



UNIVERSITATEA “ALEXANDRU IOAN CUZA” DIN IAȘI

FACULTATEA DE GEOGRAFIE ȘI GEOLOGIE

ȘCOALA DOCTORALĂ DE GEOȘTIINȚE

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător de doctorat:

Prof.univ.dr. LIVIU APOSTOL

Prof. univ. dr. habil. ADRIAN GROZAVU

Student-doctorand:

AMIHĂESEI VLAD-

ALEXANDRU

2025



UNIVERSITATEA “ALEXANDRU IOAN CUZA” DIN IAȘI



FACULTATEA DE GEOGRAFIE ȘI GEOLOGIE
ȘCOALA DOCTORALĂ DE GEOȘTIINȚE

***Analiza evoluției stratului de zăpadă în
România și estimarea unor caracteristici ale
acestuia pe baza modelării conceptuale***

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Conducător de doctorat:

Prof.univ.dr. Liviu APOSTOL

Prof. univ. dr. habil. Adrian GROZAVU

Student-doctorand:

AMIHĂESEI

Vlad-Alexandru

IAȘI,
2025

Publicarea rezultatelor

O parte substanțială a rezultatelor prezentate în această parte a tezei a fost deja valorificată prin publicații științifice cu vizibilitate internațională. Astfel, rezultatele privind climatologia stratului de zăpadă din România, tendințele indicatorilor nivali, dependența altitudinală și corelațiile cu principalii factori climatici (temperatură, precipitații) au fost publicate în articolul: Amihăesei, V.-A., Micu, D.-M., Cheval, S., Dumitrescu, A., Sfîcă, L., & Bîrsan, M.-V. (2024). Changes in snow cover climatology and its elevation dependency over Romania (1961–2020). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51, 101637. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101637>

De asemenea, analiza detaliată a contribuției ciclonilor mediteraneeni la acumulările de zăpadă în România a fost dezvoltată într-un articol separat, intitulat "*Contribution of Mediterranean cyclones to snowfall accumulation in Romania*", care a fost deja trimis spre publicare la revista *Atmospheric Research*: Amihăesei, V.-A., Sfîcă, L., S-R., Rubin Micu, D.-M., Cheval, S. (în curs de evaluare). Contribution of Mediterranean cyclones to snowfall accumulation in Romania. *Atmospheric Research*.

În ceea ce privește utilizarea modelului de zăpadă SNOW-17, o parte din rezultatele obținute au fost publicate sub forma unui articol științific în care a fost testată performanța modelului conceptual de zăpadă SNOW-17. Articolul s-a publicat în cadrul conferinței internaționale „Air and Water – Components of the Environment”, desfășurată la Cluj-Napoca în anul 2020. Articolul este intitulat *An Approaching on Estimating of Snow Depth and Snow Water Equivalent* (Amihaesei V-A., Apostol L., Dumitrescu A. al., 2020)

Cuprinsul extins al tezei

<i>Introducere</i>	8
<i>Motivația</i>	15
<i>Ipoteze de lucru</i>	16
<i>Obiective</i>	17
<i>Originalitatea tezei</i>	19
I. Stratul de zăpadă. Caracteristici și evoluție	19
I.1 Importanța stratului de zăpadă	19
I.2 Scurt istoric al cercetării zăpezii în România	23
I.3 Date și metode	27
I.3.1 Date	27
I.3.2 Metode	33
I.4 Rezultate	44
I.4.1 Climatologia stratului de zăpadă (1961-2020)	44
I.4.2 Tendințe ale stratului de zăpadă	65
I.4.3 Tendințe privind numărul de zile cu și fără strat de zăpadă	76
I.4.4 Dependența de altitudine a tendințelor	78
I.4.5 Relația cu circulația atmosferică generală - teleconexiuni	86
I.4.6 Atribuirea schimbărilor privind stratul de zăpadă variațiilor climatice sezoniere	88
I.4.7 Rolul ciclonilor mediteraneeni la formarea stratului de zăpadă	93
I.4.8 Condiții sinoptice în timpul acumulărilor extreme de zăpadă	110
I.5 Discuții	114
I.5.1 Variabilitatea și tendința observată privind stratul de zăpadă	114
I.5.2 Dependența față de altitudine	116
I.5.3 Teleconexiuni și modificări în variabilitatea temperaturii și cantității de precipitații	117
I.5.4 Implicații hidrologice și perspective de cercetare	119
I.5.5 Contribuția ciclonilor mediteraneeni ca resursa de apă	120
I.5.6 Limitări și incertitudini	122
II. Utilizarea și calibrarea unui model de zăpadă pentru estimarea echivalentului de apă și grosimii stratului de zăpadă	124
II.1 Istoricul și clasificarea modelelor de zăpadă	124
II.1.1 Modele empirice	125
II.1.2 Modele conceptuale	125
II.1.3 Modele fizice (energetice)	129
II.1.4 Justificarea alegerii modelului SNOW-17	134
II.2 Date și metode	134
II.2.1 Date	134
II.2.2 Metode	135
II.3 Rezultate și discuții	152
II.3.1 Rezultate ilustrative pentru stații individuale in situ	152
II.3.2 Aplicabilitatea modelului	166
II.3.3 Interactivitatea modelului prin aplicația Shiny	170
II.4 Limitări și direcții de cercetări viitoare	172
<i>Codul sursă</i>	174
<i>Concluzii</i>	175
<i>Anexe</i>	179
<i>Bibliografie</i>	201

Cuvinte cheie: strat de zăpadă, grosime, durată, circulație atmosferică, cicloni mediteraneeni, România, tendințe climatice, modelare, SNOW-17, asimilare de date.

