojio i analizirao periodičke komponente različitih oscilatornih podataka (Barnhart, 2011), otvarajući tako mogućnost za jednostavniju znanstvenu interpretaciju.

Još jedna prednost ovakvog pristupa spektralnoj analizi je u tome što je kroz proces prosijavanja moguće lokalno odstraniti visoko frekventne komponente, preciznije i točnije nego kad se u istu svrhu koristi nisko propusni filter (Barnhart, 2011). Naime, procesom prosijavanja neće doći do izgladivanja podataka i smanjenja duljine niza, što se često dogodi kad se koristi nisko propusni filter. Nadalje, takvi filteri uglavnom su linearni. U slučaju da je signal kojeg filtriramo rezultat nelinearnih procesa, može se dogoditi da klasični filter pokupi samo osnovni mod i da pritom izostavi harmonike.

EMD metoda uspješno nadilazi gore navedene nedostatke klasičnog filtera jer omogućava da vremenske skale unutar niza diktiraju 'prirodno' filtriranje. Uz to, *a priori* znanje o fizikalnim mehanizmima koji utječu na signal nije potrebno, a također nije potrebno ni korištenje mnogobrojnih filtera da bi se izolirale komponente različitih frekvencija.



### *c) EMD kao binarni filter*

EMD algoritam iz multikomponentnog signala uspješno izdvaja jednostavne oscilatorne modove različitih frekvencija, IMF-ove. Međutim, takvi IMF-ovi, iako usko pojasni, nisu nužno uvijek monokomponentni. Ovu činjenicu pokazali su Wu i Huang (2004) definirajući EMD kao binarni filter koji ima mogućnost prosijati periodičke komponente koje se razlikuju barem za faktor dva. Tako, ukoliko signal ima dvije ili više superponiranih periodičkih komponenti čiji se periodi razlikuju za manje od faktor dva, pojedine dobivene IMF bit će superpozicija svih komponenti unutar tog binarnog ranga.

EMD dakle nije osposobljena razlučiti dvojni harmonijsku prirodu signala koji imaju bliske frekvencijske komponente pa dolazi do miješanja modova. Problem miješanja modova Dätig i Schlurmann (2004) navode kao primarni nedostatak ove metode. Ovaj problem još uvijek nije riješen, no HHT je usprkos tome i dalje vrlo korisna metoda, što brojni testovi nedvojbeno pokazuju.

## 3.2. Definiranje EMD metode korištene u ovom radu

Kako su Huang i sur. (1998) pojedine korake ostavili nedovoljno razjašnjenima, ostavili su otvorenom mogućnost modificiranja same metode. Zato su u ovom radu, po uzoru na Radić (2004), uvedene određene promjene u odnosu na originalno definiranu metodu.

Umjesto kriterija zaustavljanja koji je određen Cauchyjevom uvjetom konvergencije, proces prosijavanja za dobivanje pojedine prirodne sastavne funkcije bio je prekinut kada se postigao jednak broj ekstrema i nultočaka te izglađenost krivulje srednjaka ovojnica oko nule. U praksi se radilo o, u prosjeku, petnaestak koraka prosijavanja. U slučaju da je na krivulji izglađenog srednjaka envelope nakon određenog koraka prosijavanja nastupio nagli poremećaj zbog numeričke pogreške, prosijavanje je bilo prekinuto prije tog koraka.

Kao što Huang i sur. (1998) u originalnom članku navode, interpolacija polinomom 3. stupnja za izradu ovojnica nije idealno rješenje, pa je korištena interpolacija Akima polinomom, (Akima, 1970). Za razliku od klasične, Akimina metoda je lokalna pa izbjegava podbačaje i prebačaje tipične za interpolaciju polinomom 3. stupnja (Radić, 2004).

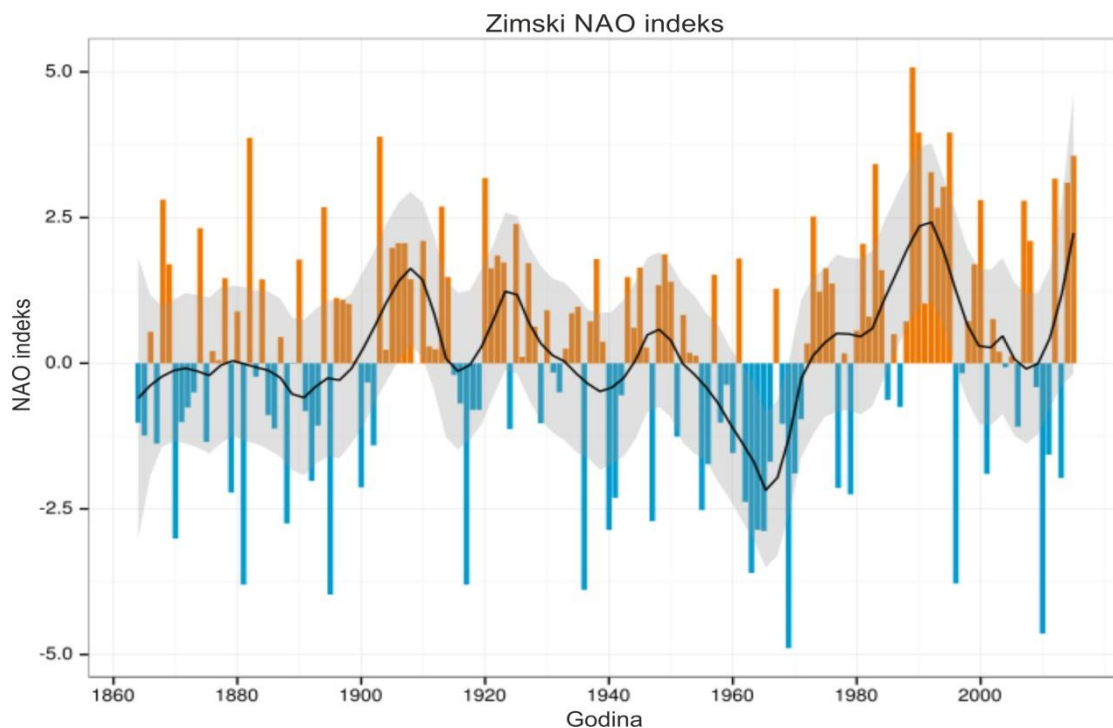
### 3.3. Način obrade i interpretacije rezultata

U ovom dijelu rada svaki klimatski element analizira se EMD metodom te se potom diskutira. Cilj ovog dijela analize je pronaći i analizirati fizikalne uzroke fluktuacija klimatskih elemenata grada Zagreba. Kako bi se to postiglo promatrat će se nisko frekventne varijacije na dekadskoj i stoljetnoj skali. Budući da EMD metoda izdvaja oscilacije najviše frekvencije koje su preostale u signalu, svaka IMF sadržavati će niže frekvencije od IMF prethodno dobivene. Zato će IMF 1 i IMF 2 sadržavati visoko frekventne skale koje predstavljaju klimatski šum i kao takve neće biti predmet ove analize.

Pored promatranja individualnih komponenti, slijedeći Radić (2004), a po uzoru na Loh i sur. (2001) i Zhang i sur. (2003) bit će promatrane i sume pojedinih IMF. Odbacujući klimatski šum i sumirajući samo nisko frekventne IMF na reziduum, komponentu po komponentu, mogu se donijeti dodatni zaključci o promatranim signalima. Zbog jednostavnijeg praćenja takvih suma uvedene su dodatne oznake za svaku pojedinu IMF. Zadnja dobivena IMF za pojedini niz proglašena je prvom dugoperiodičnom komponentom -  $k_1$ , sljedeća je  $k_2$  i tako redom do zadnje dugoperiodične komponente. Takve dugoperiodične funkcije superponiraju se na trend počevši od  $k_1$ , te se u svakom sljedećem koraku redom nadodaju preostale.

Kako bi se detektirali i razumjeli fizikalni uzroci klimatskih varijacija promatranih elemenata, promatra se utjecaj opće cirkulacije atmosfere (OCA). U umjerenim širinama OCA poprima oblik zapadne struje i nalazi se u labilnoj ravnoteži između Hadleyevog zonalnog i valnog Rossbyjevog režima. Njihovu izmjenu moguće je pratiti preko indeksa Sjeverno-atlantske oscilacije (eng. *North Atlantic Oscillation*, NAO), (npr. Slonosky, 2002). NAO je mjera jakosti zapadnog vjetrova koji puše preko sjeverno-atlantskog oceana u pojasu između  $40^\circ\text{N}$  i  $60^\circ\text{N}$  i kao takav najvažniji je mod atmosferske varijabilnosti iznad Europe (npr. Wallace i Gutzler, 1981; Hurrell i sur., 2003), pa tako i Hrvatske. Iako najveći utjecaj ima na zimsku sezonu, NAO je važan čimbenik vremena i klimatskih varijacija tijekom cijele godine (Hurrell i sur., 2003).

Slika 1 prikazuje izmjenu NAO indeksa u periodu od 1862. do 2015. godine. Iako se ne može uočiti jasna periodičnost u izmjenama pozitivne i negativne faze, ipak se mogu izdvojiti duža razdoblja kada je indeks bio pretežno u pozitivnom (1900.-1935. i 1970.-danas), odnosno negativnom (1862.-1900. i 1935.-1970.) modu.



Slika 1. Normaliziran zimski NAO indeks za period 1862.-2015. god.

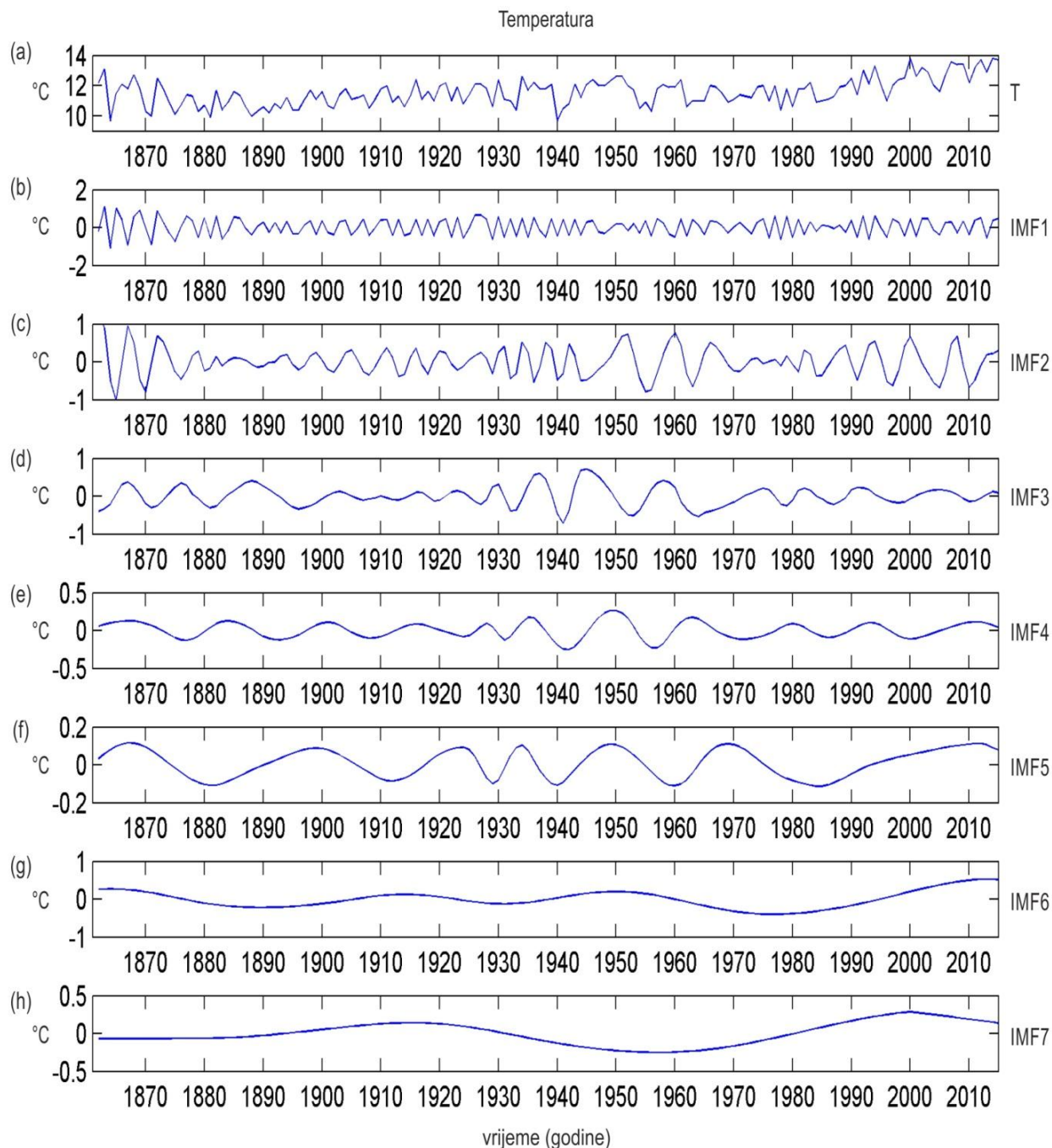
NAO je blisko povezan s hemisferskim modom varijabilnosti znanim kao Arktička oscilacija (npr. Thompson i Wallace, 1998). Thompson i Wallace izračunali su da koeficijent korelacije Arktičkog i NAO indeksa iznosi 0.69 i zaključili da su, iako ne isti, blisko povezani fenomeni. Podudaranje je posebno izraženo u posljednjih 80 godina.

Detaljno poznavanje prirodnih mehanizama koji uzrokuju klimatsku varijabilnost posebno je važno kako bi se jasnije mogao razlučiti antropogeni utjecaj na klimatske promjene. To je posebno značajno danas kad sve više svjedočimo ekstremnim vremenskim prilikama uzrokovanim klimatskim promjenama. Ukoliko bi mogli jasnije razabrati u kojoj mjeri su za promjene odgovorni prirodni procesi, a u kojoj mjeri čovjek, mogli bi uspješnije predvidjeti koji koraci se mogu poduzeti kako bi smanjili ili u potpunosti spriječili promjene koje bi mogle imati neželjene posljedice za čovječanstvo.

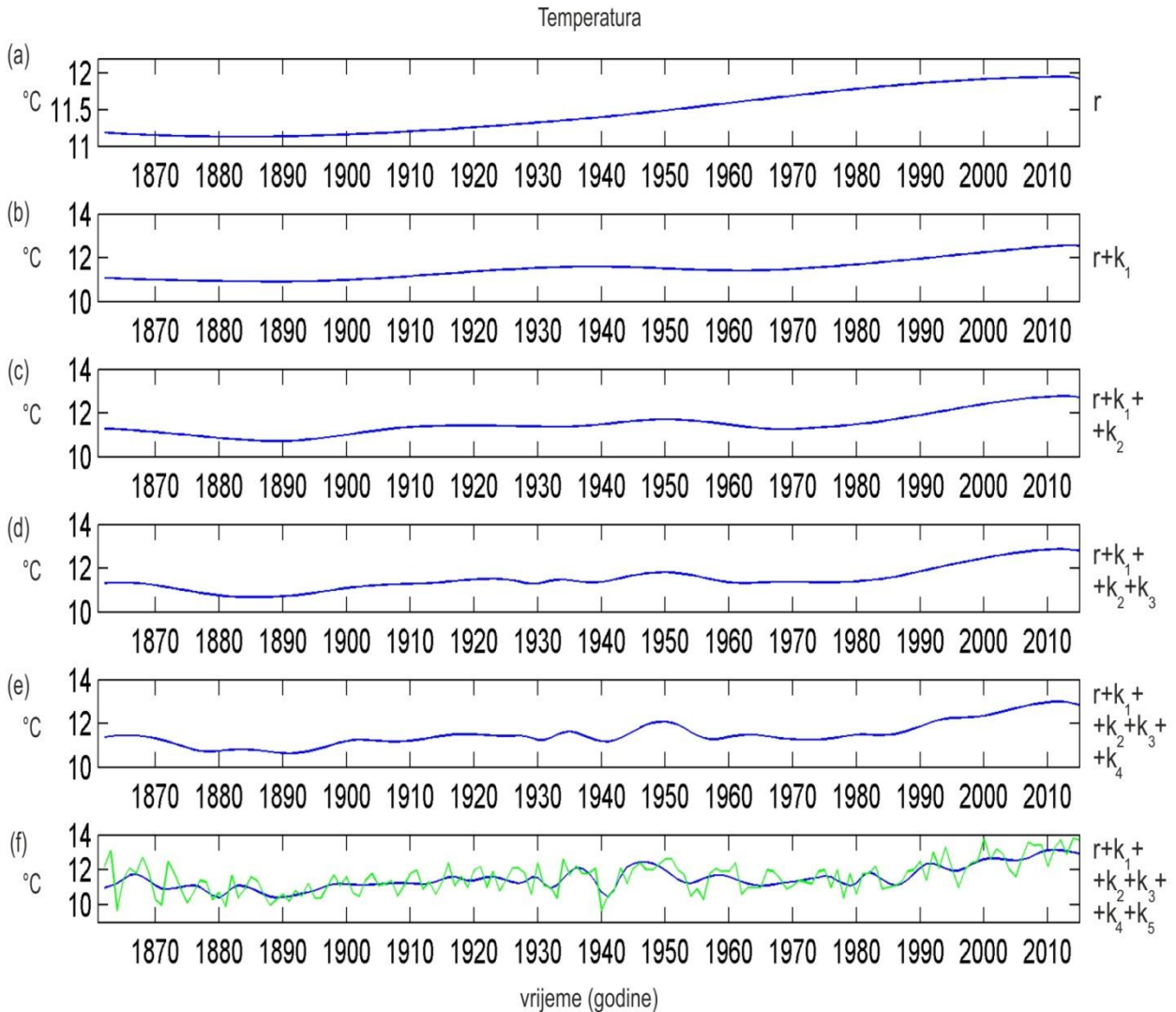
### 3.4. Rezultati

#### 3.4.1. Temperatura

Empirijskim rastavljanjem niza godišnjih srednjaka temperature proizašlo je sedam IMF-a i reziduum, koji su prikazani na slici 2.



Slika 2. Vremenski niz godišnjih srednjaka temperature (a) i IMF dobivene primjenom EMD metode na taj niz (b-d), počevši od IMF najkraćeg perioda (b) do IMF najdužeg perioda (h).



Slika 3. Reziduum  $r$  (a) te kumulativne sume reziduuma i odgovarajućih komponenti ( $r+k_1$ ,  $r+k_1+k_2\dots$ ), počevši od sume reziduuma i komponente  $k_1$  (b) do sume reziduuma i prvih 5 komponenti  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  i  $k_5$  (f), za niz godišnjih srednjaka temperature. Originalni niz prikazan je na dnu slike zelenom bojom.

Atmosferski procesi povezani s NAO pojavom odgovorni su za trećinu međugodišnje varijabilnosti temperature zraka na sjevernoj hemisferi tijekom zime (Rodwell i sur., 1999; Slonosky, 2002).

Utjecaj NAO pojave jasno je vidljiv već ako se pogleda IMF 3 na slici 2d. Naime, nad ovim područjem Europe, pozitivna NAO faza povezana je sa iznadprosječnim temperaturama i sa slabijim dotokom vlage s Atlantskog oceana (Hurrell i Van Loon, 1997). Topliji i suši uvjeti rezultirat će stabilnijim vremenom. Suprotno tome, za vrijeme negativne NAO faze, zbog dotoka vlažnog i hladnijeg zraka (Hurrell i Van Loon, 1997), vremenske prilike bit će znatno nestabilnije. IMF 3 jasno prikazuje tu činjenicu titrajući višim amplitudama za vrijeme pretežno negativne, odnosno nižim

amplitudama za vrijeme pretežno pozitivne NAO faze. Ista činjenica vidljiva je i iz IMF 2 (slika 2c) i IMF 4 (slika 2e), no u nešto manjoj mjeri.

IMF 7, koja je prikazana na slici 2h, je iz originalnog niza uspješno izolirala upravo frekvenciju izmjene te dvije faze NAO pojave, pa se zaključuje da upravo IMF 7 predstavlja utjecaj NAO oscilacije na temperaturu. Za vrijeme pozitivne faze ta IMF očekivano pokazuje više temperature, dok su za vrijeme negativne faze njene temperature niže. Posljednja tri desetljeća vrijednosti NAO indeksa su izrazito visoke, a u istom periodu je i amplituda IMF 7 najveća.

