



UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
Facultatea de Fizică
Școala Doctorală de Fizică



Florin-Ioan CONSTANTIN

MONITORING AND FORECASTING THE IONOSPHERIC ACTIVITY OVER
ROMANIA

Teză de Doctorat
Rezumat

Coordonator științific
C.S. I Dr. Habil Alexandru NICOLIN-ŻACZEK

București, 2025

Ionosfera este o regiune dinamică a atmosferei superioare a Pământului care joacă un rol esențial în propagarea undelor radio și a semnalelor satelitare. Variațiile proprietăților ionosferice, cauzate de activitatea solară, furtunile geomagnetice și dinamica atmosferică, pot duce la întârzieri ale semnalelor, distorsiuni sau chiar întreruperi complete. Aceste efecte au un impact deosebit asupra sistemelor moderne de comunicație și navigație, ceea ce face necesară dezvoltarea unor metode robuste de monitorizare și caracterizare a ionosferei. În acest context, interesul pentru Space Situational Awareness (SSA) și pentru inițiativele legate de Space Weather a crescut semnificativ.

Printre parametrii cheie utilizați pentru evaluarea comportamentului ionosferic, Conținutul Total de Electroni (TEC) are o importanță primordială. TEC cuantifică numărul total de electroni de-a lungul unei traiectorii a semnalului, influențând viteza de propagare și calitatea semnalelor radio. Progresele în tehnologia satelitară, în special în Sistemele Globale de Navigație prin Satelit (GNSS), au permis monitorizarea continuă și precisă a ionosferei. Prin procesarea datelor GNSS, se pot obține parametri ionosferici esențiali, precum TEC și scintilațiile ionosferice, cu diferite rezoluții temporale și spațiale.

O mare parte din motivația acestui studiu este crearea unui serviciu capabil să testeze cerințele minime pentru dezvoltarea și furnizarea produselor TEC. Rezoluția spațială stabilită, deși mai mare decât cea întâlnită în mod obișnuit în alte servicii, oferă oportunitatea de a dezvolta, testa și rafina diferite metode, incluzând provocări atât din punct de vedere computațional, cât și fenomenologic. De asemenea, rezoluția ridicată acoperă un gol în datele disponibile în prezent, completând alte servicii care furnizează date mai regionale, cu rezoluții mai mici, prin instanțe care au șansa de a fi mai relevante din perspectiva utilizatorilor de zi cu zi.

Vârful actual de activitate al ciclului solar oferă oportunități unice de a înregistra și analiza evenimente ionosferice care afectează rareori latitudinile joase. Aceste evenimente pot fi utilizate pentru testarea și ajustarea capacităților serviciului.

Această teză acoperă toate aspectele necesare pentru implementarea unui serviciu de monitorizare, începând cu aspectele tehnice ale sateliților GNSS disponibili, aspectele teoretice ale obținerii datelor de observație satelitară și procesele care afectează undele electromagnetice în interacțiunea lor cu obiectul nostru de studiu. De asemenea, se abordează extragerea informațiilor de interes din date și procesarea acestora într-un produs utilizabil, produs care este în prezent gestionat de Institutul de Științe Spațiale – filiala INFLPR, cu sprijinul și suportul Institutului Național pentru Fizica Pământului.

Pe măsură ce ionosfera se extinde prin atmosferă, sateliții rămân principala metodă de observație. Dintre numeroasele rețele de sateliți, sistemele de poziționare prin satelit, denumite GNSS, reprezintă cea mai bună opțiune pentru colectarea datelor observaționale, deoarece sunt

numeroase, bine întreținute și, datorită principiilor lor de funcționare, există întotdeauna sateliți deasupra orizontului.

Sistem Global de Navigație prin Satelit, GNSS, se referă la toate sistemele satelitare care oferă servicii continue de navigație și poziționare la nivel global. Astfel de sisteme includ Global Positioning System (GPS), Glonass, Galileo și Beidou.

Toate sistemele GNSS sunt alcătuite din trei segmente: segmentul spațial, format din sateliții propriu-ziși; segmentul de control, denumit uneori și segment terestru, care gestionează și coordonează funcționarea corectă a sistemului; și segmentul utilizator, care include toate receptoarele GNSS, indiferent de scopul utilizării lor.

Poziția exactă a sateliților pe orbită este un produs rafinat, bazat pe un algoritm standardizat și testat, utilizat încă de la lansarea primului satelit pe orbită. Acest algoritm ia în considerare numeroase perturbații și permite obținerea unor rezultate precise. Totuși, o înțelegere aprofundată a fizicii din spatele termenilor enumerați simplu în fișierele de navigație ale sateliților GNSS poate oferi o perspectivă nu doar asupra funcționării satelitului, ci și asupra oricărui proces fizic sau fenomen care ar putea interfera cu datele observaționale furnizate de sateliți și utilizate în studii.