Introducere

Zăpada joacă un rol esențial în sistemul climatic global cu impact semnificativ asupra hidrologiei, ecosistemelor și climatului. În contextul schimbărilor climatice, studiul stratului de zăpadă a devenit crucial, fiind observate scăderi semnificative ale duratei și grosimii acestuia, în special la altitudini joase și medii, unde impactul încălzirii este cel mai pronunțat.

Stratul de zăpadă din regiunile temperate este deosebit de vulnerabil, având tendințe clare de regres, confirmate de numeroase studii internaționale. Aceste modificări sunt influențate de factori topografici, altitudine, vegetație, dar și de variabilitatea regională a circulației atmosferice. Deși în unele regiuni nordice s-au înregistrat ușoare creșteri ale grosimii stratului de zăpadă, acestea sunt atribuite mai ales creșterii cantității de precipitații și schimbărilor în circulația atmosferică.

Un factor esențial în acumularea stratului de zăpadă în România îl reprezintă ciclonii mediteraneeni (CM), care aduc mase de aer cald și umed ce interacționează cu aerul rece, generând episoade de ninsoare abundentă. Deși rolul lor este recunoscut în generarea precipitațiilor, contribuția CM la bilanțul nival este puțin cuantificată din perspectivă climatologică.

Modelarea stratului de zăpadă este esențială pentru evaluarea impactului schimbărilor climatice, pentru estimarea resurselor de apă și prognozarea riscurilor hidrologice sau montane. Există o gamă largă de modele de zăpadă, de la cele empirice (ex. degree-day) până la cele fizice, cu grade variabile de complexitate. Performanța acestora depinde puternic de parametrizare, arealul studiat și calitatea datelor de intrare.

Asimilarea datelor (data assimilation) în modelele de zăpadă, prin integrarea observațiilor pot îmbunătăți estimările modelelor. Metode moderne precum ensemble Kalman Filter (EnKF) sau Particle Batch Smoother (PBS) au demonstrat îmbunătățiri semnificative ale preciziei modelelor, în special în ceea ce privește estimarea echivalentului de apă din zăpadă. Cu toate acestea, calitatea datelor observate rămâne un factor critic în eficiența asimilării.

Ipoteze de lucru

Ipotezele de lucru ale tezei sunt grupate în două direcții principale: climatologică și de modelare. Pe de o parte, se presupune că stratul de zăpadă din România a suferit transformări notabile în ultimele decenii, caracterizate prin instalare întârziată, topire timpurie și o reducere generală a duratei și grosimii, mai ales în zonele joase și medii. De asemenea, se consideră că o proporție importantă a ninsorilor, în special cele abundente, este asociată cu activitatea ciclonilor mediteraneeni. Pe de altă parte, din perspectiva modelării, teza pornește de la ideea că modelele conceptuale pot simula în mod realist dinamica stratului de zăpadă în România, în diverse condiții climatice. Se mai presupune că metodele de asimilare a datelor, precum PBS, contribuie la reducerea erorilor, aliniind simulările la observațiile din teren. În plus, implementarea modelului într-o aplicație interactivă web (Shiny) este considerată o soluție eficientă pentru calibrarea și testarea parametrilor modelului de zăpadă.

Obiective

Pentru **Capitolul I**, obiectivele se concentrează pe analiza climatologică a stratului de zăpadă în perioada 1961–2020. Sunt vizate: caracterizarea detaliată a indicatorilor de zăpadă calculați (durată, grosime medie și maximă, data apariției/dispariției, număr de zile cu sau fără zăpadă), identificarea tendințelor spațiale și temporale și evaluarea semnificației acestora. De asemenea, este analizată influența altitudinii asupra modificărilor înregistrate, în vederea delimitării zonelor vulnerabile la aceste schimbări climatice. Un accent deosebit este pus pe înțelegerea rolului circulației atmosferice – în special al ciclonilor mediteraneeni – în configurarea regimului nival, atât prin studii sinoptice, cât și prin cuantificarea contribuției acestora la acumulările de zăpadă și la cele extreme. Capitolul urmărește, astfel, să ofere o bază științifică solidă pentru evaluarea impactului schimbărilor climatice asupra regimului nival în Europa de Sud-Est.