Reziduum i superpozicije IMF-ova prikazani su na slici 3. Reziduum odgovara trendu porasta srednjih godišnjih temperatura koji je započeo početkom 20. stoljeća i nastavio se sve do danas. Ukoliko na taj trend superponiramo IMF 7, za koju smo ranije utvrdili da predstavlja utjecaj NAO pojave na klimatsku varijabilnost, dobit ćemo krivulju  $r+k1$  prikazanu na slici 3b. Na njoj počinje biti vidljiva činjenica da je zatopljenje u posljednjih tridesetak godina ubrzano. Pored toga, vidljivo je i da temperature na toj krivulji ne dosežu niti  $13^\circ$ , dok se srednje godišnje temperature originalnog niza posljednjih godina penju i do  $13.8^\circ$ . Zbog toga se može zaključiti da sama NAO pojava nije dovoljna da se objasni zatopljenje zabilježeno posljednjih desetljeća. Evidentno je da postoji dodatni faktor koji utječe na povišenje temperature u periodu iza 1980. godine.

Promatrajući slike 3b-3f vidljivo je da se temperatura na svakoj krivulji dodatno povećava u posljednjih tridesetak godina, kako dodajemo naredne  $k$  komponente, jednu po jednu. To navodi na zaključak da se ne radi o faktoru koji je periodičan, pa njegov utjecaj nije zabilježen samo jednom, već se očituje u svim IMF-ovima. Signal u tom periodu odskače od prirodne varijabilnosti, što navodi na mogućnost da se radi o antropogenom utjecaju na promjenu temperature. Naime, zbog čovjekova djelovanja sastav atmosfere se mijenja i dolazi do porasta stakleničkih plinova koji apsorbiraju dugovalno zračenje Zemlje i time doprinose globalnom porastu temperature.

Na sezonske srednjake temperature također je primjenjena EMD metoda, a slike su prikazane u prilogu (slika D1-slika D16). Utjecaj NAO pojave vidljiv je u svakom godišnjem dobu. Kao i u slučaju godišnjih, tako i sezonski srednjaci u rastavu na svoje prirodne sastavne funkcije imaju po jednu IMF koja predstavlja NAO pojavu. Međutim, zimska IMF koja hvata mod NAO oscilacije ima dvostruko veću amplitudu od takvih IMF preostalih sezona (zimskoj IMF amplituda prelazi  $1^\circ$ , dok u slučaju ostalih godišnjih doba ne prelazi niti  $0.5^\circ$ ), što potvrđuje činjenicu da NAO pojava ima najveći utjecaj upravo na zimske temperature.

Reziduumi svih sezona pokazuju trend porasta sezonskih temperatura, a taj trend najizraženiji je za zimsku i proljetnu temperaturu. Stoga su upravo ta dva godišnja doba najzaslužnija za godišnji porast temperatura kojemu svjedočimo.

Kako bi ispitali koja sezona doprinosi najviše energije godišnjoj klimatskoj varijaciji, promatra se koeficijent linearne korelacije između godišnjih i sezonskih

nizova, pripadnih IMF-ova i njihovih superpozicija. Kako navodi Radić (2004), prirodne sastavne funkcije i njihovi nizovi nisu slučajni, tj. unutar sebe nekorelirani nizovi, pa nema smisla provoditi signifikantnost koeficijenata koreliranosti.

Tablica 1. Koeficijenti linearne korelacije između godišnjih (Tg) i sezonskih nizova temperature (Tz-temp. zima, Tp-temp. proljeće, Tlj-temp. ljeto, Tj-temp. jesen), za opservatorij Grič, 1862-2015.

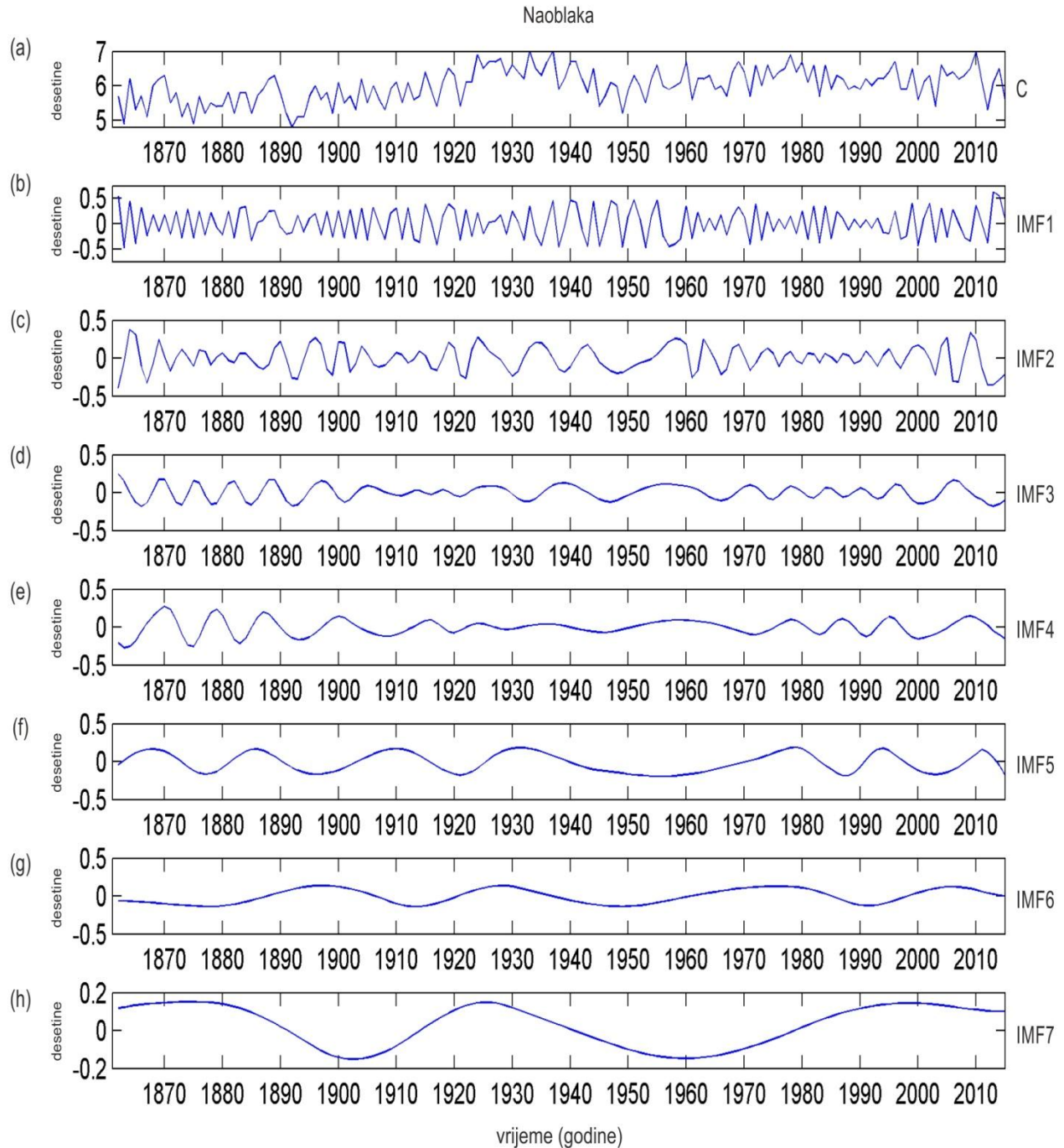
nizovi	Tg/Tz	Tg/Tp	Tg/Tlj	Tg/Tj
originalni	0.7479	0.7833	0.5910	0.5024
r	0.9941	0.9321	0.9687	0.8382
r+k1	0.8432	0.8912	0.8047	0.7274
r+k1+k2	0.8691	0.8801	0.8036	0.6998
r+k1+k2+k3	0.8497	0.8773	0.8197	0.6489
r+k1+k2+k3+k4	0.8062	0.8322	0.7503	0.6010
orig-IMF1-IMF2	0.7336	0.8284	0.7424	0.5648
orig-IMF1	0.7368	0.7920	0.7051	0.4911

Iz tablice 1 vidljivo je da postoji visoka korelacija sezonskih s godišnjim nizovima. Određena sezona će visoko korelirati s godišnjom ukoliko je dinamički vrlo aktivna pa perturbacije u atmosferi rastu do velikih amplituda i na taj način vrše najveći utjecaj na godišnji niz. U promatranom slučaju za temperaturu, korelacija je najveća za proljetni i zimski niz, dok u slučaju proljetnog zadržava vrlo visoku koreliranost i kod nizova dobivenih sumom komponenata. To je logično, budući da su prolasci ciklona najčešći u travnju i ožujku, zatim u studenom, prosincu i veljači (Lončar i Šinik, 1993).

Zanimljivo je usporediti rezultate prikazane u tablici 1 s rezultatima koje je dobila Radić (2004) za period 1862-2002. U 13 godina koje su protekle nakon izračuna od Radić (2003-2015), korelacija se smanjila za zimu, dok je za ostale sezone porasla. Uzrok može biti u tome što je NAO indeks u tom periodu u izrazito pozitivnoj fazi, a pozitivna faza znači i smanjenu advekciju vlažnog zraka sa zapada te iznadprosječne temperature. Ta kombinacija donosi stabilnije i ujednačenije temperature, posebice zimi, jer se NAO pojava najviše očituje u tom godišnjem dobu. Iz tog razloga dinamičnost atmosfere zimi je smanjena što rezultira i manjim utjecajem koji ta sezona ima na godišnji niz temperatura, odnosno smanjenim koeficijentom korelacije. S druge strane, zbog globalnog porasta temperature povećava se isparavanje vode, što rezultira u prosjeku vlažnijom i nestabilnijom troposferom. Taj utjecaj, osim zimi, izražen je i u ostalim godišnjim dobima, pa rastu perturbacije u atmosferi, a time i koeficijenti korelacije nizova koji predstavljaju proljetnu, ljetnu i jesensku sezonu s godišnjim nizom.

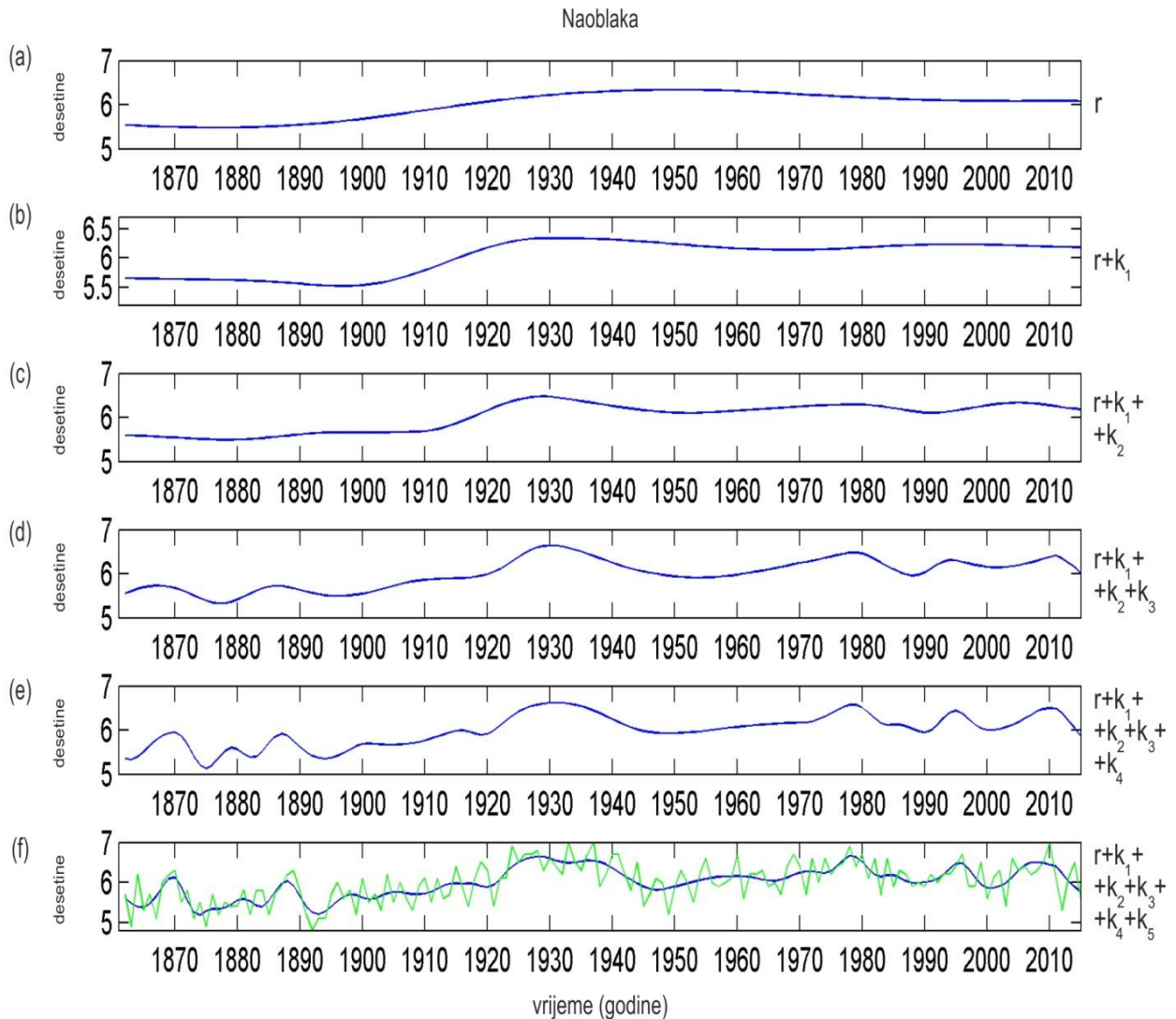
### 3.4.2. Naoblaka

Sedam IMF-a, dobiveni iz godišnjih srednjaka naoblake prikazani su na slici 4, dok su slike koje prikazuju reziduum i superpozicije IMF-a date na slici 5.



Slika 4. Isto kao slika 2, samo za niz godišnjih srednjaka naoblake.





Slika 5. Isto kao slika 3, samo za niz godišnjih srednjaka naoblake.

Reziduum pokazuje na slici 5 trend porasta naoblake početkom 20. stoljeća i blago opadanje u posljednjih 30 godina. Mogući uzročnik tako naglog porasta početkom prošlog stoljeća je povećano onečišćenje atmosfere, koje je posljedica izgaranja fosilnih goriva i industrijalizacije koja se u to doba počela razvijati u značajnoj mjeri. U onečišćenoj atmosferi udio aerosola je povećan, a aerosol, ovisno o okolnostima, možemo primijetiti kao maglu, izmaglicu ili čak oblak, koje često niti satelitska mjerenja ne mogu razdvojiti od 'pravih' oblaka (Norris, 2005). Od ranih osamdesetih godina do danas, zbog upotrebe kvalitetnijih goriva i sve bolje kontrole tvorničkih i prometnih zračnih onečišćenja, te zahvaljujući radu na podizanju ekološke osviještenosti na globalnoj razini, onečišćenost atmosfere uvelike se smanjila, pa je došlo i do smanjenja broja maglovitih i oblačnih dana uzrokovanih onečišćenjem, što je također vidljivo iz reziduuma.

Pored utjecaja koje onečišćenje atmosfere ima na stvaranje oblaka, ponovo se razmatra utjecaj NAO pojave. IMF 7, prikazana na slici 4h, titra približno istim periodom izmjene generalno pozitivne i negativne faze NAO indeksa. Međutim, podudaranje te IMF i NAO indeksa u slučaju naoblake nije toliko izraženo kao što je to bilo u slučaju temperature. Razlog tome može se pronaći ako se pogledaju sezonski srednjaci i njihov rastav na pripadne IMF-e. IMF 7 zimske sezone (na slici D5) pokazuje jasnu antikorelaciju s NAO indeksom. To je u potpunosti očekivano, budući da je za vrijeme negativne NAO faze pojačana advekcija vlažnog zraka s Atlantskog oceana. Pojačani dotok vlažnosti rezultirat će pojačanom naoblakom za vrijeme negativne NAO faze i obratno, što ta dva parametra dovodi u antikorelacijsku vezu. S druge strane, sve ostale sezone u svom rastavu na prirodne sastavne funkcije imaju po jednu IMF koja pokazuje pozitivnu korelaciju s NAO indeksom. Naime, u ostalim sezonama utjecaj NAO pojave je smanjen pa do izražaja dolazi drugi čimbenik. Satoh i sur., (2012) koristeći globalni nehidrostatički model atmosfere, istraživali su promjene koje nastaju u ukupnoj naoblaci s obzirom na povećanje temperature. Numeričke simulacije pokazale su da u toplijim uvjetima dolazi do porasta i prevladavanja visoke naoblake. Zbog povećanja temperatura također će doći i do pojačanog isparavanja s vodenih površina, što će također pridonijeti povećanju ukupne naoblake za vrijeme toplijih uvjeta. Dakle, u ovom slučaju povećanje (smanjenje) temperature rezultirat će povećanom (smanjenom) naoblakom. Vjerojatno je da će ovaj slučaj prevladati samo u slučaju kada je utjecaj NAO pojave smanjen, odnosno u proljetnoj, ljetnoj i jesenskoj sezoni.

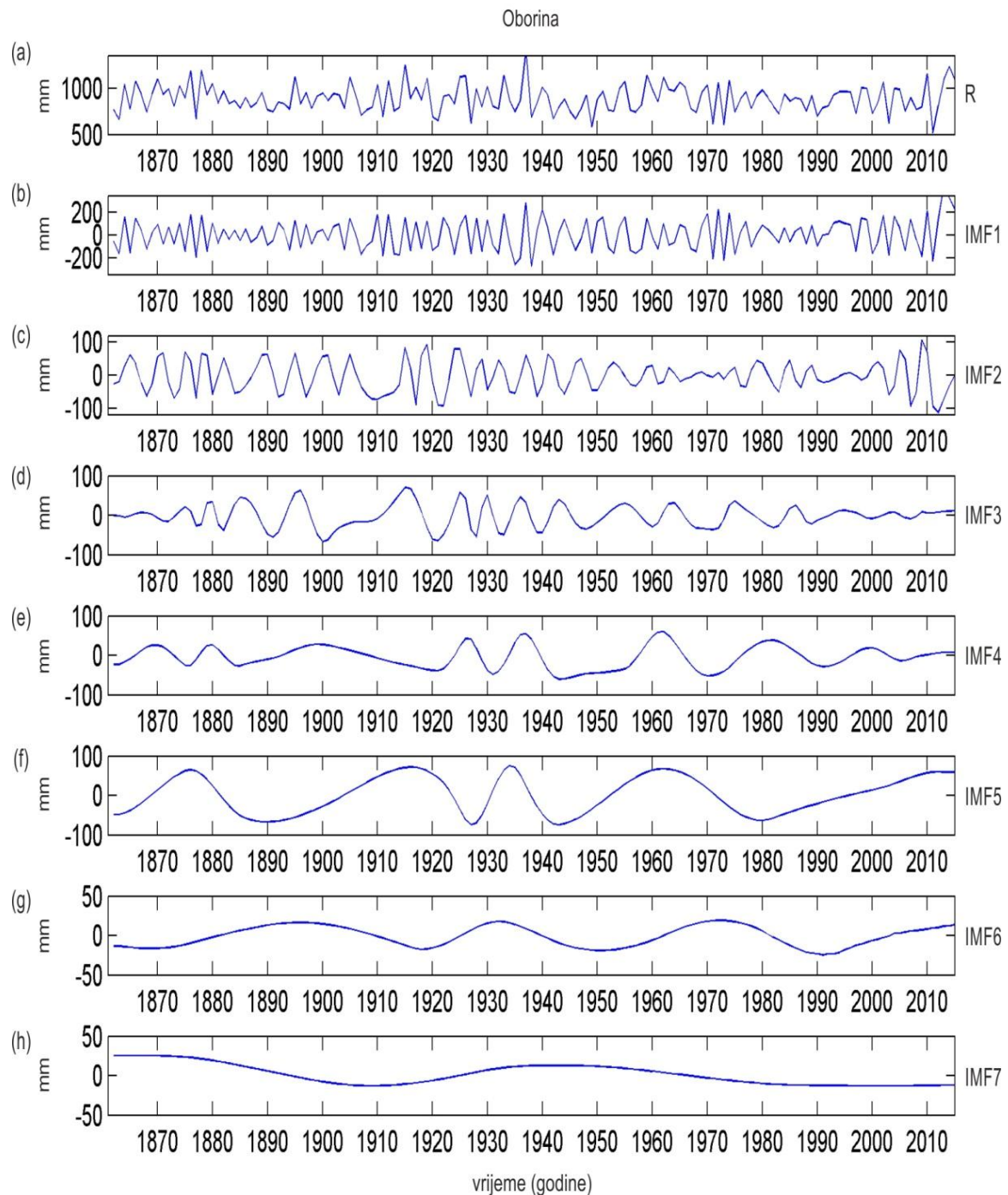
Tablica 2. Koeficijenti linearne korelacije između godišnjih ( $N_g$ ) i sezonskih nizova naoblake ( $N_z$ -naob. zima,  $N_p$ -naob. proljeće,  $N_lj$ -naob. ljeto,  $N_j$ -naob. jesen), za opservatorij Grič, 1862-2015.