Această mișcare kepleriană este descrisă de ecuația de bază, a cărei integrarea acestei ecuații oferă în mod formal soluția, unde coeficienții $a_1, \dots, a_6$ sunt constante de integrare selectabile liber. De preferință, se utilizează elementele kepleriene a (semiaxa mare), e (excentricitatea), i (înclinația), ω (argumentul perigeului), ..., M (anomalie medie).

În realitate, un număr considerabil de forțe suplimentare acționează asupra sateliților aflați pe orbită joasă în jurul Pământului. Pentru a le distinge de forța centrală (acceleerația datorată corpului central), acestea sunt denumite forțe perturbatoare. Satelitul experimentează acceleerații suplimentare din cauza acestor forțe, care pot fi combinate într-un vector perturbator rezultat.

Forțele perturbatoare sunt responsabile în special pentru următoarele tipuri de acceleerații: acceleerații datorate distribuției nesferice și neomogene a masei în interiorul Pământului, acceleerații generate de influența altor corpuri cerești (Soarele, Luna și planetele), acceleerații cauzate de marea terestre și oceanice, acceleerații provocate de rezistența atmosferică, acceleerații datorate presiunii radiației solare directe și reflectate de Pământ.

Primele trei tipuri de forțe perturbatoare sunt de natură gravitațională, în timp ce restul sunt de natură non-gravitațională.

Ionosfera este acea parte a atmosferei terestre care se extinde de la aproximativ 60 km până la peste 2000 km altitudine. După cum sugerează și numele său, aceasta conține un mediu parțial ionizat, ca rezultat al radiațiilor solare X și Extreme UltraViolet (EUV), precum și al incidenței particulelor încărcate.

Viteza de propagare a semnalelor electromagnetice GNSS în ionosferă depinde de densitatea electronilor, care este determinată în principal de două procese fundamentale. În timpul zilei, radiația solară ionizează atomii neutri, generând electroni liberi și ioni. Noaptea, procesul de recombinare devine predominant, în care electronii liberi se recombina cu ionii pentru a forma din nou particule neutre, ceea ce duce la o reducere a densității electronilor.

Măsurătorile întârzierii transmise de sateliții GNSS includ nu doar valorile reale ale TEC, ci și multiple erori și biasuri, induse fie de instrumentele de măsură, fie de aproximațiile modelului ionosferic în sine. Eliminarea acestor biasuri și erori constituie o parte esențială a procesului, iar de-a lungul timpului au fost dezvoltate multiple metode pentru a îmbunătăți acuratețea calculelor.

Un exemplu este metoda utilizată de DLR, care presupune utilizarea atât a măsurătorilor de fază, cât și a celor de cod, folosind măsurătorile de cod pentru a netezi valorile TEC calculate pe baza fazei, iar biasurile sunt determinate printr-un calcul colectiv folosind rădăcina pătrată a mediei pătrate (RMS).

O altă metodă, prezentată de Otsuka et al. (2002) și utilizată pentru construirea hărților TEC deasupra Japoniei folosind doar măsurători de cod, se bazează pe presupunerea că media orară a TEC este constantă pe zona acoperită de un receptor terestru. Această medie orară TEC este apoi utilizată pentru a calcula valoarea biasului, care este reintrodusă ulterior pentru a obține valoarea reală a TEC. Hărțile generate prin această metodă au o rezoluție spațială de $0,15^\circ \times 0,15^\circ$ în longitudine și latitudine.

Datele GNSS colectate de o rețea de receptoare gestionată de Institutul Național pentru Fizica Pământului sunt procesate pentru a crea hărți TEC de înaltă rezoluție deasupra României, cu scopul de a dezvolta un serviciu de monitorizare. Metoda aleasă pentru acest proces este o adaptare a metodei Otsuka. Deși această metodă a fost selectată datorită rezoluției sale spațiale ridicate, care este unul dintre obiectivele studiului, au fost efectuate modificări pentru a se adapta mai bine la condițiile și cerințele locale.

Concluzionăm că atât numărul de sateliți, cât și numărul de intervale de timp de mediere trebuie să fie de minimum 2 pentru a permite funcționarea serviciului, permitând calcularea valorilor reale de bias și VTEC.

Având valorile reale pentru VTEC, următorul pas a fost inserarea acestor valori într-o matrice care reprezintă teritoriul României. Limitele acestei matrice, care are dimensiunea de 100×100 elemente, sunt momentan stabilite între $43,5^\circ$ și $48,2^\circ$ latitudine și între 20° și $29,7^\circ$ longitudine. Toate valorile lui VTEC au fost atribuite unui element al matricei, pe baza poziției punctului de penetrare ionosferică.

În cazul în care două sau mai multe valori ale lui VTEC se încadrează în același element al matricei, s-a utilizat valoarea mediană. Matricea rezultată conține între 40 și 100 de elemente completate, restul până la 10000 rămânând necompletate, ceea ce a impus necesitatea extrapolării valorilor pentru punctele lipsă.