Pentru **Capitolul II**, obiectivul general este construirea unui cadru de estimare zilnică a stratului de zăpadă prin utilizarea modelului conceptual SNOW-17. Acesta include: aplicarea modelului pentru simularea grosimii și a echivalentului în apă al stratului de zăpadă, generarea de ansambluri de simulări pentru reprezentarea incertitudinii, integrarea observațiilor prin metoda de asimilare Particle Batch Smoother (PBS) și obținerea de estimări *a posteriori* chiar și în lipsa datelor de observații. Performanțele modelului sunt

evaluate comparativ (cu/ fără asimilarea dedate) și explorează avantajele și limitele metodei în contextul climatic și geografic al României.

Originalitatea tezei

În primul rând, teza oferă o analiză climatologică extinsă și bine documentată a stratului de zăpadă în România, pe baza unei selecții de stații meteorologice și a utilizării a opt indicatori nivali relevanți. A fost evidențiată influența altitudinii, tendințele semnificative ale duratei și grosimii stratului de zăpadă și rolul parametrilor climatici (temperatură și precipitații). De asemenea, teza aduce în atenție contribuția ciclonilor mediteraneeni asupra stratului de zăpadă, oferind pentru prima dată o informație cantitativă a regimului nival atribuit acestor cicloni.

În al doilea rând, teza aduce o contribuție originală prin implementarea modelului conceptual SNOW-17 pentru prima dată în România, în scopul simulării grosimii stratului de zăpadă și a echivalentului său în apă. Modelul a fost evaluat pentru un set de stații reprezentative, iar rezultatele au fost semnificativ îmbunătățite prin utilizarea metodei de asimilare a datelor observate Particle Batch Smoother (PBS). Astfel, modelul a oferit estimări realiste și continue, inclusiv pentru variabile care nu sunt măsurate în mod direct (ex. cantitatea zilnică de ninsoare sau evoluția continuă/zilnică a echivalentului în apă al stratului de zăpadă).

Un element de originalitate important constă în completarea seriilor de date lipsă prin simulare și asimilare, oferind astfel un instrument aplicabil în reconstituiri climatice și în analize retrospective de lungă durată. De asemenea, dezvoltarea unei aplicații interactive în R/Shiny, adaptată utilizării staționare a modelului, aduce un plus de accesibilitate și transparență în explorarea rezultatelor prin calibrarea în timp real al utilizatorilor.

I. Stratul de zăpadă. Caracteristici și evoluție

I.1 Date și metode

Analiza climatologică s-a bazat pe date provenite de la 114 stații meteorologice din România (1961–2020), completate cu produse de reanaliză ERA5/ERA5-Land și traiectorii ale ciclonilor mediteraneeni furnizate de proiectul COST MedCyclones. Au fost calculați opt indicatori nivali relevanți. Tendințele au fost identificate folosind testele Mann-Kendall și Theil-Sen, iar distribuția spațială a fost modelată prin Regression Kriging.

I.2 Rezultate

I.2.1 Climatologia stratului de zăpadă (1961-2020)

Această secțiune oferă o caracterizare climatologică detaliată a stratului de zăpadă în România, pe baza a opt indicatori nivali calculați pentru perioada 1961–2020. Indicatorii utilizați sunt: prima zi cu strat de zăpadă (FSC), ultima zi cu strat de zăpadă (LSC), durata medie anuală a stratului (SCD), durata maximă consecutivă (SCDmax), grosimea medie (SZAmед), grosimea maximă (SZAmax), numărul de zile cu strat de zăpadă (SCd) și numărul de zile fără strat (SFd). Toți acești indicatori au fost analizați atât în relație cu tipurile climatice Köppen (BSk, Cfa, Cfb, Dfb, Dfc, ET), cât și prin interpolare spațială și agregare pe decenii.

Prima zi cu strat de zăpadă (FSC) prezintă o dependență evidentă față de altitudine și regiune climatică. În zonele montane înalte (climat ET), stratul de zăpadă se instalează în general în lunile octombrie sau chiar septembrie, în timp ce în regiunile de câmpie și dealuri joase (BSk, Cfa), apariția zăpezii este semnificativ mai târzie, în medie în luna decembrie. Pe termen decenal, se constată o întârziere progresivă a FSC în aproape toate regiunile extracarpate, indicând o amânare a instalării sezonului nival.

Ultima zi cu strat de zăpadă (LSC) urmează același control altitudinal: în zonele montane înalte, zăpada persistă până în mai sau chiar iunie, în timp ce în zonele joase dispare frecvent înainte de sfârșitul lunii februarie. Evoluția decenală indică o topire tot mai timpurie a stratului în majoritatea regiunilor, în special în zonele de câmpie, ceea ce sugerează o comprimare a sezonului nival.

Durata medie anuală (SCD) și durata maximă consecutivă (SCDmax) reflectă direct aceste modificări. În regiunile ET și Dfc, SCD depășește 200 de zile pe an, în timp ce în zonele BSk și Cfa rareori se ating 30–50 de zile. SCDmax urmează un pattern similar:

peste 150 de zile în Carpați și sub 20–30 în zonele joase. Pe termen lung, durata tinde să scadă în aproape toate regiunile, cu o diminuare vizibilă a persistenței zăpezii continue.