nizovi	$N_g/N_z$	$N_g/N_p$	$N_g/N_{lj}$	$N_g/N_j$
originalni	0.7177	0.7448	0.6582	0.7451
r	0.8742	0.9636	0.8184	0.9414
r+k1	0.7257	0.8446	0.7234	0.9327
r+k1+k2	0.7269	0.8397	0.7101	0.9031
r+k1+k2+k3	0.7118	0.7921	0.7605	0.8351
r+k1+k2+k3+k4	0.6841	0.7607	0.7181	0.7822
orig-IMF1-IMF2	0.6860	0.7459	0.7471	0.7012
orig-IMF1	0.6150	0.7156	0.6687	0.6444

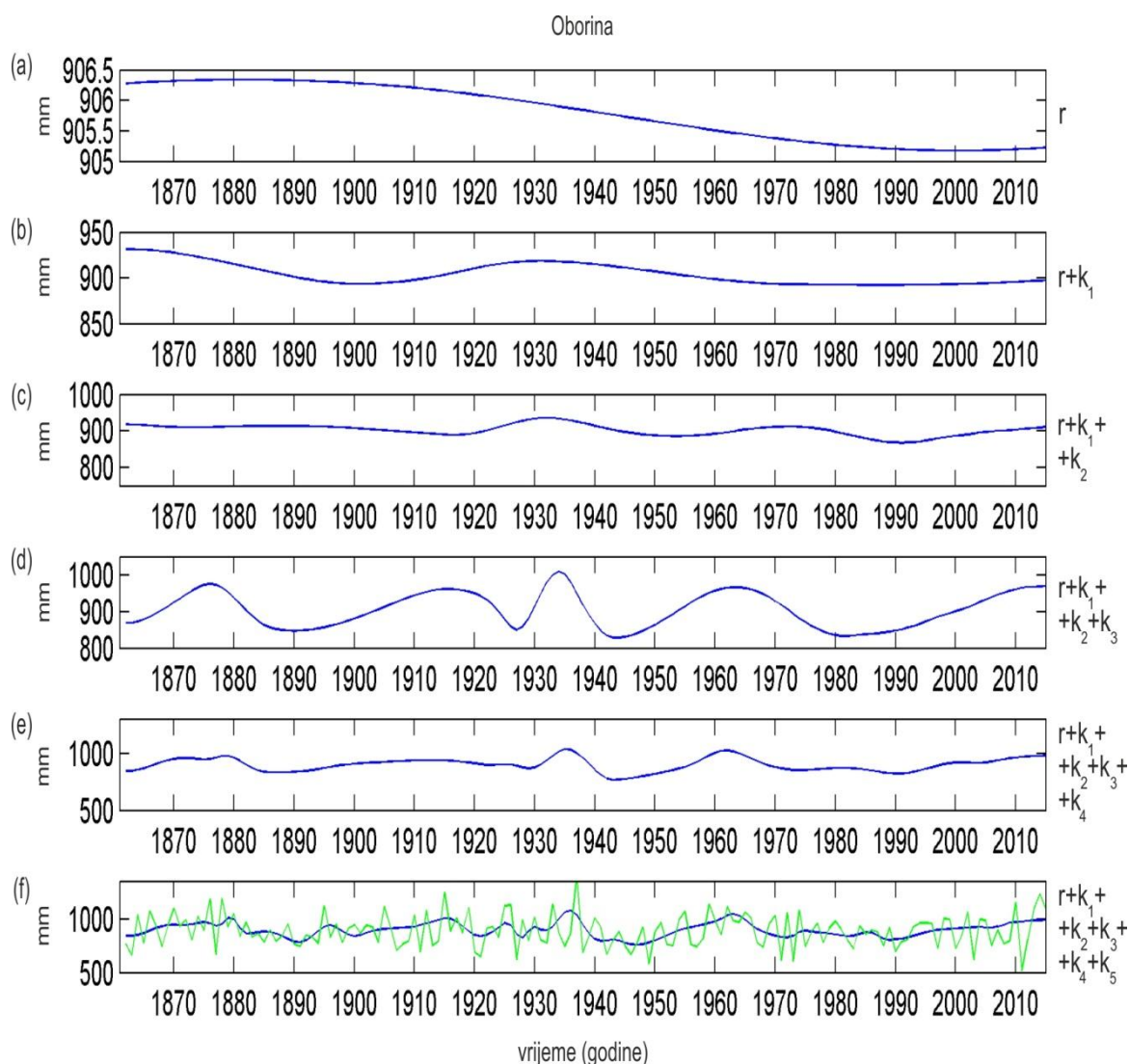
Iz tablice 2 vidljivo je da u slučaju naoblake proljeće i jesen vrše najveći utjecaj na godišnje srednjake. Naime zima pokazuje ujednačenije visoke vrijednosti, ljeto ujednačenije niske, dok iznosi naoblake dva prelazna godišnja doba pokazuju više međugodišnje varijacije.

### 3.4.3. Oborina

Na isti način kao i za prethodno analizirana dva klimatska elementa, i godišnji niz suma oborine može se rastaviti EMD metodom na 7 IMF-ova, koje su prikazane na slici 6. Na slici 7 prikazani su reziduum i superpozicije reziduuma i IMF.



Slika 6. Isto kao slika 2, samo za niz godišnjih suma oborine.



Slika 7. Isto kao slika 3, samo za niz godišnjih suma oborine.

IMF 7, koja je prikazana na slici 6h, bilježi period izmjene NAO indeksa s kojim pokazuje negativnu korelaciju. Pozitivan NAO mod povezan je sa smanjenom količinom oborine na ovom prostoru, a jedan od razloga za to je pomicanje putanje oluja sjevernije.

Reziduum prikazuje trend smanjenja ukupne količine oborine u posljednjih 100 godina. Takvo ponašanje je u skladu sa činjenicom da je u tom periodu NAO indeks bio uglavnom u pozitivnom modu. Međutim, u posljednjih tridesetak godina trend smanjenja oborine značajno se ublažio. Analiza slična onoj u slučaju temperature pokazat će dodatni porast oborine u tom periodu pri uzastopnom dodavanju k komponenti, što je vidljivo na slikama 7b-7f. Na taj način ponovo je moguće detektirati utjecaj neperiodičnog faktora, koji djeluje na povećanje oborine u svim dobivenim dugoperiodičkim IMF. Kao i u slučaju temperature, pretpostavka je da se

radi o utjecaju globalnog zatopljenja, koji u ovom slučaju djeluje tako da umanjuje utjecaj NAO pojave.

Oborina je važan klimatski element jer je izvor vode, a svaka njena promjena snažno se odražava na društvo, ekonomiju i ekosustav. Zbog toga je pitanje odziva oborine na globalno zatopljenje jedno od važnijih pitanja kojim se klimatolozi bave (npr. Voigt i Shaw, 2015). Većina klimatskih modela predviđa globalni porast količine oborine od 1-3% po stupnju zatopljenja (npr. Voigt i Shaw, 2015). Jedna od posljedica globalnog povećanja temperature je i veća učestalost ekstremnih vremenskih prilika. Da je za značajnu količinu zabilježene količine oborine odgovorna obilna kiša, ukazuje podatak da u periodu od 1980. do danas naoblaka pokazuje blago opadajući trend, dok se u istom periodu trend opadanja ukupne količine oborine zaustavio.

Ako se pogledaju sezonske sume oborine, utjecaj NAO oscilacije zabilježen je u zimskoj, proljetnoj i ljetnoj sezoni, dok je za zimsku podudaranje najizraženije. Zanimljivo je da upravo zimska sezona pokazuje porast ukupnih količina oborine, što se najjasnije vidi na najnižem grafu slike D9, koja predstavlja izglađeni originalni niz. To znači da je utjecaj globalnog zatopljenja u zimskoj sezoni izražen u toj mjeri da je nadjačao snažni utjecaj koji NAO pojava ima na to godišnje doba.

Analiza koreliranosti godišnjih i sezonskih suma prikazana u tablici 3., za ovaj klimatološki element nije dala bitne informacije.

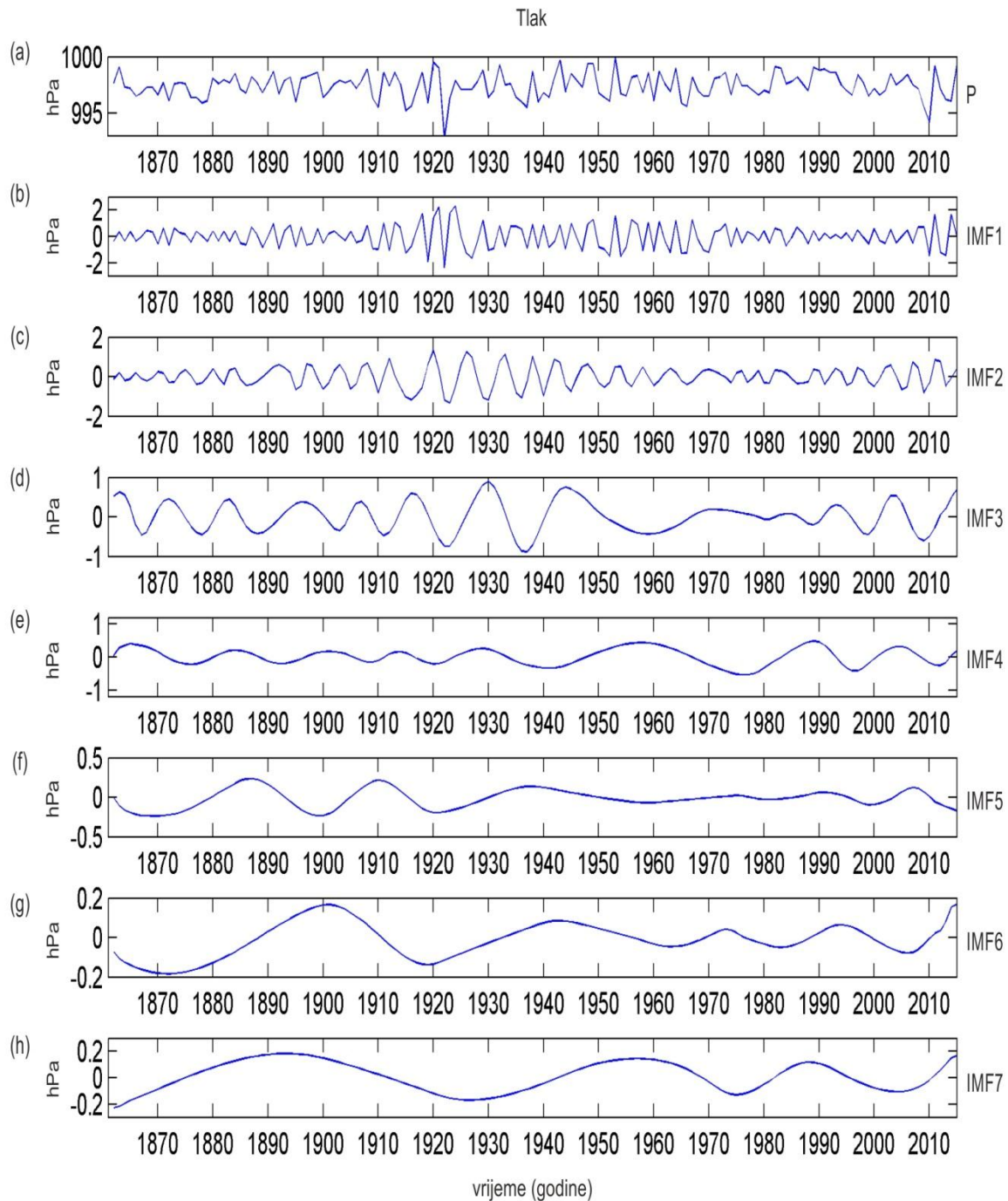
Tablica 3. Koeficijenti linearne korelacije između godišnjih ( $R_g$ ) i sezonskih nizova oborine ( $R_z$ -obor. zima,  $R_p$ -obor. proljeće,  $R_{lj}$ -obor. ljetno,  $R_j$ -obor. jesen), za opservatorij Grič, 1862-2015.

nizovi	$R_g/R_z$	$R_g/R_p$	$R_g/R_{lj}$	$R_g/R_j$
originalni	0.4343	0.4632	0.6026	0.5918
r	0.7925	0.7071	-0.9350	0.8214
r+k1	0.4350	0.3394	-0.3703	-0.1684
r+k1+k2	0.0679	0.4178	-0.3239	0.1311
r+k1+k2+k3	0.3143	0.5539	0.1320	0.2694
r+k1+k2+k3+k4	0.3241	0.5574	0.3459	0.1647
orig-IMF1-IMF2	-0.0142	0.0094	-0.0128	-0.0810
orig-IMF1	-0.0943	-0.0692	-0.0996	-0.2465

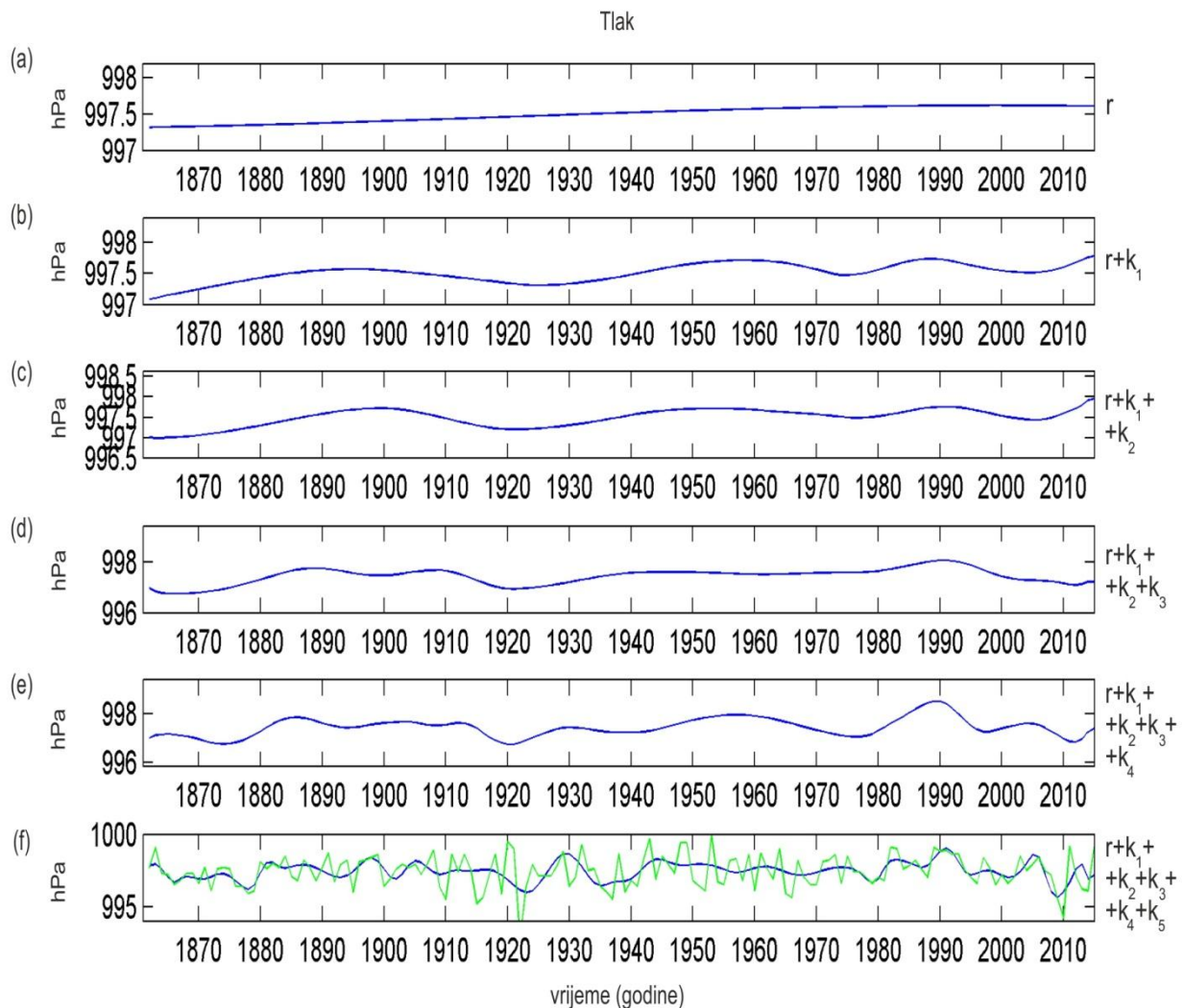
Vrijednosti koeficijenata korelacije između godišnjih i sezonskih nizova oborine u odnosu na iste vrijednosti za naoblaku i temperaturu, bitno su manje. Nema koreliranosti u trendovima između svih sezona što ukazuje na veliku varijabilnost ovog klimatskog elementa u godišnjem hodu (Radić, 2004).

### 3.4.4. Tlak

Niz godišnjih srednjaka tlaka također je bilo moguće rastaviti na sedam IMF (slika 8) i reziduum koji je sa superpozicijama IMF prikazan na slici 9.



Slika 8. Isto kao slika 2, samo za niz godišnjih srednjaka tlaka zraka.



Slika 9. Isto kao slika 3, samo za niz godišnjih srednjaka tlaka zraka.

Dva analizirana faktora, NAO pojava i antropogeni utjecaj na klimatske promjene, trebali bi se moći detektirati i u IMF-ovima dobivenim primjenom EMD metode na godišnje i sezonske srednjake tlaka. Naime, NAO oscilacija direktno je povezana s kolebanjem atmosferskog tlaka na području Islanda i Azora, a upravo promjene tlaka zraka povezane s NAO pojavom uzrokuju promjene meridionalnog gradijenta tlaka te tako modificiraju prevladavajuće zapadno strujanje u umjerenim širinama kao i advekciju zraka s Atlantika (npr. Stilinović i sur., 2014). S internetske stranice NOAA (eng. *National Oceanic and Atmospheric Administration*) dobiven je podatak da se Zagreb nalazi na području u kojem tlak pozitivno korelira s NAO indeksom.

Što se tiče čovjekovog utjecaja, Gillet i sur. (2003) su, koristeći kombinirane simulacije četiri klimatska modela, detektirali direktan utjecaj kojeg staklenički plinovi i sulfatni aerosoli imaju na tlak na razini mora u zimskoj sezoni. Otkrili su da je zbog ljudskog djelovanja tlak zraka povišen iznad suprotnog dijela Atlantskog

oceana, južne Europe i sjeverne Afrike, a snižen iznad polarnih područja i sjevernoga dijela Tihog oceana.

Dakle, i pozitivna faza NAO oscilacije zabilježena posljednjih desetljeća, i čovjekov utjecaj u vidu povećanja stakleničkih plinova trebali bi utjecati na povišenje tlaka zraka na zagrebačkom području. Međutim, u ovom slučaju analiza EMD metodom godišnjih srednjaka tlaka zraka nije pokazala fizikalno značajne rezultate. Reziduum pokazuje zanemariv trend porasta tlaka zraka u periodu do 1980. godine (radi se o porastu od tek 0.3 hPa) i stagnaciju sve do danas. IMF 1 i 2, koje titraju najvećim amplitudama, otkrivaju razdoblje niskog klimatskog šuma, u periodu 1970.-2010. Niti jedna IMF ne izdvaja period NAO oscilacije. Tlak zraka posljednjih 25 godina čak i pada, za što su direktno zaslužne kratkoperiodičke oscilacije, koje u slučaju ovog klimatskog elementa imaju značajno veće amplitude od dugoperiodičkih (amplitudu od 2 hPa, naspram amplitude od 0.2 hPa).