Metoda aleasă pentru această extrapolare a fost interpolarea radială, așa cum este prezentată în „Numerical Recipes” de Press și Teukolsky (2007). Această metodă presupune că toate punctele influențează celelalte în funcție de distanța dintre ele și de un set de ponderi.

Odată ce generarea hărților locale cu rezoluție spațială ridicată devine posibilă, următorul pas în procesul de monitorizare este prognoza. Principalele abordări pentru o astfel de problemă variază de la estimarea tuturor parametrilor fizici implicați în procesul investigat, până la o abordare pur statistică, cu diverse combinații între aceste două extreme.

Gradul ridicat de localizare al hărților Vertical Total Electron Content (VTEC), precum și circumstanțele specifice studiului, cum ar fi numărul și distribuția stațiilor de observație, sugerează că o abordare statistică este mai potrivită pentru această sarcină.

Fluxul constant de date se pretează bine la crearea de serii temporale pentru analiză și dezvoltarea unor modele de prognoză. Modelele autoregresive integrate cu medie mobilă (ARIMA) au fost investigate pentru a determina dacă oferă o potrivire adecvată.

Având la dispoziție metodele descrise în capitolele anterioare, utilizând date provenite în principal de la GPS, dar și de la constelațiile GNSS Galileo, au fost generate hărți TEC cu o frecvență de 15 minute. Hărțile au o rezoluție spațială de $0,047^{\circ} \times 0,095^{\circ}$, ceea ce se traduce printr-o suprafață de aproximativ 55 km², fiind astfel mai mare decât cea a serviciilor regionale care acoperă teritoriul României și superioară serviciilor locale similare de estimare a TEC. Aceste hărți acoperă un interval de mai mulți ani. Frecvența generării hărților a fost aleasă astfel încât să fie în concordanță cu necesitățile de acoperire a datelor și cu puterea de calcul disponibilă

Rezultatele au fost comparate cu datele de referință, și anume hărțile finale IONEX de la IGS. Datele acoperă un interval de timp de 1 an, perioada cuprinsă între 01.01.2022 și 31.12.2023. Pentru acest interval, generarea hărților a fost realizată, ceea ce înseamnă că condițiile inițiale au fost satisfăcute, în 83,2% din timp.

Pentru hărțile disponibile, comparația cu datele de referință a relevat valori ale reziduurilor absolute cuprinse între 0,001 TECU (de exemplu, pe 20.07.2023) și un maxim de 39997 TECU într-un caz particular (de exemplu, pe 26.08.2022). Având în vedere gama largă a valorilor obținute, s-a efectuat o procesare statistică suplimentară, care a condus la următoarele rezultate:

Dintre hărțile generate, pentru 76% dintre ele, valoarea reziduurilor medii a fost sub 50 TECU, pentru 45% a fost sub 10 TECU, iar pentru 11% sub 2 TECU.

Figura 11 de mai jos [14] oferă o perspectivă asupra valorii medii și deviației standard ale hărților, prezentate sub formă de serie temporală, incrementată cu un pas egal cu frecvența de generare a hărților, adică 15 minute. Majoritatea reziduurilor, așa cum se poate observa în graficul superior, se încadrează în intervalul [0,20] TECU, cu doar câteva valori excepționale care depășesc pragul de 50 TECU în valoare absolută. O situație similară se observă și în cazul deviației standard a hărților, unde majoritatea valorilor se află în intervalul [4,6] TECU, în timp ce doar câțiva indicatori izolați depășesc pragul de 10 TECU.