Grosimea medie (SZAmed) și grosimea maximă (SZAmax) evidențiază contrastul altitudinal și climatic. În ET, SZAmed depășește adesea 50–70 cm, iar SZAmax poate atinge local valori extreme de peste 200–250 cm. În zonele joase și sud-estice, valorile sunt foarte scăzute (sub 10–15 cm pentru SZAmed). Evoluția decenală arată o scădere semnificativă a grosimii în zonele joase și colinare, în timp ce în regiunile înalte (ET) valorile rămân stabile sau chiar în ușoară creștere.

Numărul de zile cu strat de zăpadă (SCd) este maxim în Carpați (>180 zile/an), mediu în regiunile subcarpatice (80–140 zile/an) și scăzut în Câmpia Română, Dobrogea sau Bărăgan (sub 50, chiar 30 zile/an). Evoluția indică o reducere clară a SCd în zonele extracarpatice.

Numărul de zile fără strat de zăpadă (SFd) este complementul lui SCd și arată o creștere constantă, mai ales în regiunile joase, sugerând o diminuare a frecvenței și duratei zăpezii la sol în lunile reci.

I.2.2 Analiza tendințelor (1961-2020)

Analiza tendințelor în perioada 1961–2020 arată semnale clare de scurtare a sezonului nival și de reducere a grosimii stratului de zăpadă, în special în zonele joase și de altitudine medie (500 – 1000 m). Data primei zile cu zăpadă (FSC) se întârzie în medie cu +1 până la +2%/deceniu, iar data ultimei zile cu zăpadă (LSC) se retrage cu –1 până la –2%/deceniu. În consecință, durata totală a sezonului (SCD) și a duratei maxime continue (SCDmax) scad semnificativ, în special la altitudini < 1000 m. Această scădere se datorează mai degrabă unei topiri mai devreme decât o apariție mai întârziată a stratului de zăpadă. Aceste modificări sunt corelate în principal cu încălzirea aerului, în special în lunile de primăvară.

Grosimea medie (SZAmed) și maximă (SZAmax) a stratului de zăpadă scade în general în regiunile sub 1000 m, dar în ET (Carpații > 2000 m) se observă tendințe pozitive (până la +10%/deceniu), ceea ce poate indica un aport crescut de precipitații solide în contextul încălzirii globale. Tendințele SCd și SFd sunt convergente: zilele cu strat de zăpadă scad, iar cele fără cresc, în special în climatele Dfb, Cfa și BSk.

I.2.3 Dependența de altitudine a tendințelor

Analiza spațială arată că altitudinea joacă un rol determinant în menținerea stratului de zăpadă – în zonele montane, stratul persistă mai mult timp și înregistrează grosimi mai mari, dar chiar și aici se observă o ușoară scurtare a sezonului nival. Pe benzi altitudinale, cele mai mari scăderi ale duratei și grosimii stratului de zăpadă se observă sub 1000 m. Corelația dintre altitudine și tendințele în SCD, SCd și SZAmed este semnificativ pozitivă. Zonele de peste 2000 m sunt mai rezistente la schimbare, iar în unele cazuri semnalează chiar ușoare creșteri ale grosimii și duratei.

I.2.4 Relația cu circulația atmosferică generală și rolul ciclonilor mediteraneeni

Oscilația Nord-Atlantică (NAO) influențează în mod semnificativ regimul zăpezii din România, în special în vestul și nord-estul țării. Faza pozitivă a NAO este asociată cu ierni mai calde, durate mai scurte ale stratului de zăpadă și mai puține zile cu zăpadă. Un rezultat esențial este identificarea influenței ciclonilor mediteraneeni asupra stratului de zăpadă. În premieră pentru România, este realizată o cuantificare detaliată a contribuției ciclonilor mediteraneeni la acumulările de zăpadă. A rezultat că peste 55–60% din zăpada căzută în sezonul rece este asociată direct cu activitatea ciclonilor mediteraneeni, cu rol semnificativ mai ales în regiunile extracarpătice. Pentru lunile din primăvară contribuția lor poate atinge peste 90% din totalul ninsorilor. În regiunile nordice, influența este mai redusă, dar nu nesemnificativă (sub 40%), fiind mediată de circulația atlantică. De-a lungul celor patru decenii analizate, s-au remarcat tendințe semnificative în influența ciclonilor mediteraneeni asupra ninsorilor. În luna februarie, se observă o scădere cu 4–6%/deceniu a contribuției a ciclonilor mediteraneeni la acumulările de zăpadă. În schimb, lunile noiembrie și ianuarie arată tendințe de creștere, în special în regiunile nordice și centrale.

II. Utilizarea și calibrarea unui model de zăpadă pentru estimarea echivalentului de apă și grosimii stratului de zăpadă

Modelarea stratului de zăpadă este o componentă esențială în studiile climatologice și hidrologice, datorită influenței directe a zăpezii asupra balanței energetice, a resurselor de apă și a riscurilor hidrologice. Modelele de zăpadă sunt împărțite în trei categorii principale: empirice, conceptuale și fizice.

Modelele empirice se bazează pe relații statistice între variabile climatice (precipitații, temperatură) și variabilele nivale, având avantajul unei aplicabilități rapide, dar limitări semnificative privind transferabilitatea în alte regiuni sau în alte condiții climatice.