U slučaju sezonskih srednjaka, zimska sezona jedina pokazuje utjecaj NAO faktora. Međutim, sa slike D13 vidi se da u ovom slučaju i IMF 5 i 6 hvataju signal NAO oscilacije. Naime, nakon 1940. godine vidi se očita promjena frekvencije u IMF 5, kada ta funkcija gubi period kojim je do tada titrala i hvata mod NAO pojave. IMF 6 hvata NAO period od 1940. Te dvije funkcije zajedno pokazuju očekivane fluktuacije tlaka pod utjecajem NAO oscilacije – rast tlaka za vrijeme pozitivne i opadanje za vrijeme negativne NAO faze. I u slučaju zimskih srednjaka nadodavanje prvih dviju dugoperiodičkih komponenti  $k_1$  i  $k_2$  na reziduum, utječe na rast tlaka zraka u posljednjih 30-ak godina. Međutim, već nakon nadodavanja komponente  $k_3$  tlak počinje padati, da bi konačno tlak u posljednjih 30 godina bio čak i niži od prosjeka. Iz toga se može vidjeti da je utjecaj kratkoperiodičkih oscilacija na ovaj element nadilazi i dokida utjecaj oscilacija dužeg vremenskog perioda.

Povezanost sezonskih i godišnjih nizova ispitana je koeficijentima linearne korelacije, a rezultati su prikazani u tablici 4.

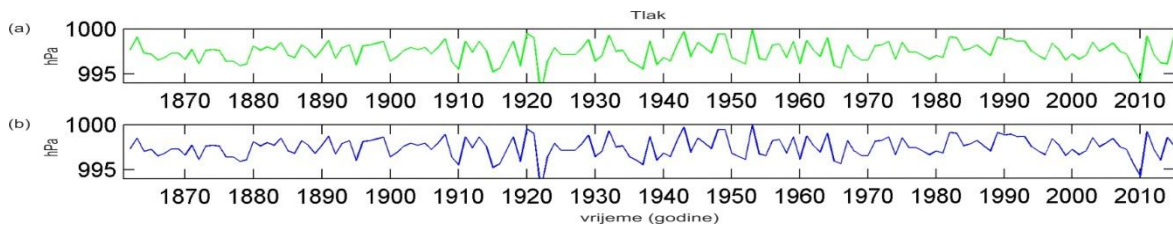
Tablica 4. Koeficijenti linearne korelacije između godišnjih ( $P_g$ ) i sezonskih nizova tlaka zraka ( $P_z$ -tlak zima,  $P_p$ -tlak proljeće,  $P_{lj}$ -tlak ljeto,  $P_j$ -tlak jesen), za opservatorij Grič, 1862-2015.

nizovi	$P_g/P_z$	$P_g/P_p$	$P_g/P_{lj}$	$P_g/P_j$
originalni	0.7478	0.4812	0.4025	0.4660
r	-0.3345	0.5463	0.3203	0.2526
r+k1	-0.1956	0.2407	0.5602	0.6105
r+k1+k2	0.0161	0.4388	0.4633	0.6426
r+k1+k2+k3	0.1878	0.5400	0.3891	0.3404
r+k1+k2+k3+k4	0.2774	0.5226	0.2999	0.2644
orig-IMF1-IMF2	0.3126	0.3825	0.3733	0.1831
orig-IMF1	0.3957	0.4758	0.2509	0.3224



Korelacija je značajna samo za zimsku sezonu, dok za ostale sezone iznosi manje od 0.5. Ukoliko oduzmemo IMF 1 iz niza zimske sezone, korelacija s godišnjim nizom značajno se smanjuje, što znači da je upravo ta kratkoperiodična IMF odgovorna za visoku koreliranost ta dva niza. IMF 1 zimske sezone ima najveće amplitude i nosi najviše energije od svih prirodnih sastavnih funkcija koje su proizašle za tlak.

Za kraj ove analize važno je obratiti pozornost na izuzetnu učinkovitost EMD metode u odstranjivanju šuma iz vremenskih nizova. Na slikama 3f, 5f, 7f i 9f plava krivulja dobivena je superponiranjem svih IMF, osim prve dvije, dok zelena predstavlja originalni niz. Na svakoj slici je vidljivo gotovo savršeno podudaranje izvornog niza i funkcije koja je u potpunosti produkt EMD metode. Ukoliko se na plavu krivulju superponiraju i preostale dvije IMF moguće je potpuno rekonstruirati originalni niz, što je jasno vidljivo iz slike 10.



Slika 10. a) Originalni niz godišnjih srednjaka tlaka. b) Niz dobiven superponiranjem reziduuma i IMF funkcija, dobivenih primjenom EMD metode na niz godišnjih srednjaka tlaka zraka.

Zbog te činjenice moguće je ovu metodu iskoristiti kao filter, bilo nisko ili visoko propusni.

## 4. Validacija Hilbert-Huangove transformacije valičnom analizom

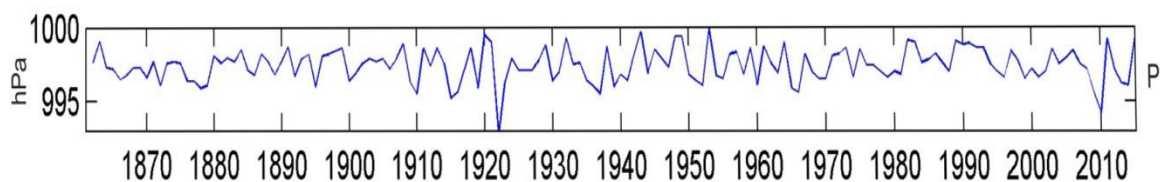
Za potpuni prikaz rezultata na prirodne sastavne funkcije primjenjuje se Hilbertova transformacija. Kako bi se validirao takav pristup i rezultati, u ovom dijelu rada Hilbertova transformacija bit će primjenjena na IMF dobivene iz niza godišnjih srednjaka tlaka, a dobiven Hilbertov spektar usporedit će se s valičnim. Za generiranje valičnog spektra korišten je programski paket sa stranice <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>, dok je za HHT korišten slobodno dostupan MATLAB softver dostupan na stranici <http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/emd.html>.

Hilbertov i valični spektar prikazuju amplitudni ili energijski doprinos koji određena frekvencija ima u vremenu. Obje metode primjenjene su na niz godišnjih srednjaka tlaka zraka, a njihova usporedba prikazana je na slikama 12 i 13. Sa slika je vidljivo da generalno postoji jako dobro podudaranje rezultata dobivenih objema metodama. I HHT i CWT prikazuju slične varijacije frekvencije u vremenu te izdvajaju povećanu koncentraciju energije oko 1920. godine, perioda oscilacija 3 i 7 godina, te 2010. godine približnog perioda od 4 godine. Međutim, u samom načinu izračuna i prikazu rezultata među ovim dvjema metodama postoje značajne razlike.

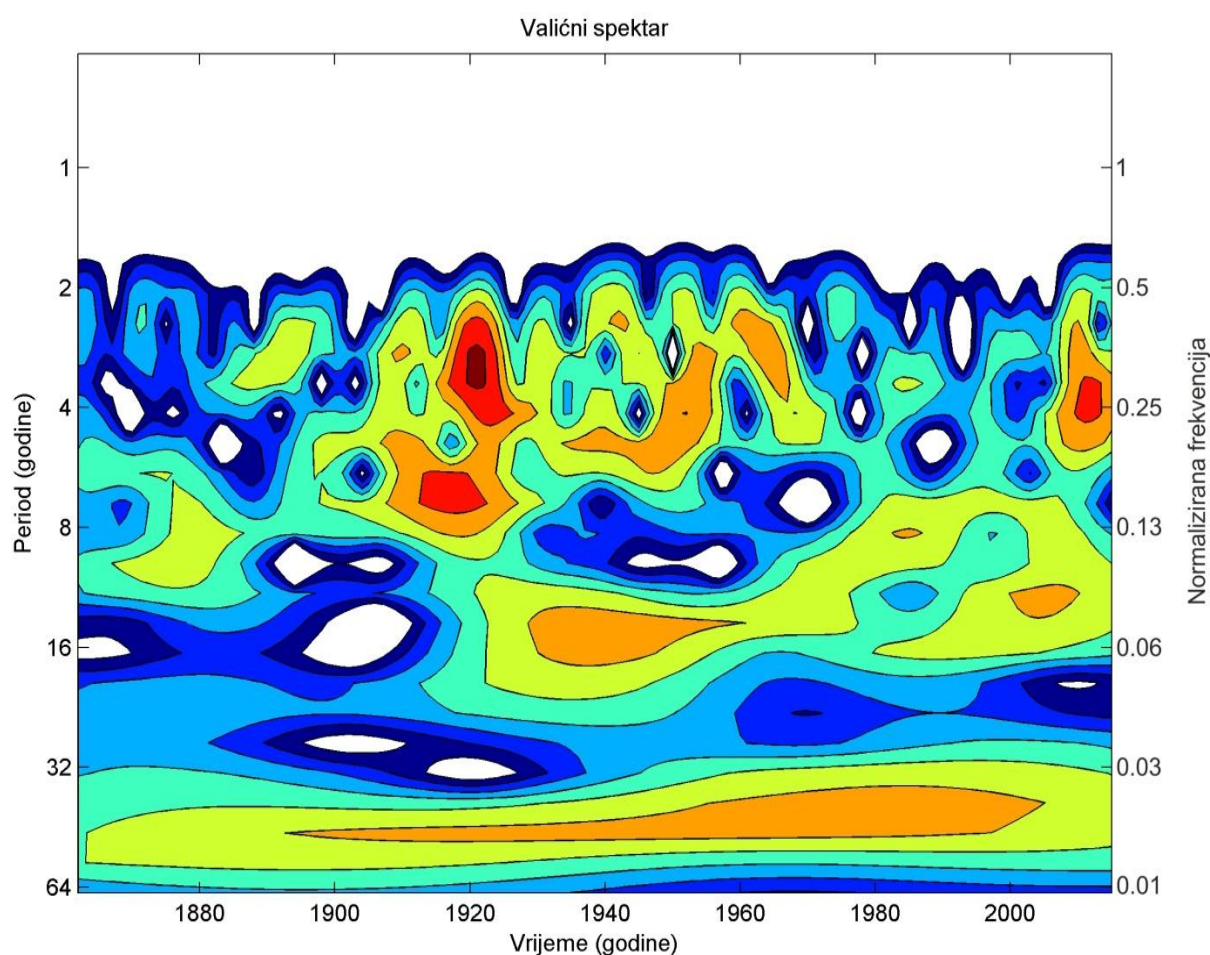
Valična analiza koristi valiće, odnosno kratke oscilatorne valove, koje preklapa sa signalom u svakoj točki u vremenu. Valić se odabire ovisno o obilježju signala koji se želi detektirati. Neki od najpoznatijih tipova valičnih funkcija su Haarov valić, Morletov valić te sombrero. U slučaju najčešće korištenog, Morletovog, lokalizirani valići su sinusoidalni po prirodi, a izračunata frekvencija u tom slučaju je frekvencija sinusoide koja pokazuje najbolje preklapanje sa signalom. Ukoliko analizirani valni profil i najmanje odstupa od te jednostavne sinusoide, potrebne su dodatne frekvencije u vidu lokaliziranih harmonijskih nizova, kako bi se zabilježile devijacije (Kijewski-Correa i Kareem, 2006). Na taj način, trenutna frekvencija valične analize je zapravo srednja frekvencija, dok širina frekventnog pojasa reflektira stupanj devijacije frekvencija od srednjaka (Priestly, 1988; Kijewski-Correa i Kareem, 2006). Zbog toga, kao što je vidljivo sa slike 12, valični spektar prikazuje frekventni pojas unutar kojeg je sadržana osnovna energija vala, a prisustvo svjetlijih nijansi koje blijede prema visokofrekventnom pojasu sugerira raspodjelu energije izvan dominantne valne frekvencije. Zbog takvog izgladivanja i zbog činjenice da valična transformacija pretpostavlja frekvencijsku stacionarnost u području vremenskog razmaka odabranog valića, procjenjivanje trenutne frekvencije ovom metodom je suboptimalno.

Dodatni nedostatak valične analize koji se često navodi u literaturi je činjenica da se matični valić, a time i obilježja signala koja se žele detektirati, moraju unaprijed odrediti. To je često teško, pogotovo kad se ne zna ništa o promatranom signalu. Ako

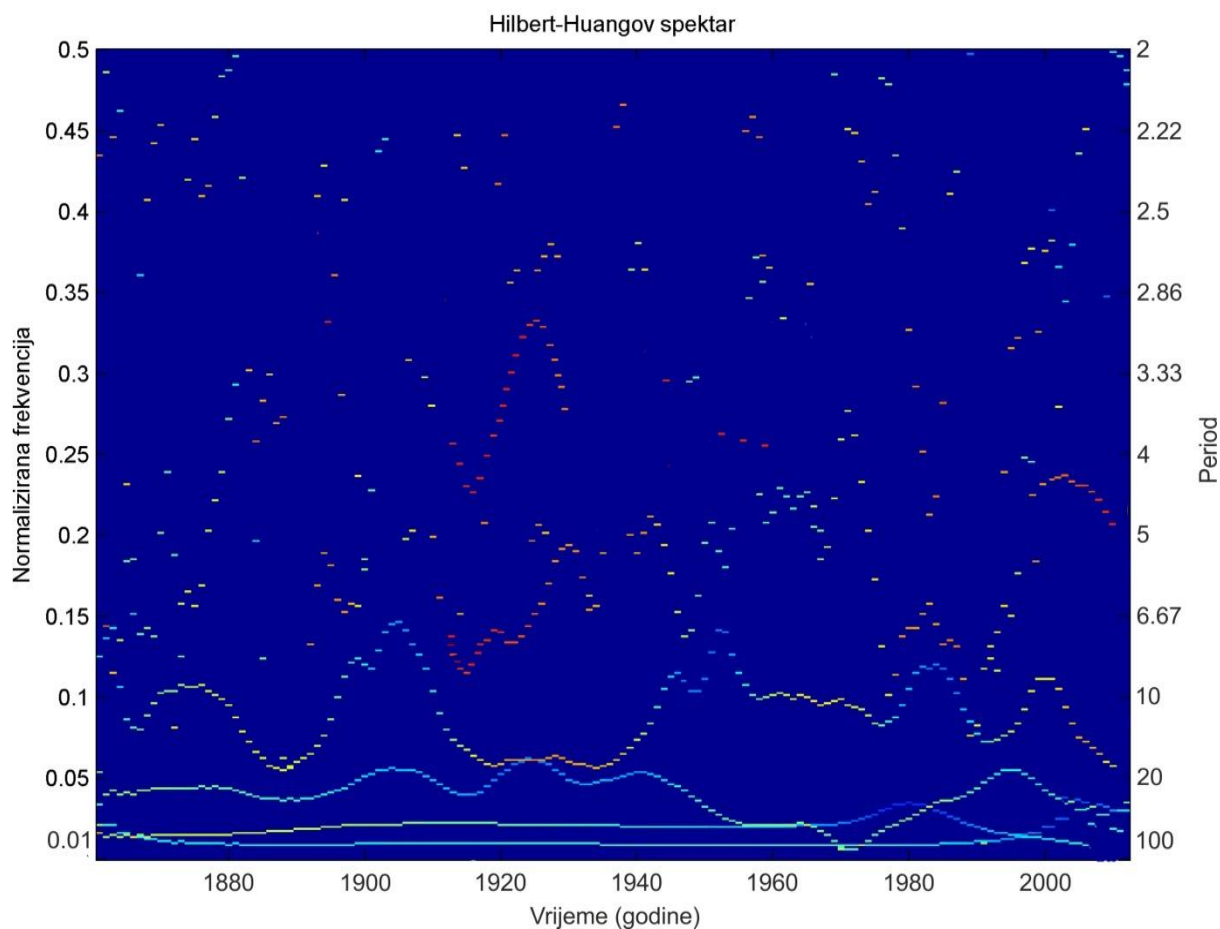
se odabere neprikladan set valića, dobiveni valićni koeficijenti mogu dati nefizikalne rezultate koji neće reflektirati stvarne procese u analiziranom signalu. Vjerojatno je da je upravo zbog takve ovisnosti rezultata o odabiru matičnog valića nastala EMD metoda čija je baza u potpunosti temeljena i izvedena iz analiziranih podataka.



Slika 11. Niz godišnjih srednjaka tlaka zraka.



Slika 12. Valićni spektar niza prikazanog na slici 11. Crvena boja prikazuje najveću koncentraciju energije.



Slika 13. Huang-Hilbertov spektar niza prikazanog na slici 11. I u ovom slučaju crvena boja prikazuje najveću koncentraciju energije, no u ovom slučaju uz značajno poboljšanu vremensko-frekvencijsku rezoluciju.

U odnosu na valićnu analizu, HHT (slika 13) ima značajno poboljšanu frekvencijsku i vremensku razlučivost. Razlog tomu je već spomenuta mogućnost Hilbertove transformacije da prikaže trenutnu frekvenciju, čije korištenje omogućuje pripadnom spektru jedinstvenu sposobnost prikaza frekventne modulacije unutar jednog perioda (eng. *intra-wave frequency modulation*, IFM). Frekvencija je tradicionalno definirana kao:

$$\omega = \frac{1}{T}, \quad (15)$$

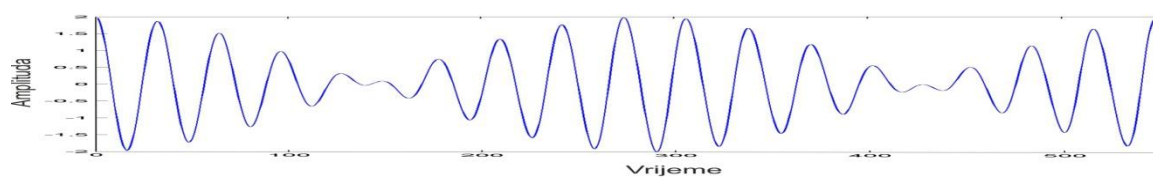
gdje T predstavlja period oscilacije. Iako standardna za frekvenciju, ovakva definicija je ograničavajuća jer ne dozvoljava mogućnost promjene frekvencije unutar jednog ciklusa oscilacija, što je jedno od glavnih obilježja nelinearnih i nestacionarnih procesa, kakvi su uglavnom geofizički procesi.

Za primjer tlaka, IFM je najjasnije vidljiva ako se pogleda svijetloplava krivulja na slici 12, treća odozdo. Iako prikazuje oscilacije od približno 20 godina, jasno se vide promjene frekvencije unutar tog perioda. Kao i u slučaju ostalih krivulja, frekvencijske modulacije prikazane su tankom linijom što omogućuje precizniju frekvencijsku identifikaciju i jasnu vremensku lokalizaciju svake promjene frekvencije. Posljedično, suptilne promjene frekvencije su jasno vidljive, a energija je lokalizirana i u frekvencijskoj i u vremenskoj domeni. Kako navode Huang i sur. (1998), prikaz nelinearnih distorzija preko IFM omogućuje bolju i fizikalno smisleniju interpretaciju energijsko-frekvencijsko-vremenske raspodjele.