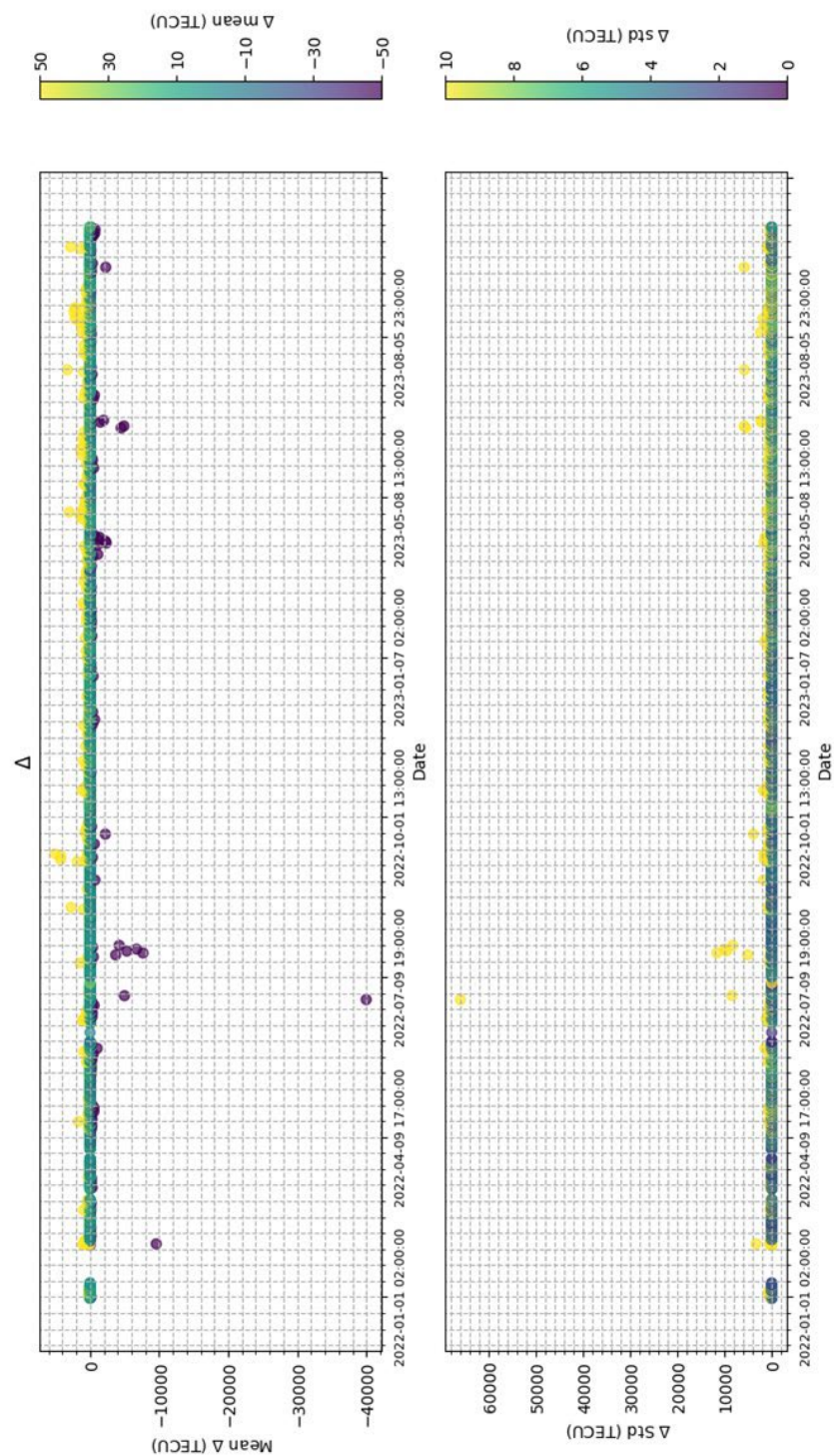


Figura 1: Pentru intervalul de timp 01.01.2022, valoarea medie a reziduurilor dintre hărțile generate și cele de referință (stânga) și abaterea reziduurilor (dreapta)

În plus, histogramelor reziduurilor și ale deviației standard susțin această concluzie, așa cum se poate observa și în Figurile 2 și 3, unde majoritatea hărților se află în intervalul imediat apropiat de deviația zero.

Figura 2 conține histogramelor diferenței medii dintre hărțile obținute și hărțile de referință IGS. Graficul superior include toate valorile, în timp ce graficul inferior se concentrează pe partea centrală a datelor din histogramă, în intervalul $[-50, 50]$ TECU.

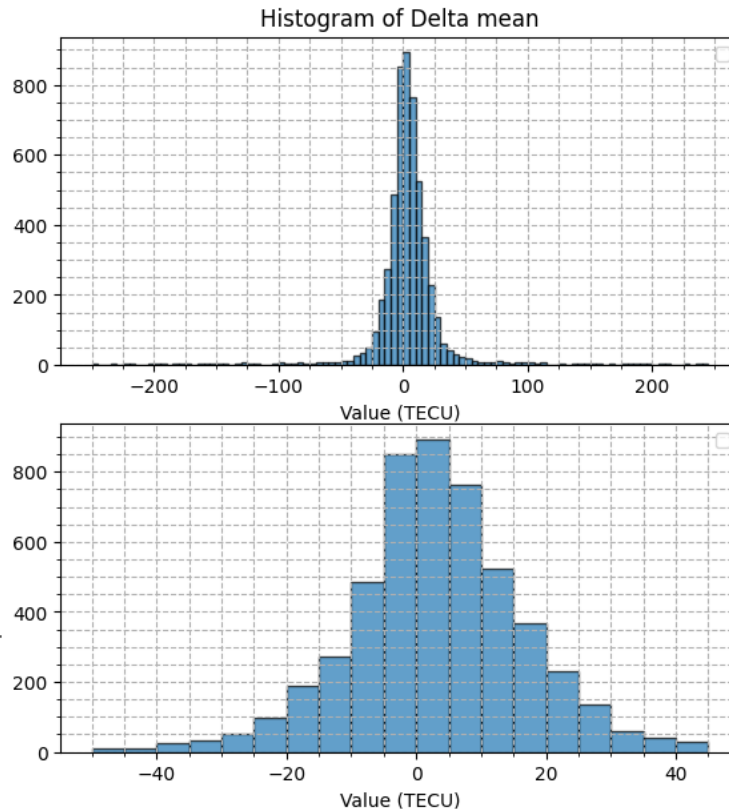


Figura 2: Histograma diferenței medii pentru întregul interval (sus) și histograma diferenței medii în intervalul $(-50, 50)$ TECU (jos)