Modelele conceptuale, precum SNOW-17, oferă un echilibru între complexitate și cerințe de date, fiind capabile să descrie procesele majore (acumulare, topire, recongelare) într-o manieră simplificată dar fizic coerentă. Acestea sunt potrivite în regiuni cu date meteorologice limitate și pot fi integrate în scheme de modelare mai largi (ex: modele hidrologice).

Modelele fizice sunt cele mai detaliate și simulează procesele din stratul de zăpadă pe baza bilanțului complet de energie și masă. Deși foarte precise, ele necesită date de intrare extinse (radiație solară, vânt, albedo, etc.) și resurse computaționale ridicate, ceea ce limitează utilizarea lor în aplicații operaționale sau pe arii extinse.

II.1 Date și metode

II.1.1 Date

Am utilizat date zilnice privind temperatura medie a aerului și cantitatea de precipitații, provenite de la un număr de 145 de stații meteorologice din rețeaua națională. În plus, au fost folosite și date privind echivalentul în apă al stratului de zăpadă și densitatea zăpezii, în scopul asimilării observațiilor și al corectării modelului de estimare a stratului de zăpadă. De menționat că datele observate ale echivalentului de apă și ale densității zăpezii sunt pentadice și sunt disponibile începând cu anul 2001. Astfel, analiza comparativă dintre valorile modelate și observate a fost realizată pentru o perioadă de 20 de ani, între 2001 și 2021, utilizând ca unitate de referință anul hidrologic, care începe la 1 septembrie și se încheie la 31 august anul următor.

II.1.2 Metode

Modelul conceptual SNOW-17 a fost utilizat pentru a simula zilnic evoluția stratului de zăpadă, cu accent pe estimarea grosimii și a echivalentului în apă. Modelul a fost ales datorită eficienței sale computaționale, a cerințelor reduse de date de intrare (temperatură și precipitații zilnice) și a validării sale în multiple contexte climatice internaționale. Modelul SNOW-17 a fost rescris și implementat complet în limbajul de programare R, adaptând structura sa la specificul datelor meteorologice din România.

Această versiune în R a permis integrarea modelului în fluxuri de analiză, testarea pe multiple stații și rularea în ansamblu (ensemble) pentru a surprinde incertitudinea parametrilor. Această abordare a făcut posibilă completarea datelor lipsă, generarea de estimări continue și dezvoltarea unei aplicații interactive pentru vizualizare și simulare.

Pentru a evalua incertitudinea asociată simulării stratului de zăpadă, modelul SNOW-17 a fost rulat sub forma unui ansamblu de simulări (ensemble). Fiecare simulare a folosit o combinație diferită de parametri, selectați prin perturbări controlate în limite plauzibile, pentru a reflecta incertitudinile legate de acumulare, topire și transformare a zăpezii. În total, au fost generate 256 de simulări (particule), fiecare reprezentând o posibilă evoluție a stratului de zăpadă, menținând aceleași condiții meteorologice de intrare.

Pentru a îmbunătăți estimările modelului, a fost aplicată metoda Particle Batch Smoother (PBS) — o tehnică de asimilare de date bazată pe inferență bayesiană. În această abordare, observațiile (grosimea stratului de zăpadă și echivalentul în apă) sunt utilizate pentru a ajusta *posterior* estimările modelului, luând în considerare și incertitudinile din observații.

II.2 Rezultate

II.2.1 Evaluarea performanței modelului de zăpadă

Această secțiune prezintă rezultatele obținute în urma simulărilor efectuate cu modelul SNOW-17, atât în regim open-loop (fără asimilare de date), cât și în regim Post-DA (asimilat, prin metoda Particle Batch Smoother – PBS). Analiza se concentrează pe două variabile esențiale ale stratului de zăpadă: grosimea (cm) și echivalentul în apă (mm). Evaluările sunt realizate la nivelul unor stații montane și de câmpie, dar și la scară națională, prin agregarea rezultatelor.

Analiza a comparat performanța simulărilor înainte (Prior-DA) și după asimilarea datelor observate (Post-DA) prin metoda Particle Batch Smoother (PBS), urmărind în principal estimările grosimii stratului de zăpadă și ale echivalentului său în apă.

Rezultatele au evidențiat o îmbunătățire consistentă și substanțială a performanței modelului după asimilare, atât din punct de vedere vizual, cât și statistic. În toate cele șase stații montane analizate (Vf. Omu, Ceahlău Toaca, Iezer, Bâlea Lac, Stâna de Vale, Parâng), modelul în regim fără asimilare a prezentat o tendință clară de supraestimare a grosimii stratului de zăpadă, uneori cu diferențe de 70–90 cm față de observații. După asimilare, aceste erori au fost corectate semnificativ, RMSE reducându-se de aproape cinci ori în unele cazuri, iar coeficientul Kling-Gupta (KGE) crescând de la valori negative sau modeste la valori excelente, de peste 0.90.