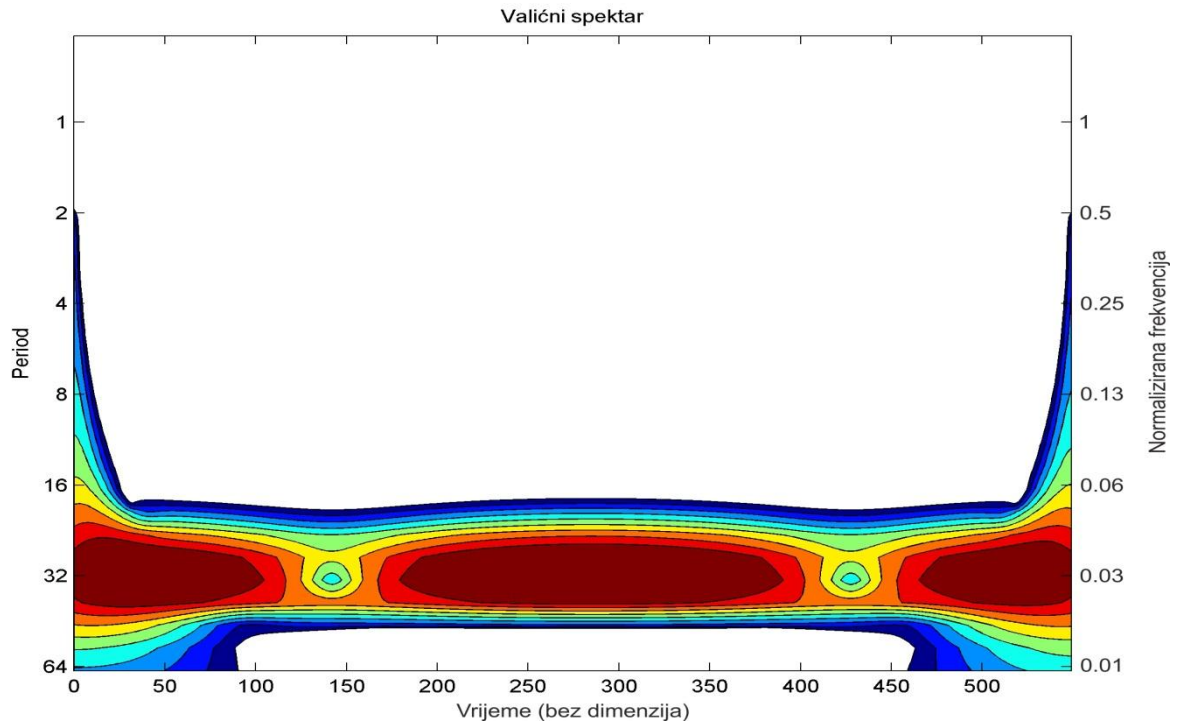
Usprkos poboljšanoj rezoluciji koju HHT ima u usporedbi sa CWT-om, postoje slučajevi kada niti jedna metoda ne uspijeva točno izdvojiti frekvencijske komponente koje se nalaze u signalu. Kada se signal sastoji od superpozicije dva ili više vala koji titraju frekvencijama koje se vrlo malo razlikuju jedna od druge, niti HHT, niti CWT ne uspijevaju identificirati dvije zasebne harmonijske komponente. Na slikama 15 i 16 izračunati su valićni i Hilbertov spektar za signal koji se sastoji od linearne sume dva blisko razdvojena kosinusna vala, primjer koji se često koristi u literaturi kako bi se pokazalo ovo svojstvo (npr. Huang i sur.1998; Kijewski-Correa i Kareem, 2006):

$$x(t)=\cos\left(\frac{2}{30}\pi t\right)+\cos\left(\frac{2}{34}\pi t\right) \quad (16)$$

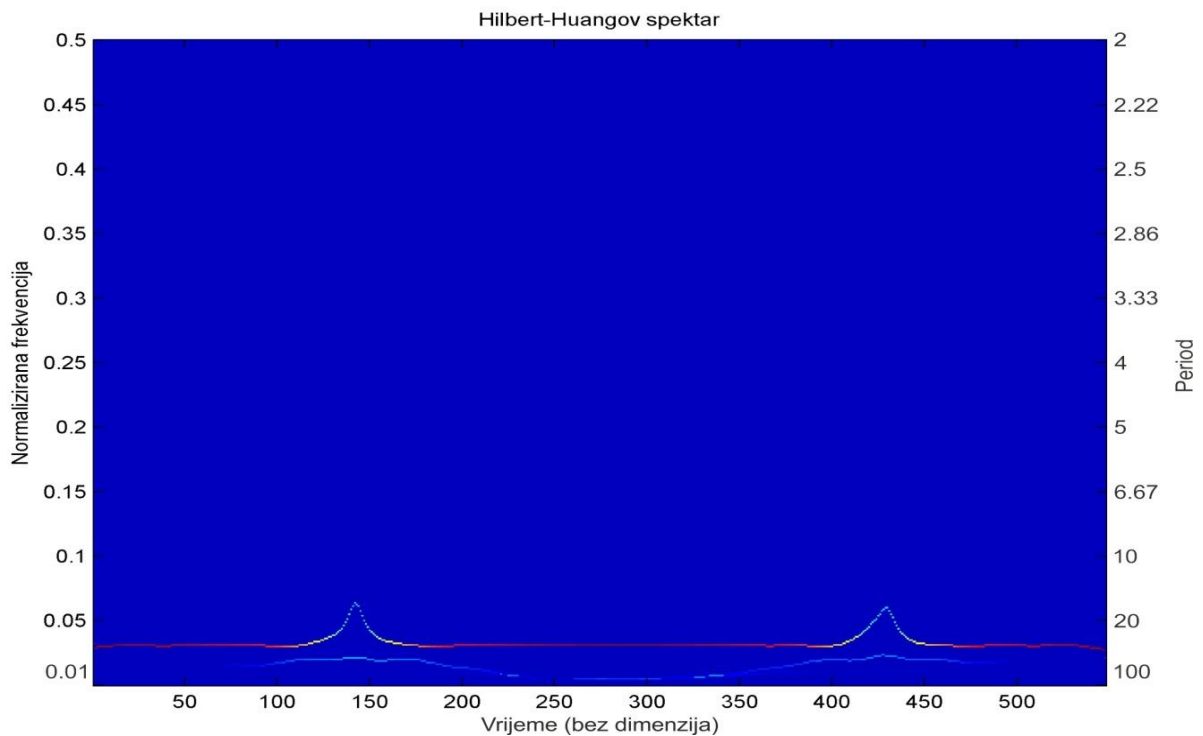
Niti jedna metoda ne prikazuje dvije zasebne linearne komponente, već tretira pojavu udara kao amplitudno modulirani val. Razlog tomu u slučaju HHT-a leži u već spomenutom binarnom svojstvu koje karakterizira EMD metodu, tj. u nemogućnosti te metode da razluči dvojni harmonijsku prirodu signala koji imaju bliske frekvencijske komponente. U slučaju CWT-a razlog leži u slabijim rezolucijskim mogućnostima koje ta metoda ima.



Slika 14. Niz dobiven linearnom superpozicijom dva kosinusna vala, dat izrazom  $x(t)=\cos\left(\frac{2}{30}\pi t\right)+\cos\left(\frac{2}{34}\pi t\right)$ . Vidljiva je pojava udara.



Slika 15. Valični spektar niza prikazanog na slici 14. Metoda ne uspijeva identificirati dvije zasebne harmonijske komponente.



Slika 16. Huang-Hilbertov spektar niza prikazanog na slici 14. Niti ova metoda ne uspijeva identificirati dvije zasebne harmonijske komponente već tretira signal kao amplitudno modulirani val.

## 5. Zaključak

U ovom radu predstavljena je relativno nova metoda za spektralnu analizu, Hilbert-Huangova transformacija. Prvi dio HHT-a, metoda empirijskog rastavljanja, EMD, korištena je kako bi se analizirali uzroci klimatske varijabilnosti temperature, naoblake, oborine i tlaka, mjerenih na opservatoriji Grič, Zagreb, u periodu 1862-2015. Metoda rastavlja originalne nizove na tzv. prirodne sastavne funkcije, od kojih je svaka karakterizirana svojstvenom vremenskom skalom. Pokazan je značajan utjecaj koji Sjeverno-atlantska oscilacija (eng. *North Atlantic Oscillation*, NAO) ima na sve analizirane klimatske elemente, posebice na temperaturu i oborinu. Očekivano, najveći utjecaj NAO pojava vrši na zimsku sezonu. Za period od posljednjih 30-ak godina u analiziranim nizovima detektirano je odstupanje signala od prirodne varijabilnosti, što ukazuje na moguć antropogeni utjecaj. Zbog promjena u sastavu atmosfere do kojih dolazi zbog čovjekovog djelovanja, dolazi do porasta temperature, a posljedično do porasta visoke naoblake i smanjenja ukupne količine oborine. U slučaju tlaka zraka primjena EMD metode nije pokazala fizikalno značajne rezultate.

Primjenom drugog dijela metode, Hilbertove transformacije, na niz godišnjih srednjaka tlaka, pokazana je poboljšana moć razlučivosti te metode u odnosu na valićnu analizu. Međutim, kako je EMD metoda binarni filter, Hilbertova transformacija, očekivano, ne uspijeva izdvojiti harmonijske komponente signala koji se sastoji od superpozicije dva ili više vala koji titraju bliskim frekvencijama.

Unatoč značajnim uspjesima koji su ovom metodom postignuti na području geofizičkih i drugih znanstvenih disciplina, valja naglasiti da je HHT još uvijek tek empirijska metoda, koja još uvijek nije konačno teorijski definirana. Otkad je predstavljena, (Huang i sur.,1998) do danas, metoda je stekla brojna priznanja i pristalice među znanstvenicima. Postignuta su i bitna poboljšanja, ali uglavnom u području primjene, dok su matematički problemi uglavnom ostali neriješeni.

Upravo je za adaptivne metode, poput HHT-a, u kojima je baza izvedena i temeljena na podacima, posebno izazovno postaviti teorijske temelje. Za takav pristup još ne postoji matematički model ni presedan (Huang i Wu, 2008).

Ovaj rad je mali doprinos brojnim, dosad izvršenim empirijskim istraživanjima koja pokazuju mogućnosti ove metode. Nadamo se da će istraživanja ovom metodom postići dovoljno jak odjek da privuku pažnju šire znanstvene zajednice te da će se usmjerenim naporima konačno postaviti čvrsti analitički temelji ove metode.

U međuvremenu, autor metode, Norden E. Huang i njegovi suradnici i dalje se redovito služe prednostima koje metoda pruža u praktičnom radu. Kako sam Huang u svom radu, *Introduction to the Hilbert-Huang transform and its related mathematical problems*, (2005) objašnjava, navodeći poznati citat Olivera Heavisidea, "Hoću li odbiti večeru, samo zato jer ne razumijem u potpunosti proces probave?"

## Literatura

Akima, H. (1970): A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures, *Journal of the Associations for Computer Machinery*, 17, 589–602.

Barnhart, B.L. (2011): The Hilbert-Huang Transform: theory, applications, development, Iowa research online, University thesis.

Belušić, D. (2001): Ocjena determiniranosti zagrebačke klime primjenom analize singularnog spektra, *Diplomski rad*, PMF, Sveučilište u Zagrebu.

Dätig, M., Schlurmann, T. (2004): Performance and limitations of Hilbert-Huang transformation HHT with an application to irregular water waves. *Ocean Eng.*, 3115, 1783–1834.

Gajić-Čapka, M. (1993a): Fluctuations and trends of annual precipitation in different climatic regions of Croatia, *Theoretical and Applied Climatology*, 47, 215–221.

Gajić-Čapka, M. (1993b): Periodicity of annual precipitation in different climatic regions of Croatia, *Theoretical and Applied Climatology*, 49, 213–216.

Gabriel Rilling. Empirical Mode Decomposition. <http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/emd.html>

Gillett, N., Zwiers F., Weaver A., Stott P. (2003): Detection of human influence on sea-level pressure, *Nature* 422, 292-294.

Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, E. H., Zheng, Q., Tung, C. C., Liu, H. H. (1998): The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time analysis, *Proceedings of the Royal Society of London*, A454, 903–995.

Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R. (1999): A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31, 417–457.

Huang, N. E. i sur. (2003): A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. *Proc. R. Soc. London*, 459, 2317–2345.

Huang, N. E., Shen, Z. (2005): Hilbert-Huang transform and its applications, *Interdisciplinary mathematical sciences*, 5.

Huang, N.E., Wu, Z. (2008): A review on Hilbert-Huang transform: Method and its applications to geophysical studies. *Reviews of geophysics*, 46, 2.



Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Visbeck, M., Ottersen, G. (2003): An overview of the North Atlantic Oscillation, *The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact*, Editions of Geophysical Monograph Series, 134, 1–35.

Hurrell, J.W., Van Loon, H. (1997): Decadal variations in climate associated with the north atlantic oscillation, *Climatic Change*, 36, 301–326.

Kijewski-Correa, T., Kareem A. (2006): Efficacy of Hilbert and Wavelet Transforms for Time-Frequency Analysis, *Journal of engineering mechanics*, 1037-1049.

Lee, J. K., Park, Y. S. (1994): The complex envelope signal and an application to structural modal parameter estimation. *Mech. Syst.Signal Process.*, 8, 129–144.

Loh, C.H., Wu, T.C., Huang N.E. (2001): Application of the empirical mode decomposition-Hilbert spectrum method to identify near-fault ground-motion characteristics and structural responses, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 1339–1357.

Lončar, E., Šinik, N. (1993): Neke osobine godišnjeg hoda tlaka zraka u Hrvatskoj, *Hrvatski meteorološki časopis*, 28, 81–88.

Norris, J. R. (2005): Multidecadal changes in near-global cloud cover and estimated cloud cover radiative forcing. *J. Geophys. Res. Atmos*, 110.

Penzar, I., Juras, J., Marki A. (1992): Long-term meteorological measurements at Zagreb: 1862–1990, *Geofizika*, 9, 1–171.

Priestley, M. B. (1988): *Nonlinear and nonstationary time-series analysis*, Academic, San Diego.

Radić, V. (2004): Analiza zagrebačkih klimatoloških nizova koristeći empirijski rastavljene prirodne sastavne funkcije, *Diplomski rad, PMF, Sveučilište u Zagrebu*.

Rodwell, M.J., Rowell, D.P., Folland, C.K. (1999): Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate, *Nature*, 398, 320-333.

Satoh, M., Iga, S., Tomita, H., Tsushima, Y., Noda, A.T. (2012): Response of Upper Clouds in Global Warming Experiments Obtained Using a Global Nonhydrostatic Model with Explicit Cloud Processes. *J. Climate*, 25, 2178–2191.

Slonosky, V. (2002): Does the NAO index represent zonal flow? The influence of the NAO on North Atlantic surface temperature, *Climate dynamics*, 19, 17-30.

Stilinović T., Herceg-Bulić I., Vučetić V., (2014): Utjecaj zimske Sjeveno-atlantske oscilacije na proljetne temperature tla u Hrvatskoj, *Croatian Meteorological Journal*, 48/49, 2013/14, 37-45.

Šinik, N., (1985): Signifikantnost recentnih klimatskih fluktuacija u Zagrebu, *Geofizika*, 2, 81–92.

Thompson D. W. J. ,Wallace J. M. (1998): The Arctic Oscillation signature in winter time geopotential height and temperature fields, *Geophys Res Lett*, 25, 1297-1300.

Vecchi, G. A., B. J. Soden (2007): Global warming and the weakening of the tropical circulation. *J. Climate*, 20, 4316–4340.

Voigt, A., Shaw T.A. (2015): Circulation response to warming shaped by radiative changes of clouds and water vapour, *Nature Geoscience*, 2.

Wallace, J.M., Gutzler, D.S. (1981): Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Mon Wea Rev*, 109,784-812.

Wu, Z., Huang, N. E. (2004): A study of the characteristic of whitenoise using the empirical mode decomposition method. *Proc. R. Soc.London, Ser. A*, 460, 1597–1611.

Zhang, R., Ma, S., Safak, E., Hartzell S. (2003): Hilbert-Huang transform analysis of dynamic and earthquake motion recordings, *Journal of Engineering Mechanics*, 129, 861–875.

# Detection of Climatic Fluctuations by Hilbert - Huang Method in the Data of Zagreb – Grič Observatory

## Abstract

Hilbert-Huang transform (HHT), consisting of empirical mode decomposition (EMD) and Hilbert spectral analysis (HSA), is an empirically based data-analysis method which can be used to extract the periodic components embedded within nonlinear and nonstationary data. The empirical mode decomposition, the method that decomposes the original series into so called intrinsic mode functions (IMF), is applied to the series of annual and seasonal averages of temperature, cloudiness, air pressure and annual and seasonal sums of precipitation observed in Zagreb-Grič, in the period 1862.–2015.

The analysis of low frequency IMFs has shown significant influence of the North-Atlantic oscillation on the temperature, cloudiness and precipitation series, both annual and seasonal. For these same elements, the analysis revealed mild deviations in natural fluctuations of the signal in the last 30 years, which are most likely caused by antropogenic activities.

Next, Hilbert transform is applied to each IMF obtained for the series of annual averages of air pressure. In order to validate this approach and the results, associated Hilbert spectrum is compared with the wavelet analysis. Comparison showed significantly improved time and frequency resolution of HHT. Moreover, HHT showed unique capability of displaying intrawave frequency modulation (IFM), i.e. changes in frequency that occur within one cycle of oscillation.

## Dodatak A

Kako je ovaj rad u osnovi nastavak na diplomski rad Valentine Radić, u ovom odjeljku bit će dat sažetak zaključaka rada: „Analiza zagrebačkih klimatoloških nizova koristeći empirijski rastavljene prirodne sastavne funkcije“, (2004).

Radić je analizu fluktuacija klimatskih elemenata grada Zagreba prvenstveno temeljila na izmjeni zonalnog Hadleyevog i valnog Rossbyevog režima. Za temperaturni niz, Radić pokazuje kako IMF2, IMF3 i IMF4 imaju relativno niske amplitude temperaturnih varijacija u periodu 1880-1930, te zaključuje kako su takve amplitude najvjerojatnije rezultat Hadleyevog režima opće cirkulacije atmosfere (OCA) koji je prevladavao nad srednjom Europom za vrijeme tog perioda. Ističe kako se situacija promijenila nakon 1930., kada jača Rossbyev režim, koji donosi više nepravilnosti i čestih promjena vremena, što je vidljivo u gotovo svim IMF, u obliku povećanih amplituda varijacija. Navodi kako suma trenda i posljednje dvije IMF, pokazuju dvije glavne karakteristike: ubrzani rast temperature u prvoj vpolovici dvadesetog stoljeća, koje je poznato kao Arktičko zatopljenje te porast temperature u dvije dekade koje su prethodile radu.

Radić dovodi u vezu imjenu Hadleyevog i Rossbyevog režima sa indeksom Sjeverno-atlantske oscilacije (NAO). Pozitivnu fazu NAO oscilacije vezuje uz iznad prosječne temperature i povećanu vlažnost zraka, dok su za vrijeme negativne faze temperature niže, a vlažnost zraka je smanjena.

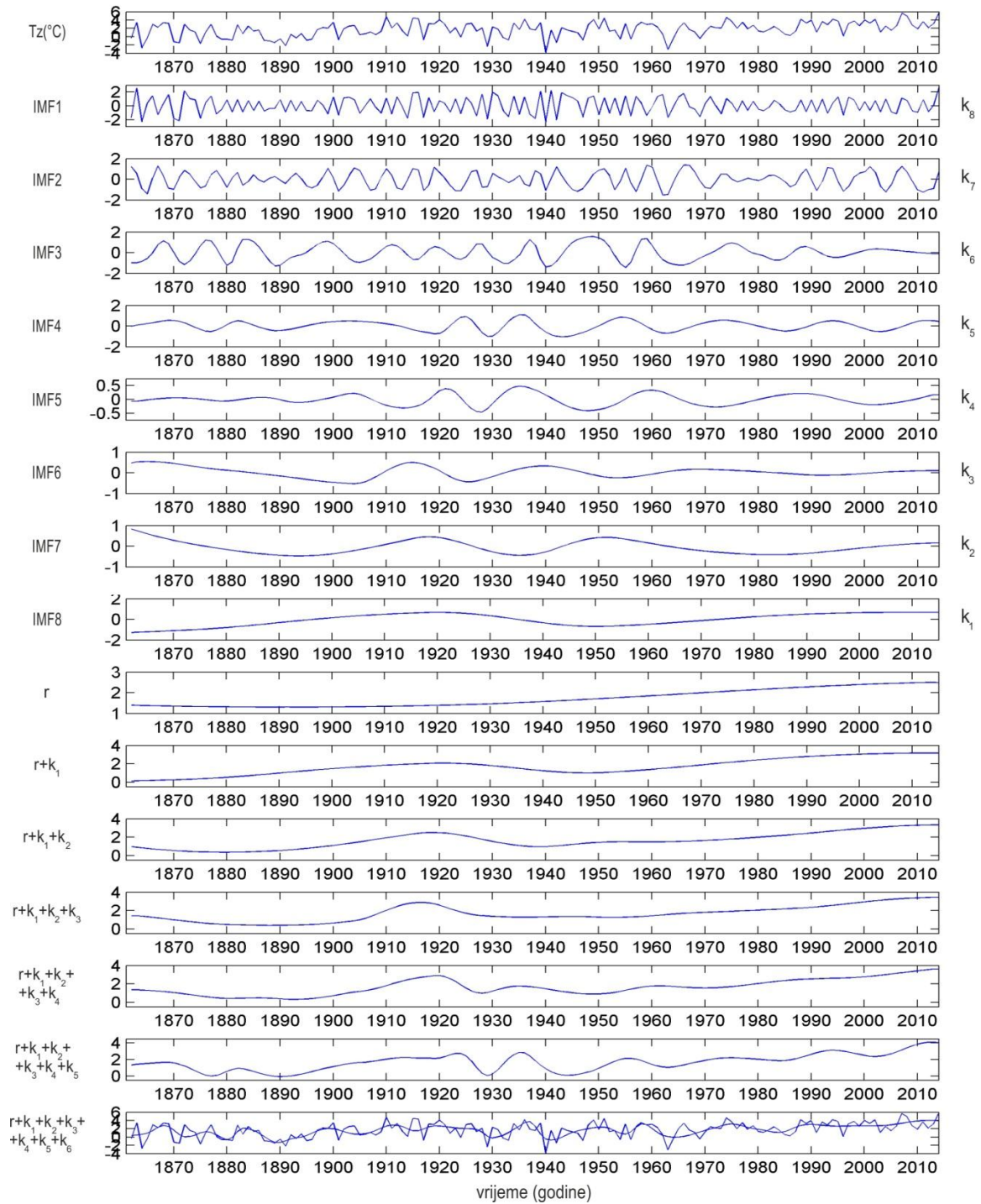
U slučaju naoblake, ubrzani porast na početku 20. st. Radić navodi kao rezultat pojačane advekcije vodene pare sa zapada, što povezuje sa pozitivnom NAO fazom, koja je u to vrijeme prevladavala.