Histograma arată că media reziduurilor medii se află în intervalul $[0, 5]$ TECU, în timp ce lățimea totală la jumătate din maxim (FWHM) este de aproximativ 20 TECU. Se observă o ușoară tendință

către valori pozitive ale reziduurilor, analiza indicând că 60% dintre valorile VTEC mapate sunt supraestimate. Această constatare, împreună cu valoarea ridicată a FWHM, sugerează existența unei erori sistematice în metodologia de generare a hărților, care poate fi atribuită fenomenului de clustering descris într-un capitol anterior.

Principala soluție pentru această problemă, menținând în același timp rezoluția spațială actuală, rămâne includerea unui număr mai mare de receptoare terestre în rețeaua de achiziție a datelor, inclusiv din afara granițelor regiunii geografice investigate. Acest lucru ar putea furniza puncte suplimentare de traversare și date suplimentare pentru funcția de mapare.

Pe lângă histogramele din Figura 2, care conțin diferențele medii, în Figura 3 de mai jos este prezentată o histogramă a deviației standard a matricilor de diferență.

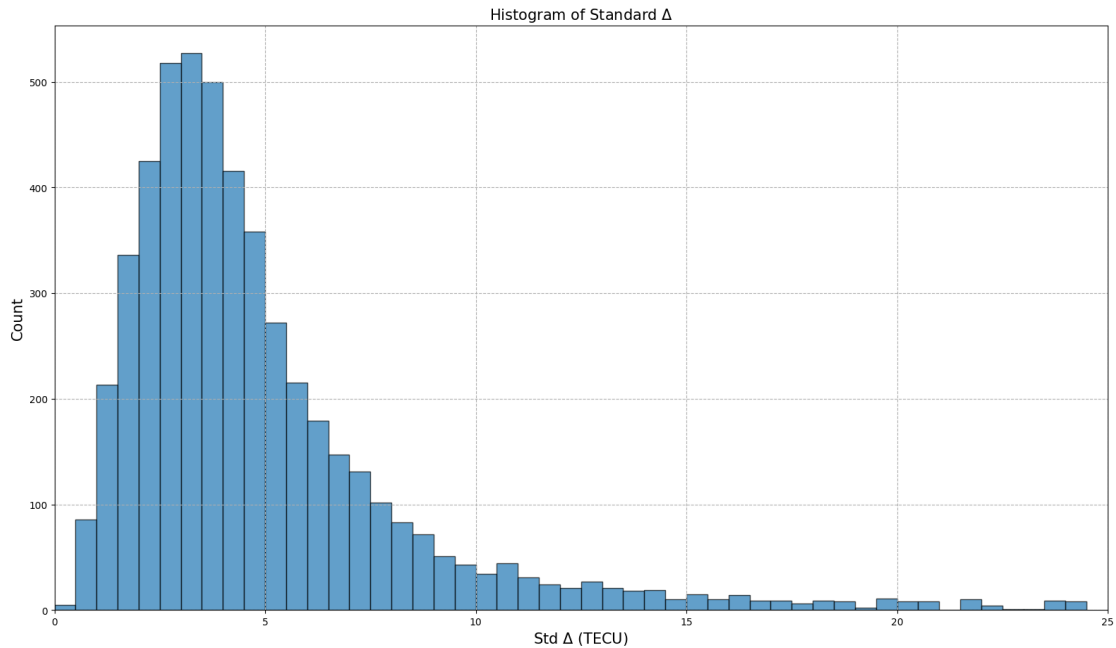


Figura 3: Histograma deviației standard a matricelor de diferențe

Aproximativ jumătate dintre hărțile generate au o deviație standard sub 5 TECU, ceea ce sugerează un grad de netezime relativ similar între hărțile generate și cele de referință. Funcția de mapare reușește, în mare parte, să urmărească suprafața datelor de referință, chiar și la o rezoluție crescută, deși cu un anumit decalaj.

Rezultatul final al procesului de mapare în acest stadiu este prezentat în Figura 4 de mai jos, care conține 4 hărți ale conținutului total de electroni (TEC) vertical peste România pentru data de 20 iulie 2023, la orele 09:00 (stânga sus), 09:15 (dreapta sus), 09:30 (stânga jos) și 09:45 (dreapta jos).