Aceleași concluzii au fost confirmate și pentru stațiile din zone joase, precum Iași, Cluj-Napoca, Brașov sau Craiova. Chiar și în aceste regiuni, unde zăpada este mai puțin frecventă, asimilarea a condus la o aliniere mult mai bună între estimări și observații. De exemplu, în stația Iași, RMSE a scăzut de la 4.3 cm la 1.5 cm, iar KGE a crescut la 0.89, indicând o potrivire mult mai realistă.

Evaluările multianuale au confirmat același tipar: modelul fără asimilare a avut o tendință sistematică de supraestimare, cu diferențe medii de peste 30% în grosimea stratului la mai mult de jumătate dintre stații. După asimilare, erorile au fost substanțial reduse, iar în peste 65% din cazuri, diferențele s-au încadrat într-un interval realist, de $\pm 10\%$. Distribuțiile erorilor s-au îngustat și recentrat în jurul valorii zero, indicând o corecție eficientă atât a biasului, cât și a variabilității.

În ceea ce privește echivalentul în apă al stratului de zăpadă, modelul Prior-DA a arătat aceleași probleme de supraestimare, mai ales în perioada de acumulare maximă și în zonele montane. Spre exemplu, la Iezer, modelul estima peste 300 mm SWE, în timp ce observațiile indicau doar 150 mm. Asimilarea a corectat această abatere, aducând estimarea la o valoare realistă, cu o reducere a erorii (RMSE) și o creștere puternică a KGE (de la –2.53 la 0.87). Un aspect important corectat de asimilare a fost momentul topirii stratului de zăpadă: în simulările fără asimilare, modelul întârzia acest moment cu 3–4 săptămâni, în timp ce după asimilare, sincronizarea cu observațiile a fost aproape perfectă.

Pe ansamblu, evaluările confirmă că asimilarea datelor conduce la o îmbunătățire semnificativă a performanței modelului SNOW-17. Pentru grosimea stratului, coeficientul de corelație a crescut de la $R = 0.85$ la $R = 0.93$, iar pentru SWE de la $R = 0.83$ la $R = 0.96$.

RMSE s-a redus aproape la jumătate pentru ambele variabile, iar KGE și NSE au atins valori de peste 0.90, indicând o potrivire foarte ridicată între simulări și observații.

II.2.2 Aplicabilitatea modelului

Modelul RO-SNOW-17 dezvoltat în cadrul tezei în limbaj de programare R și care se poate descărca din platforma Github oferă o gamă largă de variabile simulate care extind considerabil aplicabilitatea acestuia în studiile de climă, hidrologie și gestionarea resurselor de apă. Printre principalele ieșiri se numără grosimea stratului de zăpadă (SZA), echivalentul în apă al zăpezii (ECHIVZAP), cantitatea de precipitații solide (ninsoare) și cantitatea de precipitații lichide (ploaie).

O altă utilitate importantă a modelului RO-SNOW-17, dezvoltat și implementat în acest studiu, constă în faptul că acesta permite generarea unei serii temporale zilnice pentru echivalentul în apă al stratului de zăpadă, înlocuind astfel seria discontinuu observată, disponibilă doar la un interval de cinci zile (pentadic). Cum în România, observațiile oficiale din cadrul ANM echivalentul în apă nu se efectuează zilnic, ci doar o dată la cinci zile, prin simulările oferite de modelul RO-SNOW-17, ajustat prin asimilarea observațiilor de grosime a stratului de zăpadă, se obțin estimări ale echivalentului în apă al stratului de zăpadă la rezoluție zilnică, care reflectă nu doar acumularea, ci și dinamica topirii zăpezii. Astfel, modelul acoperă golurile dintre observațiile măsurate, permițând reconstrucția completă a evoluției zăpezii pe întreaga perioadă analizată.

II.2.3 Interactivitatea modelului prin aplicația Shiny

În cadrul tezei a fost dezvoltată o aplicație interactivă în R Shiny, denumită **RO-SNOW17_web**. Aceasta permite rularea și vizualizarea modelului SNOW-17 pentru diverse locații din România, în scopuri științifice, educaționale și aplicative. Necesitatea unui astfel de instrument a rezultat din mai multe observații. În primul rând, lipsa unor aplicații dedicate regiunii noastre pentru simularea stratului de zăpadă și lipsa unor instrumente intuitive pentru compararea directă a simulărilor cu observațiile meteorologice existente. În al doilea rând, dificultatea în utilizarea și calibrarea modelelor conceptuale de tip SNOW-17, în special de către utilizatori non-programatori, a limitat aplicabilitatea acestor modele în cercetare. Aplicația este găzduită online și accesibilă publicului larg la adresa https://climall.shinyapps.io/RO-SNOW17_web/. Ea este alcătuită din mai multe secțiuni organizate în tab-uri.

Codul sursă

În această teză, au fost utilizate programe software open-source pentru prelucrarea și analiza datelor climatice (climatologii, tendințe etc.), precum și pentru reprezentarea rezultatelor (hărți, grafice). Prelucrările statistice, calculul indicatorilor și generarea plot-urilor (boxplot-uri, serii temporale, diagrame de corelație etc.) au fost realizate în limbajul de programare R, utilizând diferite biblioteci specializate în analiza datelor (i.e. climatice). De asemenea, pentru manipularea fișierelor de tip NetCDF și realizarea operațiilor climatologice de bază (media lunară, multianuală, selecții temporale și spațiale, decupare pe zona de interes), a fost utilizat instrumentul de procesare în linie de comandă Climate Data Operators (CDO). Această combinație de instrumente open-source a permis un flux de lucru reproductibil, eficient și transparent în toate etapele analizei.