Opadajući trend niza globalnog zračenja, koji je posebice izražen početkom 20. st., očekivano dovodi u vezu sa porastom naoblake u tom periodu, budući da se globalno zračenje direktno procjenjuje iz naoblake i insolacije.

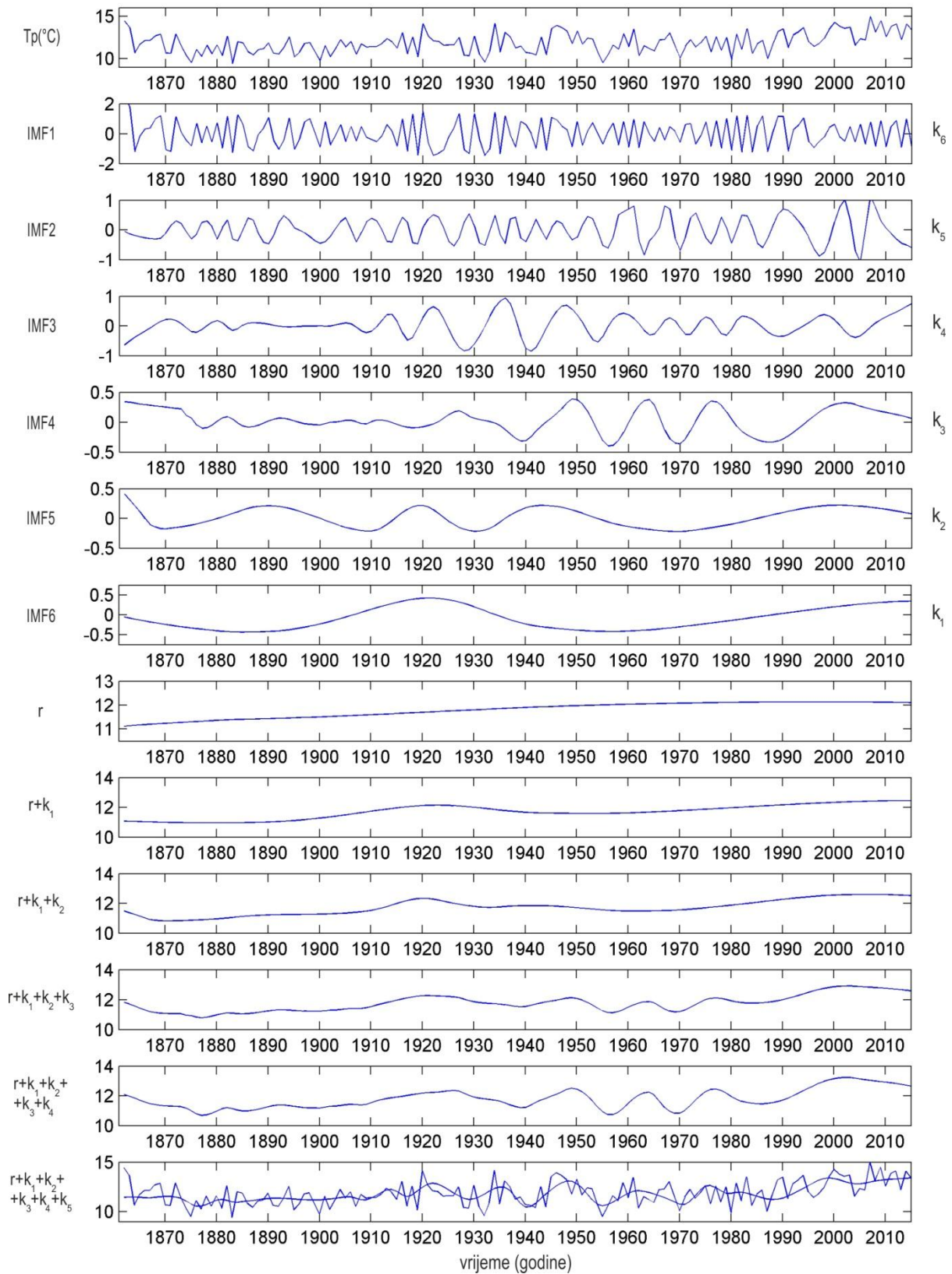
Rezidual i sume niskofrekventnih IMF za oborinu i tlak, u diplomskom radu Radić, ne pokazuju signifikantan trend. U slučaju tlaka, nisu zabilježene niti značajne dugoperiodičke oscilacije.

U ovom diplomskom radu polazi se od nešto drugačijih pretpostavki. Naime, u većini literature pronađeno je da se pozitivna faza NAO oscilacije povezuje sa iznad prosječnim temperaturama i smanjenim dovodom vlažnosti zraka u ovom području, dok je za vrijeme negativne faze temperatura niža, a vlažnost zraka povećana (npr. Stilinović, 2014). To se razlikuje od gore navedenih pretpostavljenih veza NAO oscilacije s temperaturom i vlažnošću zraka. Iz toga razloga u ovom radu dobiveni rezultati interpretirani su na drugačiji način.

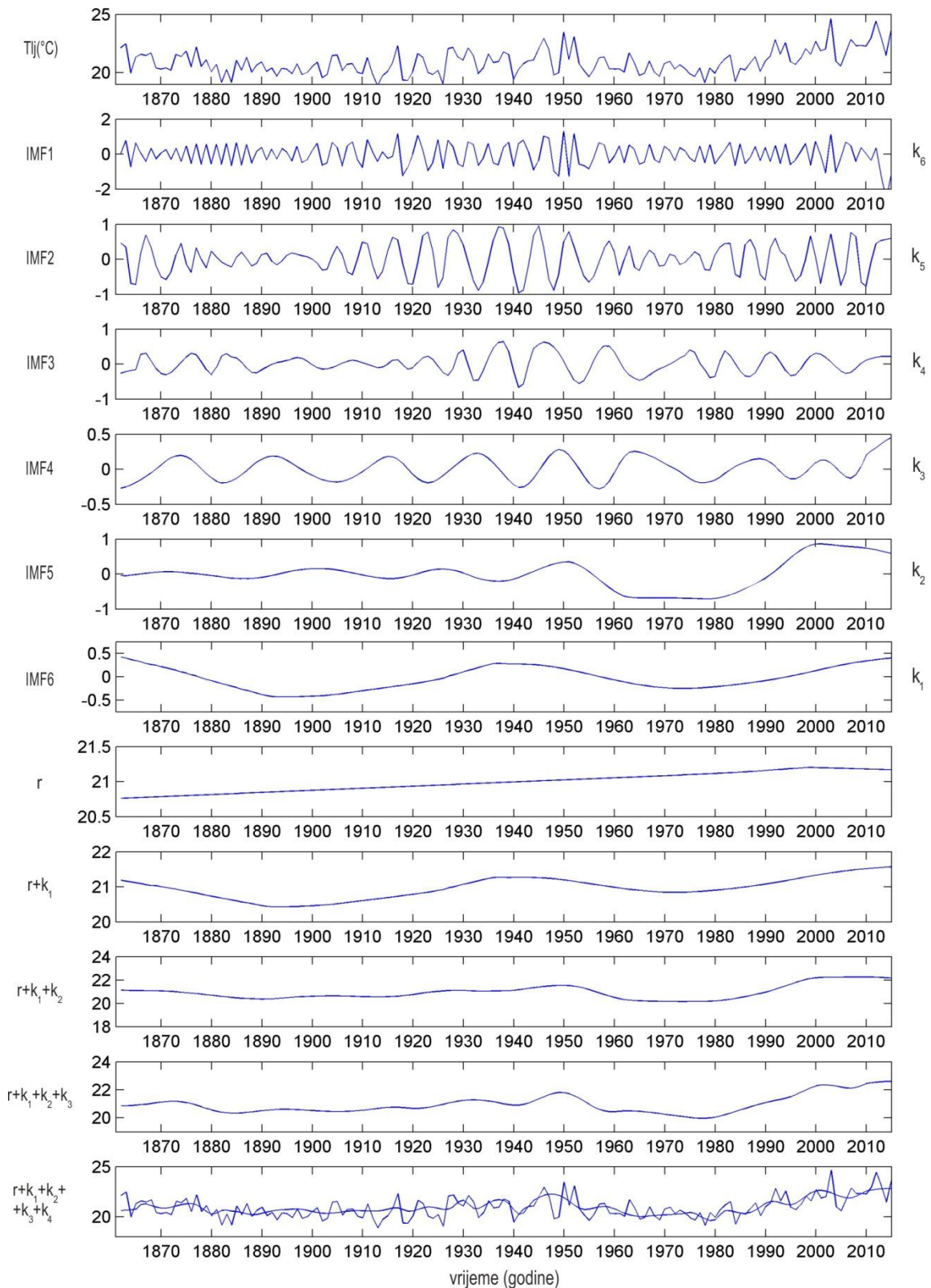
## Dodatak B



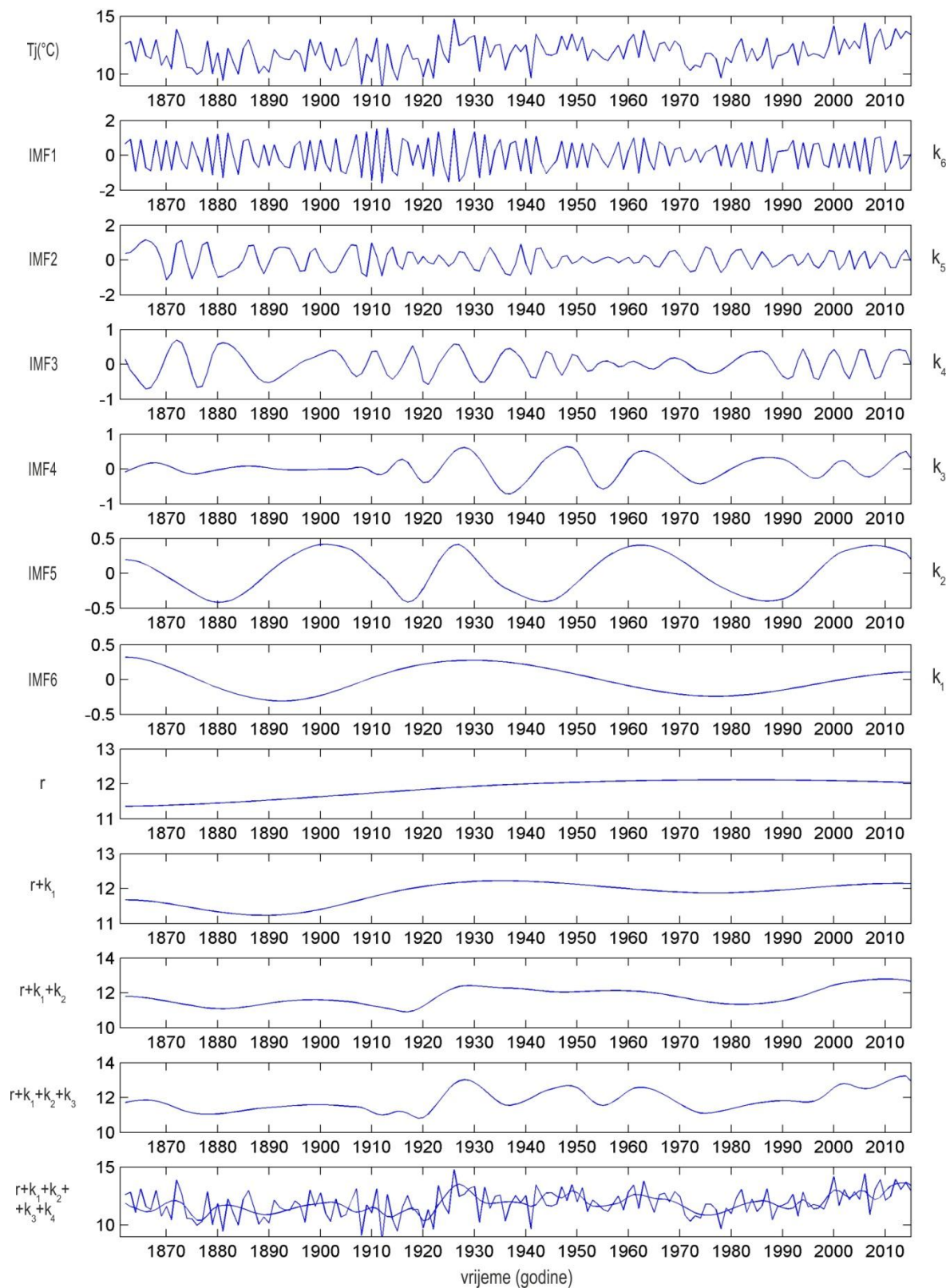
Slika D1. Vremenski niz zimskih srednjaka temperature, IMF dobivene primjenom EMD metode na taj niz, reziduum  $r$  te kumulativne sume reziduuma i odgovarajućih komponenti ( $r+k_1$ ,  $r+k_1+k_2$ ...)



Slika D2. Isto kao slika D1 samo za proljetne temperature.

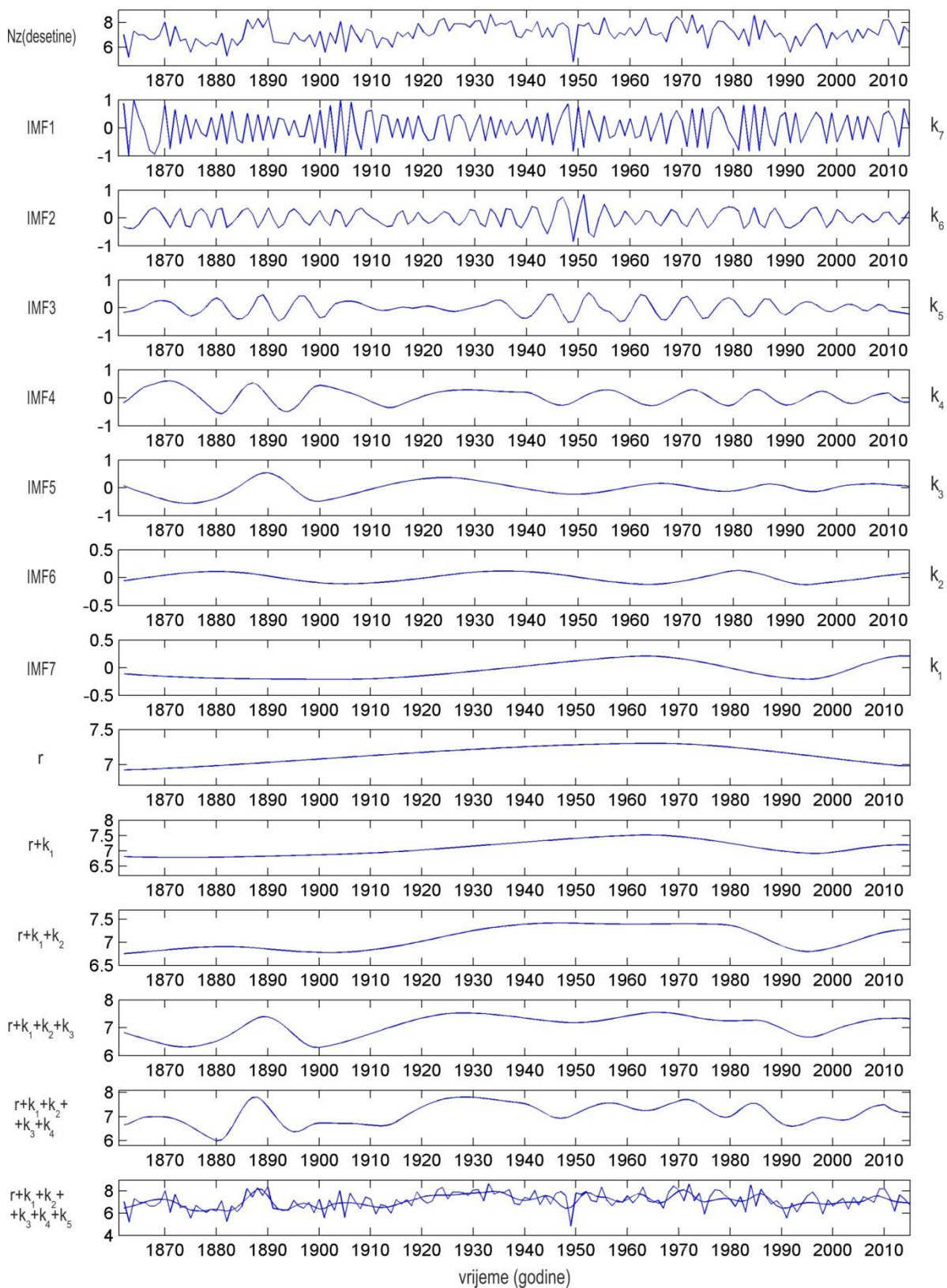


Slika D3. Isto kao slika D1 samo za ljetne temperature.

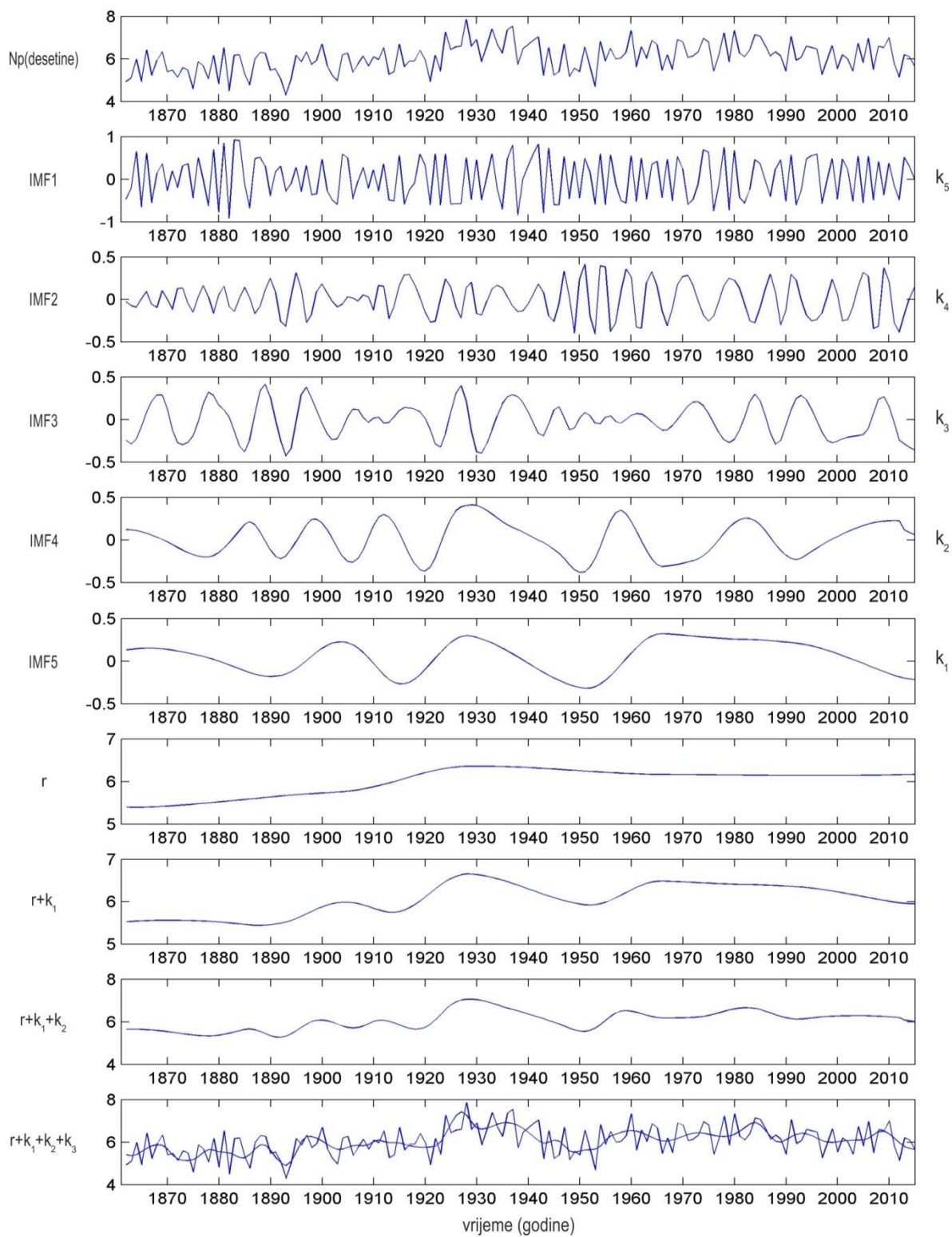


Slika D4. Isto kao slika D1 samo za jesenske temperature.