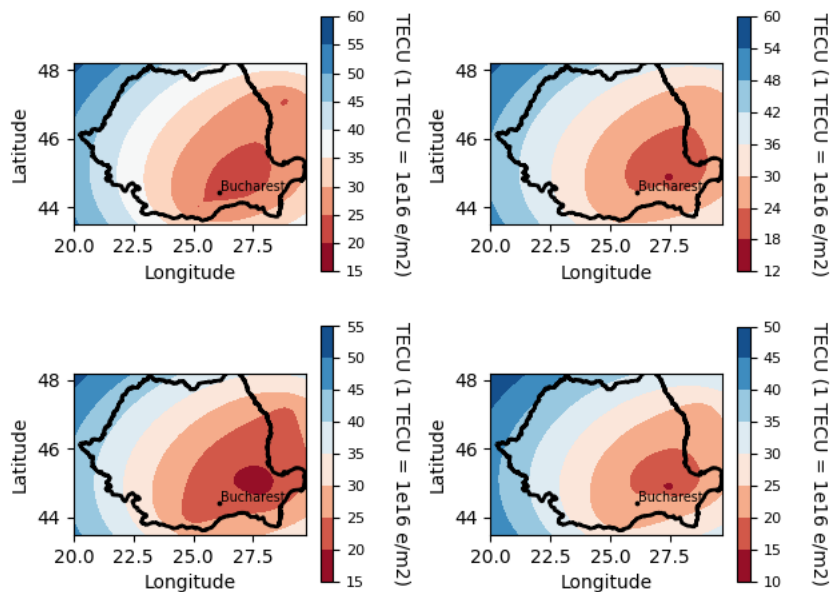


Figura 4: Exemplu de hărți TEC deasupra României la 20 iulie 2023, pentru momentele 09:00 (stânga sus), 09:15 (dreapta sus), 09:30 (stânga jos) și 09:45 (dreapta jos) ora locală

Odată ce hărțile au fost calculate cu o precizie suficientă, acestea pot fi utilizate pentru a genera alte produse, cum ar fi prognozele. Modelele ARIMA sunt utilizate pe scară largă în domeniul vremii spațiale.

În cazul nostru particular, pentru a fi în concordanță cu obiectivul mai larg al proiectului – adaptabilitatea în condițiile unui volum minim de date de intrare – parametrii modelului trebuie să fie reduși. Posibilitatea de a seta parametrii o singură dată și de a folosi un model fix pentru toate prognozele eliberează resurse de calcul și menține timpul de rulare suficient de scăzut pentru ca întregul serviciu să poată fi calificat, cel puțin teoretic, drept aproape în timp real, în funcție de disponibilitatea datelor.

Ca și înainte, prognozele sunt comparate cu hărțile IGS IONEX scalate și, de asemenea, cu nowcast-urile, atunci când acestea au fost disponibile. Diferențele generale dintre toate aceste date au fost reprezentate grafic în Figura 19 de mai jos.

Dintre cele 533 de mostre de prognoză luate în considerare, 34% au o diferență absolută față de IGS de cel mult 5 TECU, iar 53% dintre ele prezintă o diferență sub 10 TECU. Atunci când pragul este mărit la 25 TECU, 76% dintre prognoze se încadrează sub această valoare. Aceste procente sunt similare cu cele ale diferențelor dintre hărțile calculate (denumite de acum înainte nowcast-uri) și hărțile de referință IGS.

În Figura 5 de mai jos este prezentată histograma diferenței medii dintre prognoze și nowcast-uri pentru data la care au fost calculate.