Codurile sursă utilizate pentru primul capitol al studiului sunt disponibile public la adresa: https://github.com/vladamihasei/snow_clim

În ceea ce privește scrierea modelului SNOW-17 în limbaj de programare R, el poate fi găsit la următoare adresa de pe Github: <https://github.com/vladamihasei/RO-SNOW17>

Concluzii

Rezultatele obținute oferă o imagine detaliată asupra distribuției spațiale și temporale a caracteristicilor stratului nival, a modificărilor climatice recente și a capacității modelelor de a reproduce aceste fenomene.

Analiza climatologică a evidențiat un semnal clar de reducere a sezonului nival, manifestat prin întârzierea apariției stratului de zăpadă (FSC), topirea mai timpurie (LSC), precum și scăderea duratei și grosimii acestuia. Cele mai afectate zone sunt cele joase și deluroase, unde stratul de zăpadă devine tot mai discontinuu și efemer. În schimb, în regiunile montane înalte (ET și Dfc), persistența stratului rămâne semnificativă, iar în unele cazuri, se înregistrează chiar creșteri ușoare ale grosimii maxime, posibil datorate intensificării precipitațiilor solide.

În ceea ce privește modelarea, prin implementarea modelului SNOW-17 în limbajul de programare R, modelul s-a dovedit capabil să redea, în linii mari, evoluția stratului de zăpadă, dar cu o tendință sistematică de supraestimare, mai ales în regiunile montane și în

perioadele cu acumulări masive. Acest comportament a fost corectat semnificativ prin aplicarea tehnicilor de asimilare a datelor.

Implementarea metodei Particle Batch Smoother (PBS) a condus la o îmbunătățire considerabilă a performanței modelului. În regimul post-asimilare (Post-DA), erorile de estimare s-au redus, iar corelația cu observațiile s-a îmbunătățit vizibil, atât pentru grosimea stratului de zăpadă, cât și pentru echivalentul în apă. Astfel, asimilarea a avut un rol crucial în reducerea incertitudinilor asociate parametrizării modelului și în obținerea unor estimări mai robuste.

De asemenea, a fost dezvoltată o aplicație interactivă Shiny (RO-SNOW17_web), care permite rularea modelului și vizualizarea rezultatelor într-un mod accesibil publicului larg. Aceasta facilitează experimentarea cu parametrii modelului, compararea cu observațiile reale și explorarea vizuală a comportamentului zăpezii la nivel local.

Bibliografie selectivă

- Amihăesei, V.-A.,** Sfică, L., S-R., Rubin Micu, D.-M., Cheval, S., 2025 (în curs de evaluare). Contribution of Mediterranean cyclones to snowfall accumulation in Romania. *Atmospheric Research*
- Amihăesei V.-A.,** Micu D.-M., Cheval S., Dumitrescu A., Sfică L., Bîrsan M.-V., 2024. Changes in snow cover climatology and its elevation dependency over Romania (1961–2020). *J Hydrol Reg Stud* 51:101637. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101637>
- Amihaesei, V.-A.,** Apostol, L., Dumitrescu, A. (2020) An Approaching on Estimating of Snow Depth and Snow Water Equivalent. 2020 "Air and Water – Components of the Environment" Conference Proceedings, Cluj-Napoca, Romania, p. 201-212, DOI: 10.24193/AWC2020_19.
- Anderson EA, 1976. A point energy and mass balance model of a snow cover. NOAA Technical Report, NWS 19, p 150
- Anderson EA, 2006. Snow accumulation and ablation model. NWSRFS (National Weather Service River Forecast System) Snow17, 2005. II.2-SNOW-17: HYDRO-17 Snow Model, in User Manual for Release 81.
http://www.weather.gov/oh/hrl/nwsrfs/users_manual/part2/_pdf/22snow17.pdf
- Apostol L., 2008. The Mediterranean cyclones–the role in ensuring water resources and their potential of climatic risk, in the east of Romania. *Present Environ Sustain Dev* 2:143–163
- Beck, H.E., Zimmermann, N.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., Wood, E.F., 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci. Data* 5, 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>