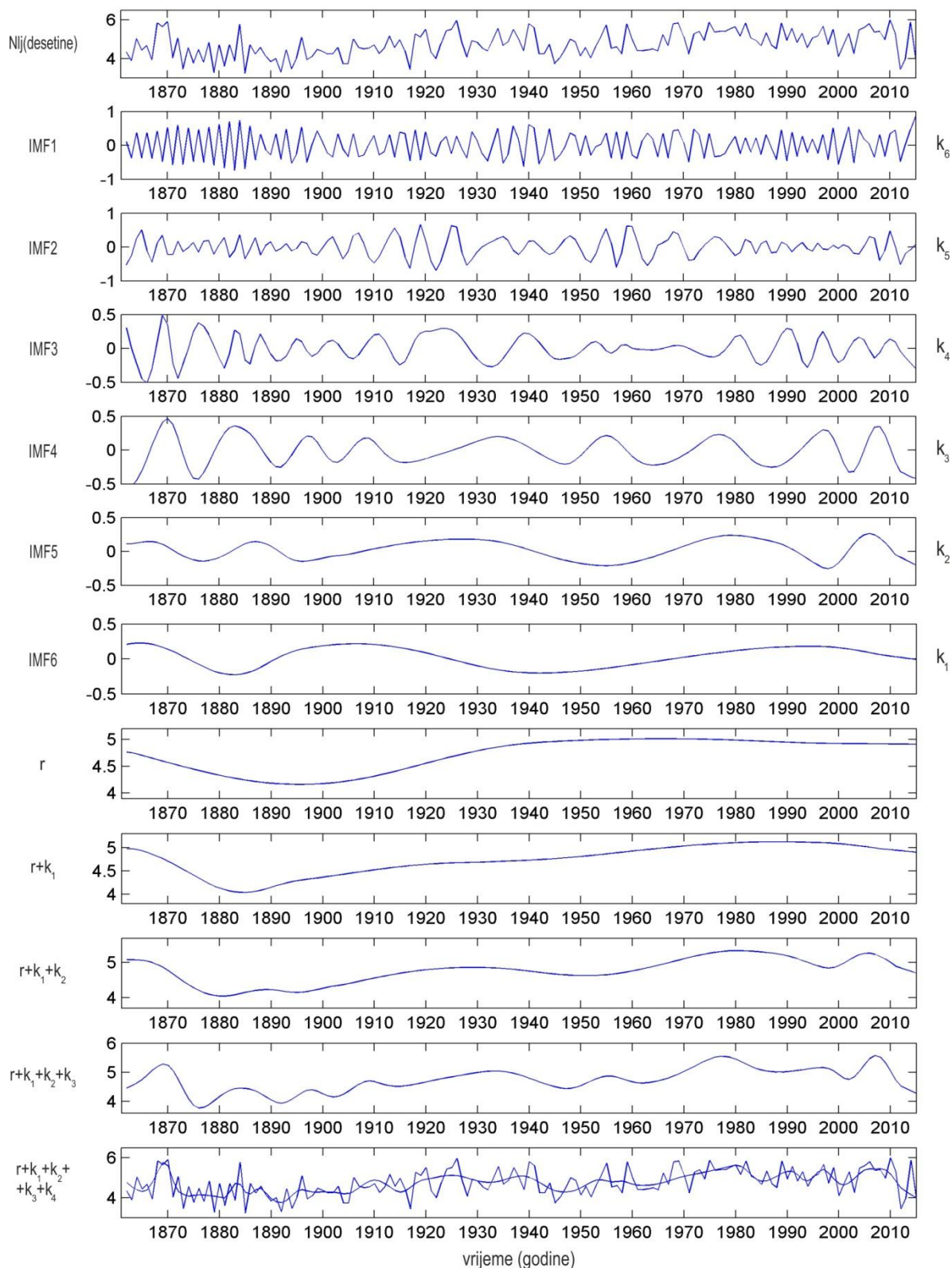




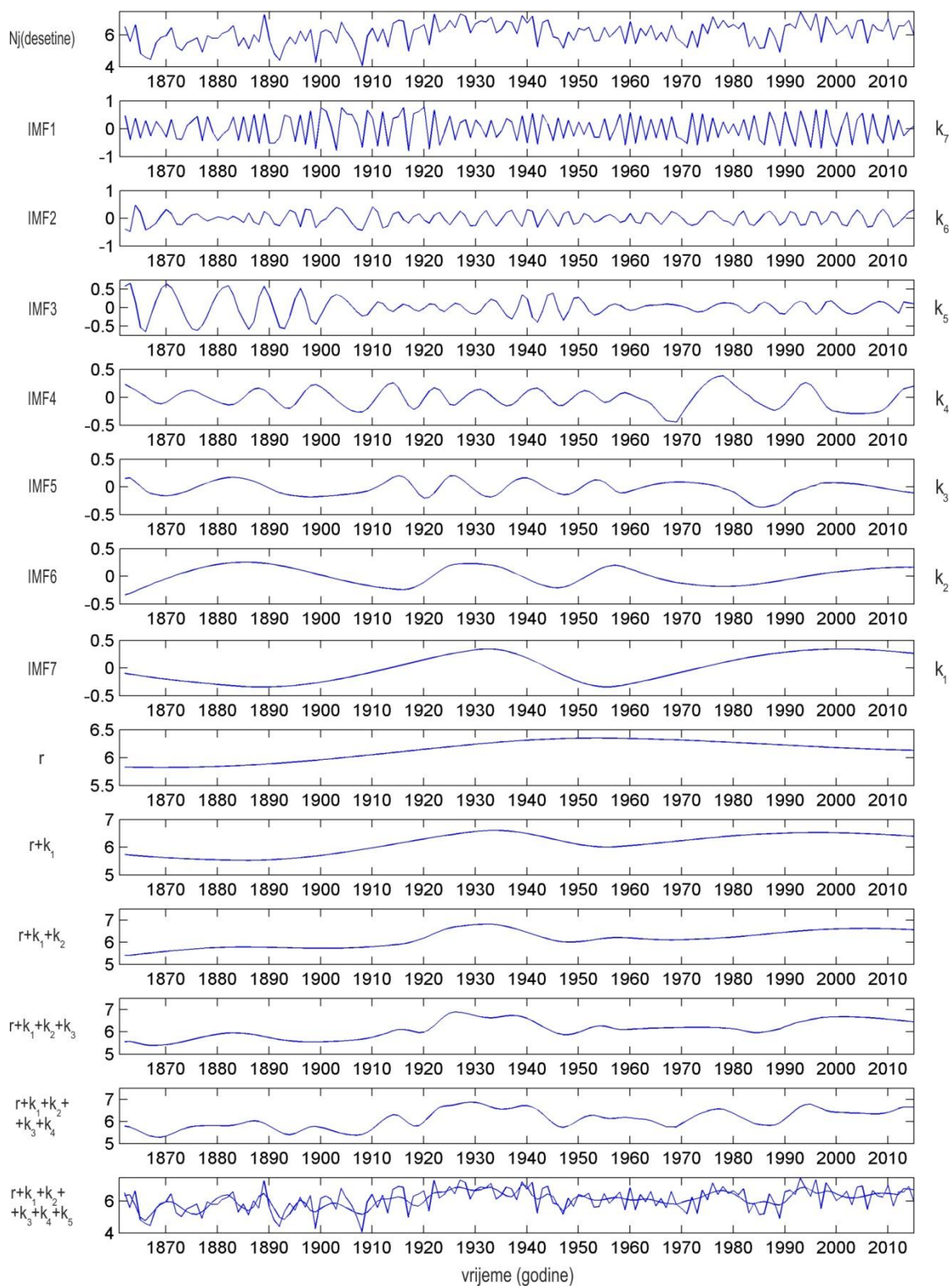
Slika D5. Isto kao slika D1 samo za zimsku naoblaku.



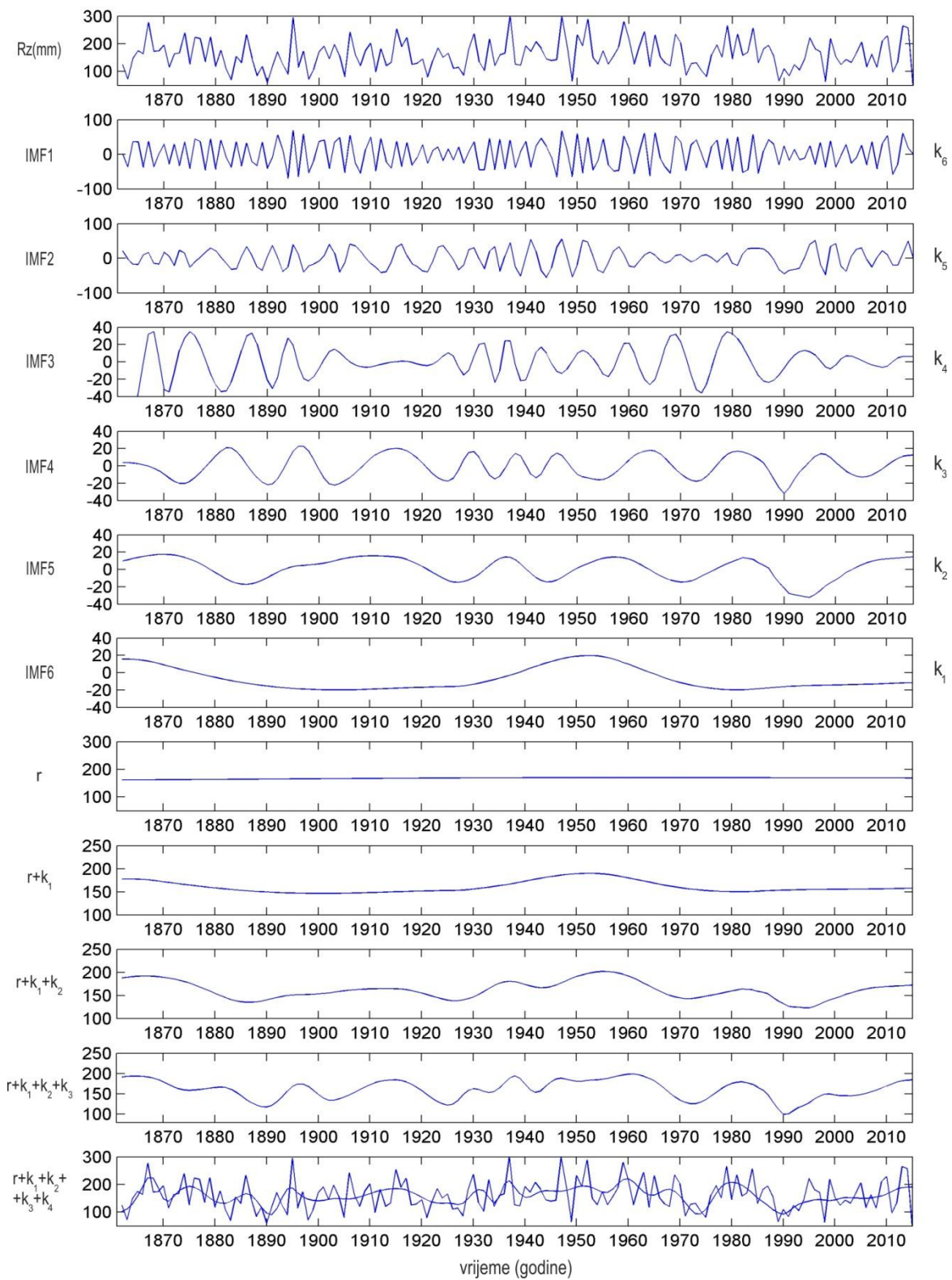
Slika D6. Isto kao slika D1 samo za proljetnu naoblaku.



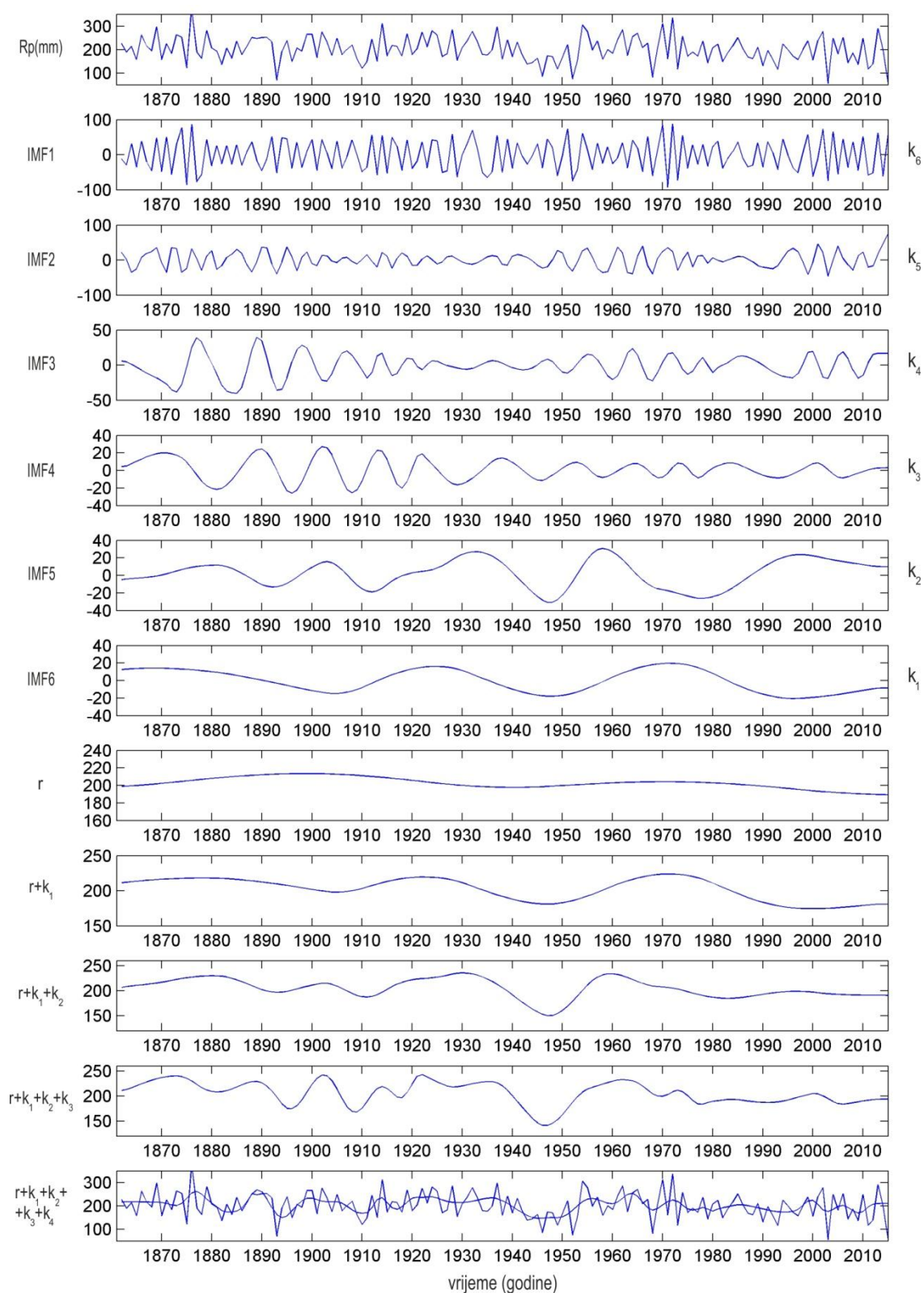
Slika D7. Isto kao slika D1 samo za ljetnu naoblaku.



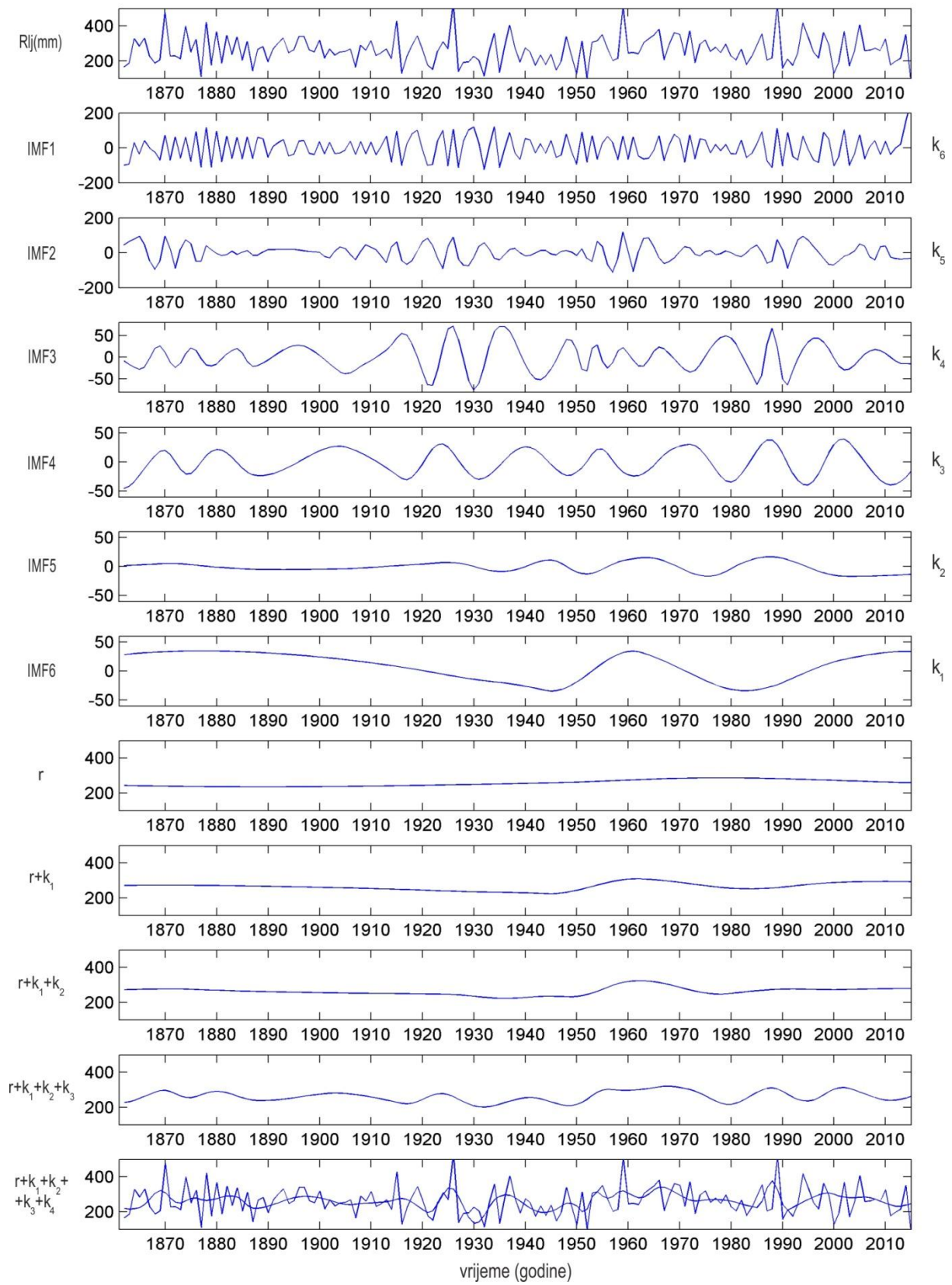
Slika D8. Isto kao slika D1 samo za jesensku naoblaku.