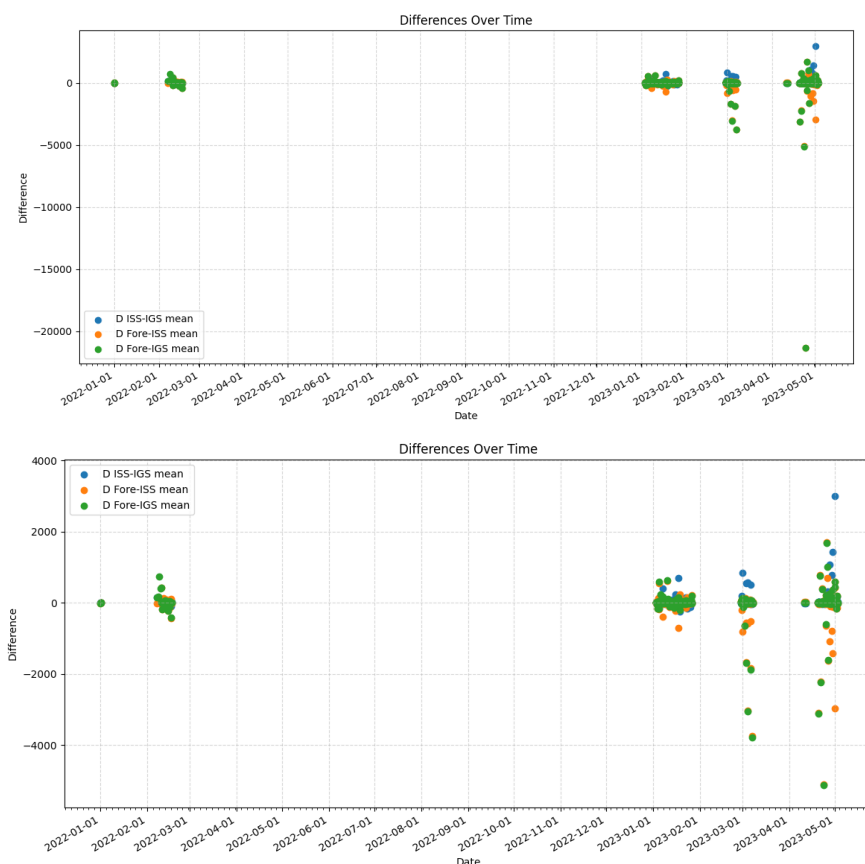


Figura 5:
Diferențe între prognoză și Nowcast, în puncte portocalii, prognoză și IGS, în puncte verzi, și Nowcast și IGS, în albastru, complet (sus) și fără valori aberante majore (jos)

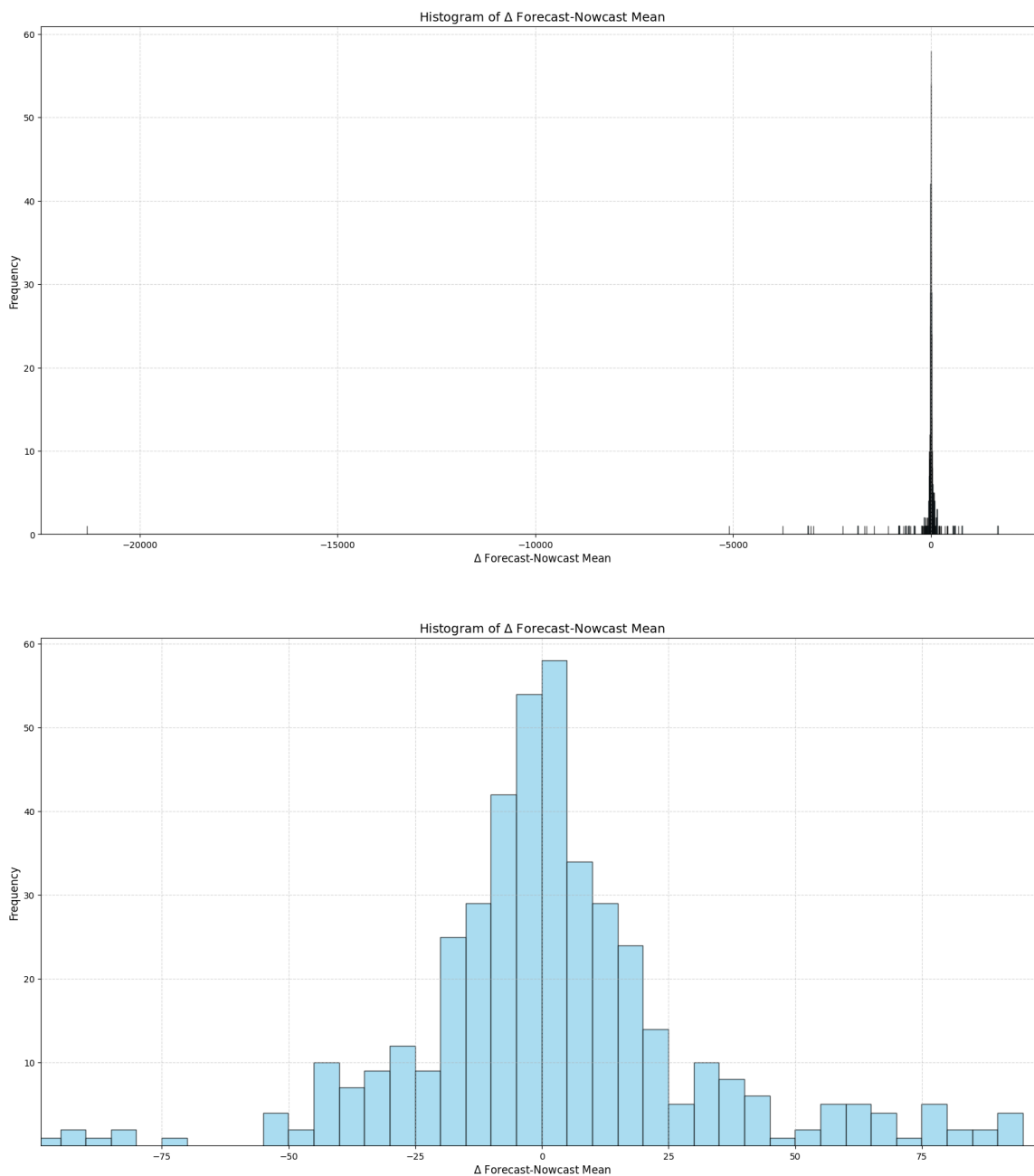


Figura 6: Histograma diferențelor medii dintre datele prognozate și cele actuale, în întregime (sus) și în intervalul $(-100, 100)$ (jos)

Există o ușoară înclinare către valorile negative în această histogramă, care poate contrabalansa tendința către valori pozitive afișată de nowcast-uri în comparație cu datele de referință. Un indicator mai clar al acestui fenomen este histograma diferențelor dintre prognoze și datele de referință IGS, prezentată în Figura 7 de mai jos.