- Beniston, M., 2012. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *J. Hydrol.* 412–413, 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.046>
- Beniston, M., Stoffel, M., 2014. Assessing the impacts of climatic change on mountain water resources. *Sci. Total Environ.* 493, 1129–1137. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.122>
- Bîrsan M-V, Niță I-A & Amihăesei V-A., 2024. Influence of large scale atmospheric circulation on romanian snowpack duration, *Romanian Reports in Physics* 76, 708 <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.708>
- Bîrsan, M.-V., Dumitrescu, A., 2014. Snow variability in Romania in connection to large-scale atmospheric circulation: SNOW VARIABILITY IN ROMANIA IN CONNECTION WITH LARGE-SCALE CIRCULATION. *Int. J. Climatol.* 34, 134–144. <https://doi.org/10.1002/joc.3671>
- Bojariu, R., Gimeno, L., 2003. The role of snow cover fluctuations in multiannual NAO persistence. *Geophys. Res. Lett.* 30, 2002GL015651. <https://doi.org/10.1029/2002GL015651>
- Caian M, Andrei MD, 2019. Late-Spring Severe Blizzard Events over Eastern Romania: A Conceptual Model of Development. *Atmosphere* 10:770. <https://doi.org/10.3390/atmos10120770>
- Dong, C., Menzel, L., 2019. Recent snow cover changes over central European low mountain ranges. *Hydrol. Process.*, 34 (2), 321–338. <https://doi.org/10.1002/hyp.13586>.
- Dumitrescu, A., Bojariu, R., Bîrsan, M.-V., Marin, L., Manea, A., 2015. Recent climatic changes in Romania from observational data (1961–2013). *Theor. Appl. Climatol.* 122, 111–119. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1290-0>
- Essery, R., Morin, S., Lejeune, Y., B Ménard, C., 2013. A comparison of 1701 snow models using observations from an alpine site. *Adv. Water Resour.* 55, 131–148. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.07.013>
- Flaounas E, Davolio S, Raveh-Rubin S, 2022. Mediterranean cyclones: current knowledge and open questions on dynamics, prediction, climatology and impacts. *Weather Clim Dyn* 3:173–208. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-173-2022>
- Ionițe I, Sfică L, 2016. The Black Sea As Contributor To the Precipitation Amount on Moldova Region. In: *Physical Geography; Cartography; Geographic Information*
- Jacobi, H.-W., 2012. Snow: a reliable indicator for global warming in the future? *Environ. Res. Lett.* 7, 011004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/011004>
- Margulis, S. A., Giroto, M., Cortés, G., and Durand, M., 2015. A particle batch smoother approach to snow water equivalent estimation, *J. Hydrometeorol.*, 16, 1752–1772, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0177.1>

- Micu, D., 2009. Snow pack in the Romanian Carpathians under changing climatic conditions. *Meteorol. Atmospheric Phys.* 105, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00703-009-0035-6>
- Micu, D.M., **Amihaesei, V.A.**, Milian, N., Cheval, S., 2021a. Recent changes in temperature and precipitation indices in the Southern Carpathians, Romania (1961–2018). *Theor. Appl. Climatol.* 144, 691–710. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03560-w>
- Micu, D.M., Dumitrescu, A., Cheval, S., Nita, I., Birsan, M., 2021b. Temperature changes and elevation-warming relationships in the Carpathian Mountains. *Int. J. Climatol.* 41, 2154–2172. <https://doi.org/10.1002/joc.6952>
- Patriche, C.-V., 2009. Metode statistice aplicate în climatologie. Terra Nostra, Iasi.
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Zhou, L., Wang, T., 2013. Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades. *Environ. Res. Lett.* 8 014008. Doi: 10.1088/1748-9326/8/1/014008
- Pepin, N., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., Notarnicola, C., Palazzi, E., Seibert, P., Serafin, S., Schöner, W., Terzago, S., Thornton, J.M., Vuille, M., Adler, C., 2021. Climate Changes and Their Elevational Patterns in the Mountains of the World. *Reviews of Geophysics.* 60(1). <https://doi.org/10.1029/2020RG000730>
- Popova, V., 2007. Winter snow depth variability over northern Eurasia in relation to recent atmospheric circulation changes. *Int. J. Climatol.* 27, 1721–1733. <https://doi.org/10.1002/joc.1489>
- Raveh-Rubin S, Wernli H., 2015. Large-scale wind and precipitation extremes in the Mediterranean: a climatological analysis for 1979–2012: Mediterranean Large-scale Wind and Precipitation Extremes. *Q J R Meteorol Soc* 141:2404–2417. <https://doi.org/10.1002/qj.2531>
- Sfică, L., Andrei, A., Bărcăcianu, F., Cojocaru, Ș., Enea, A., Hapciuc, O.-E., Iosub, M., Ichim, P., 2013. Analysis of snow-drifting vulnerability. Application to Botoșani county. *Lucr. Semin. Geogr. Dimitrie Cantemir* 36, 43–54.
- Sfică L, Damian A-D, Grozavu A, et al., 2022. Synoptic Conditions Associated with Floods and Highest Discharges on Lower Danube River (1980–2010). In: Negm A, Zaharia L, Ioana-Toroimac G (eds) *The Lower Danube River*. Springer International Publishing, Cham, pp 329–355
- Sfică, L., Minea, I., Hrițac, R., **Amihăesei, V. A.**, & Boicu, D. (2022). Projected changes of groundwater levels in northeastern Romania according to climate scenarios for 2020–2100. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101108. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101108>
- Voiculescu M., 2009. Snow avalanche hazards in the Fagaras massif (Southern Carpathians): Romanian Carpathians-Management and perspectives, *Natural hazards*, 51 (3), p. 459-4