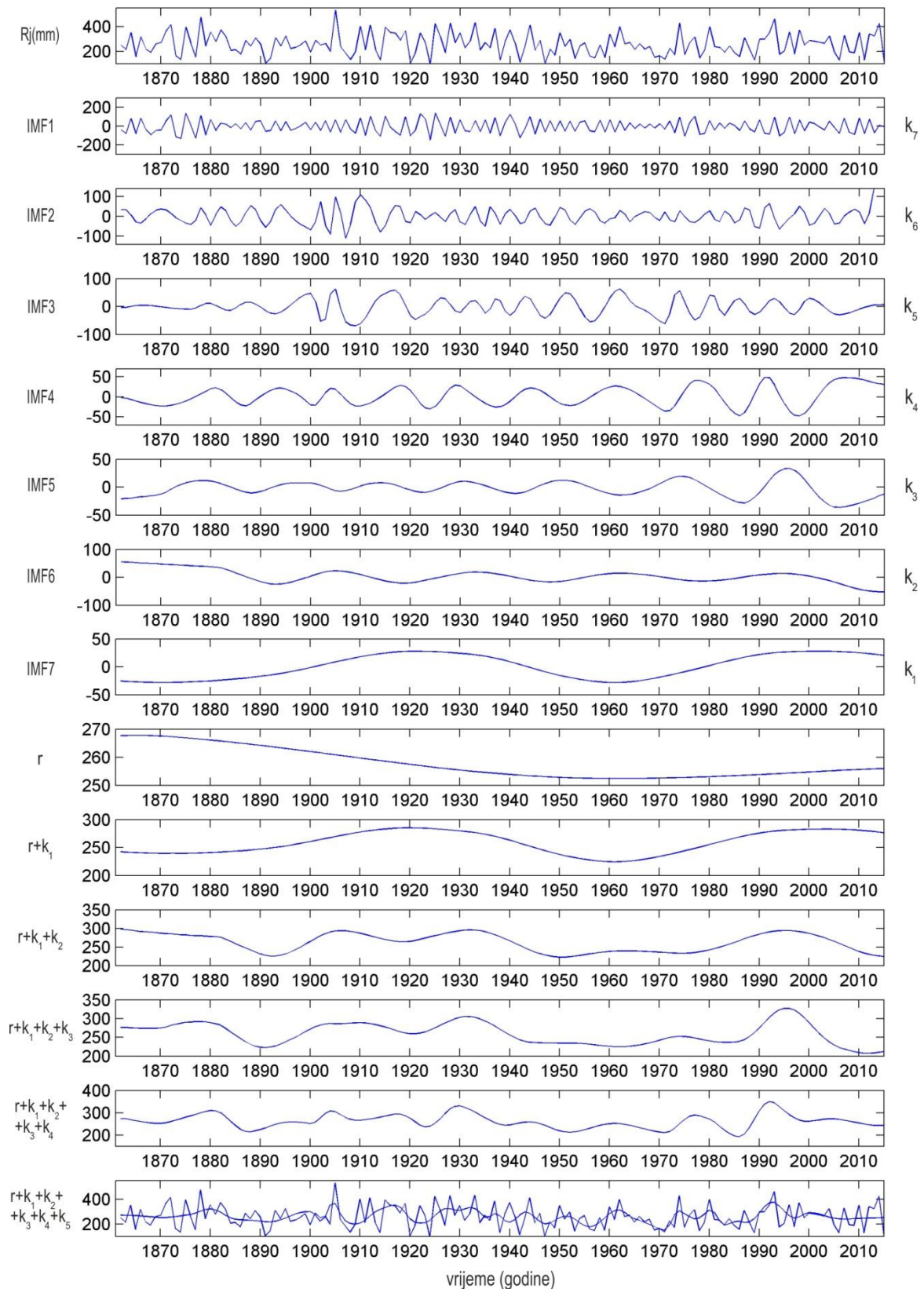
Slika D9. Isto kao slika D1 samo za zimsku oborinu.



Slika D10. Isto kao slika D1 samo za proljetnu oborinu.

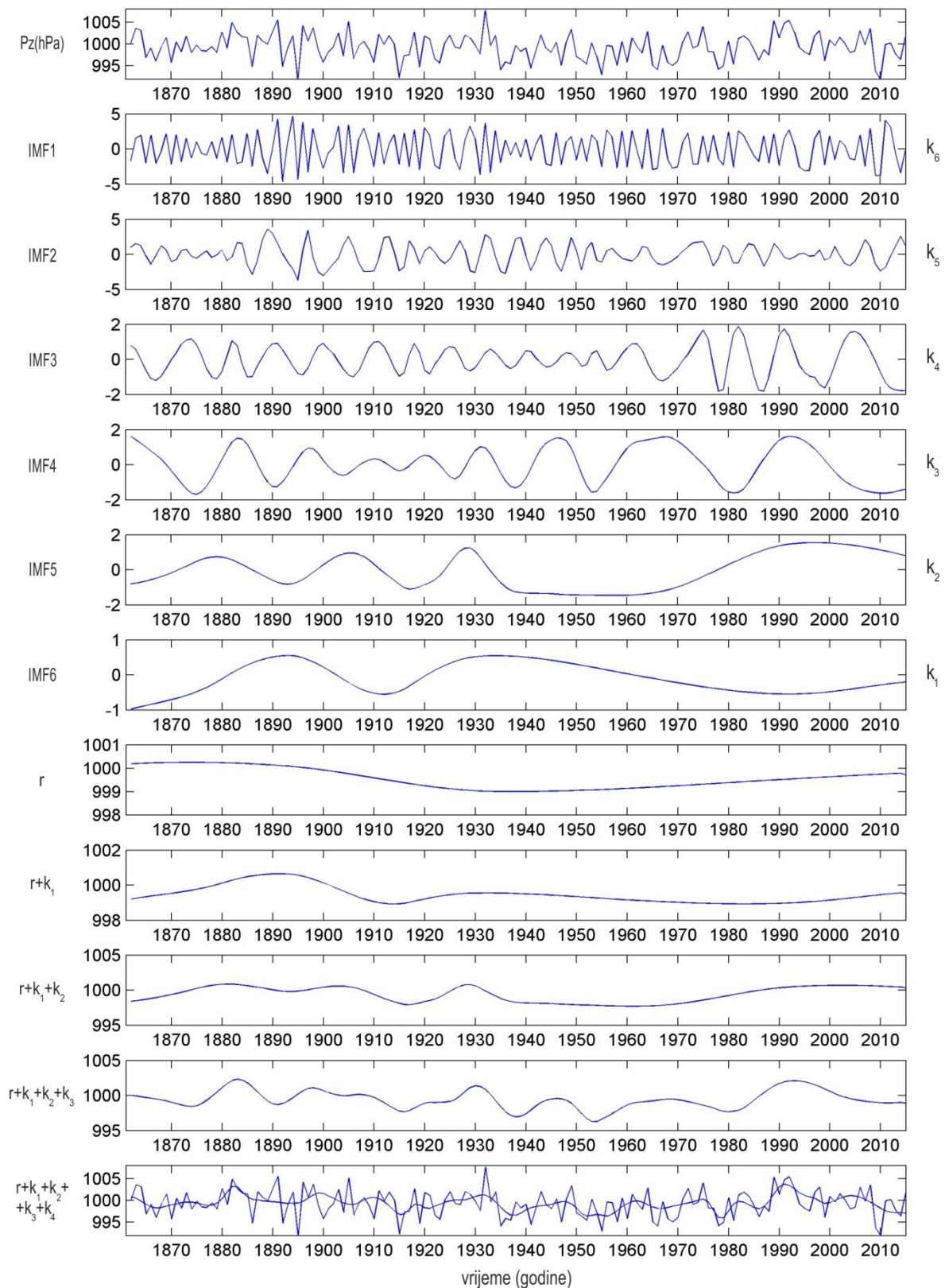


Slika D11. Isto kao slika D1 samo za ljetnu oborinu.

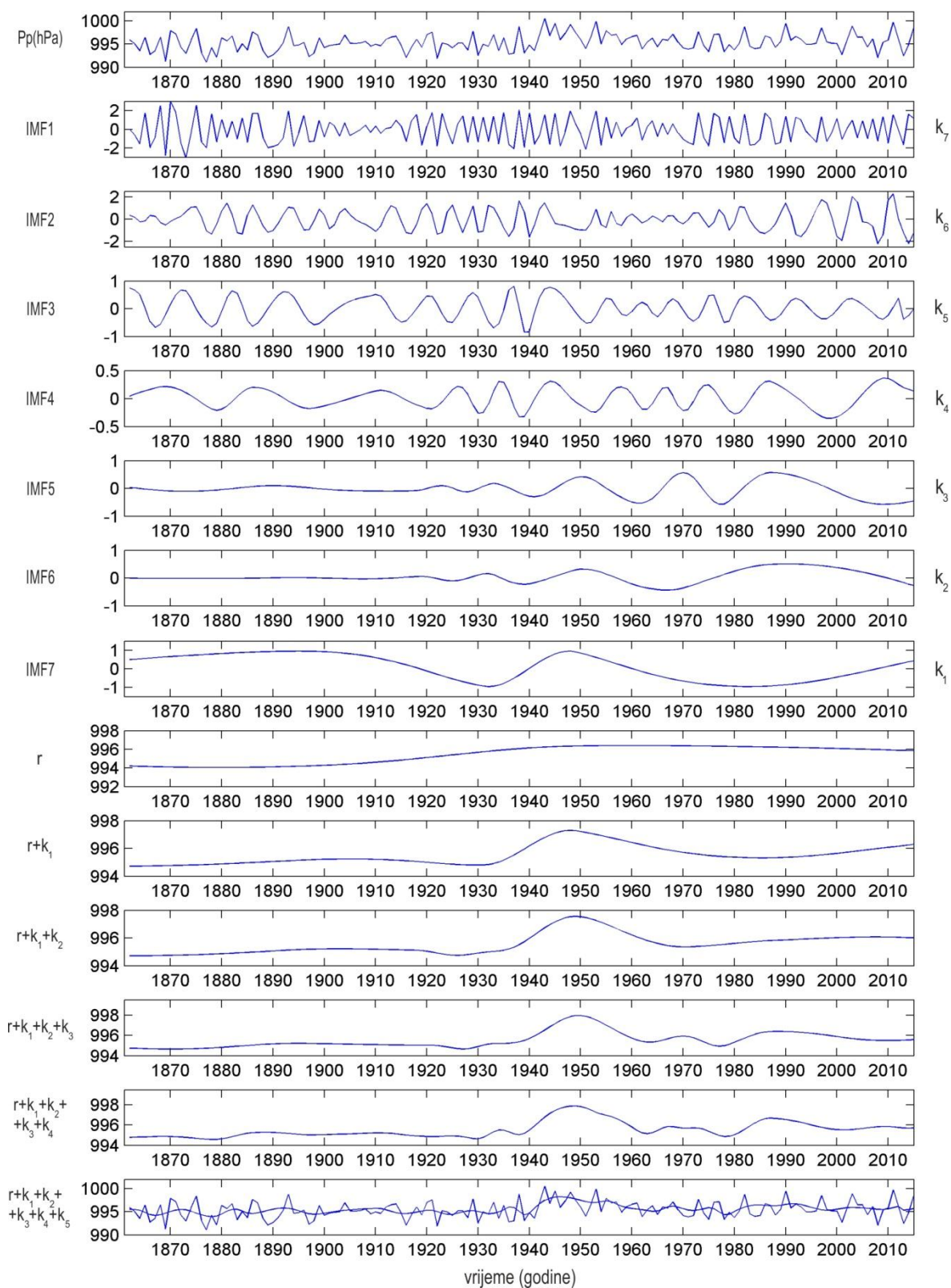


Slika D12. Isto kao slika D1 samo za jesensku oborinu.

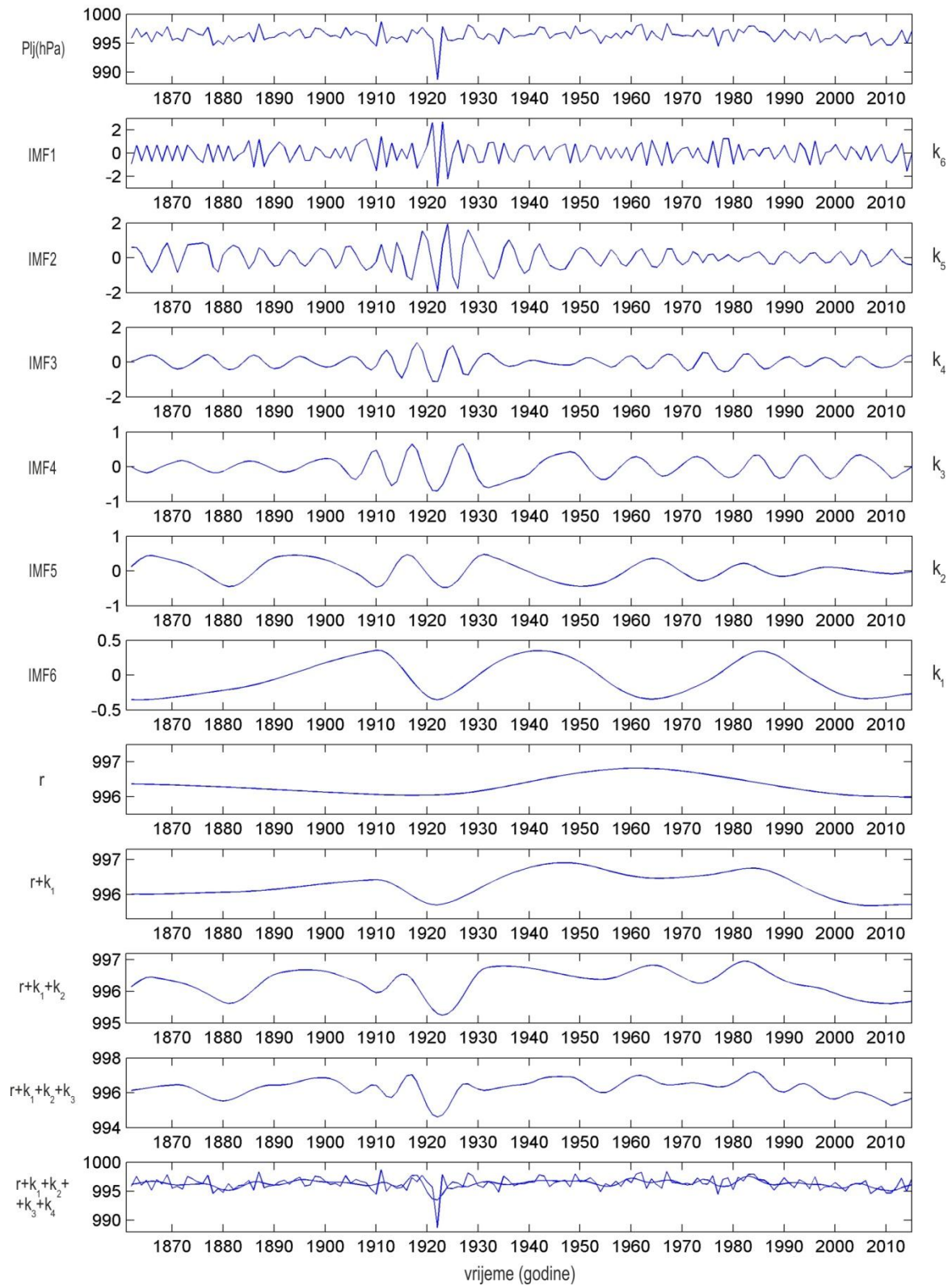




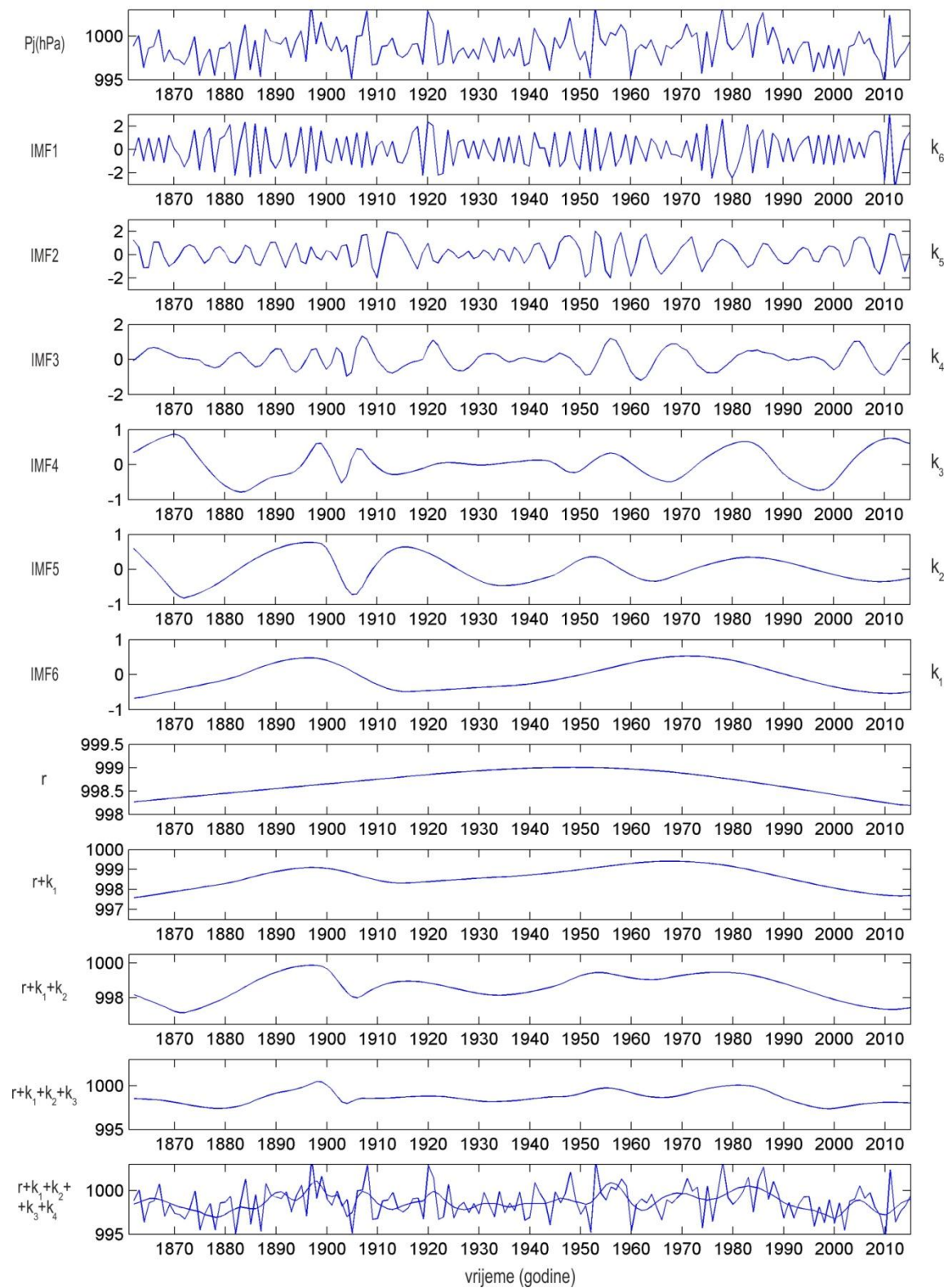
Slika D13. Isto kao slika D1 samo za zimski tlak zraka.



Slika D14. Isto kao slika D1 samo za proljetni tlak zraka.



Slika D15. Isto kao slika D1 samo za ljetni tlak zraka.



Slika D16. Isto kao slika D1 samo za jesenski tlak zraka.