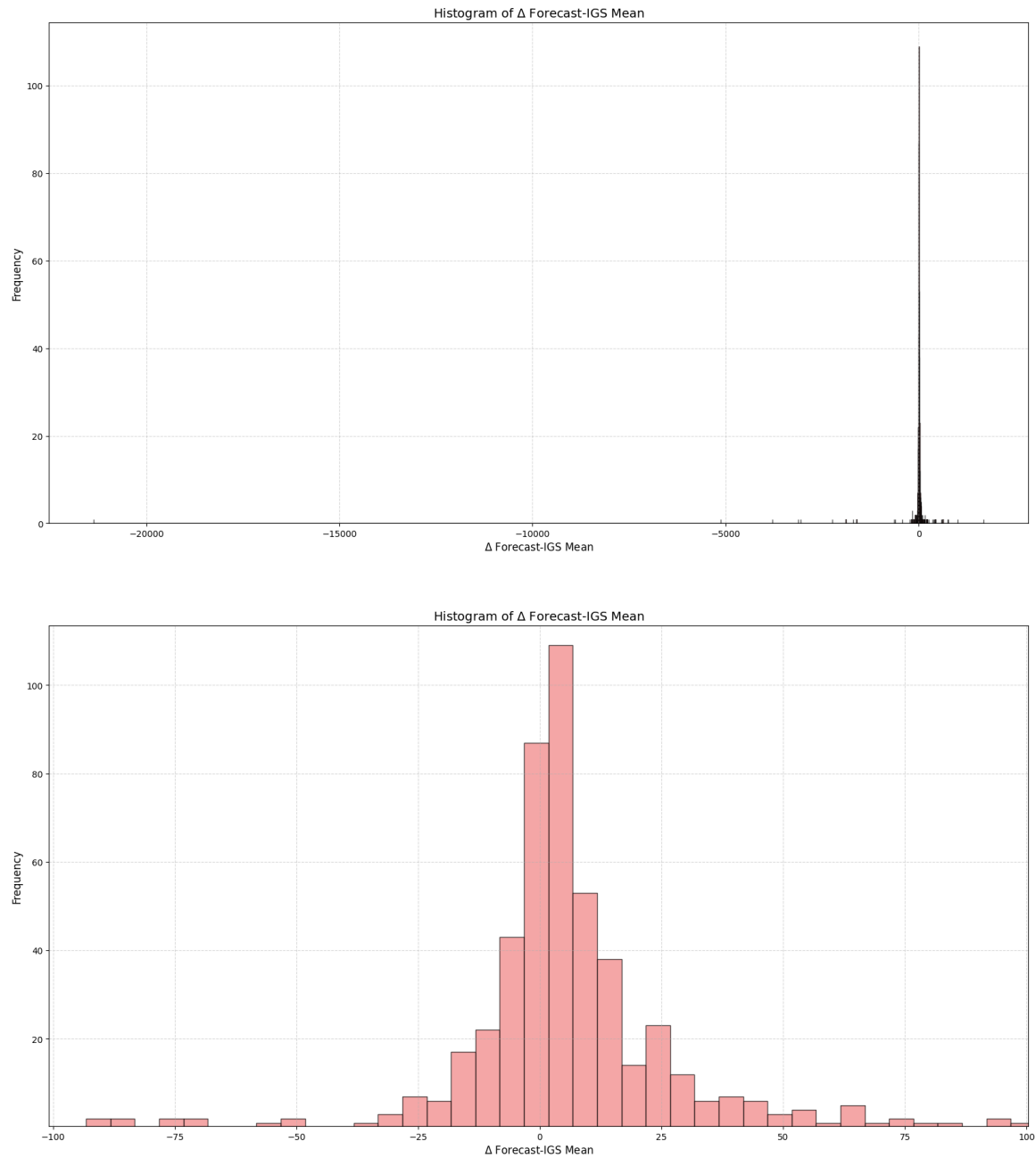


Figura 7: Histograma diferenței medii dintre prognoze și datele de referință IGS, integrală (sus) și în intervalul (-100,100) (jos)

Se observă în continuare o ușoară asimetrie către valorile pozitive atunci când comparăm valorile prognozate cu datele de referință IGS, ceea ce confirmă așteptarea că prognoza va urma tendința datelor originale. Prin urmare, această asimetrie poate fi atribuită erorilor din datele originale pe care s-a bazat prognoza, iar orice îmbunătățire a calității acestora va duce, implicit, la o creștere a preciziei prognozelor.

În final, histograma deviației standard a diferenței dintre prognoze și datele de referință este prezentată în figura de mai jos.

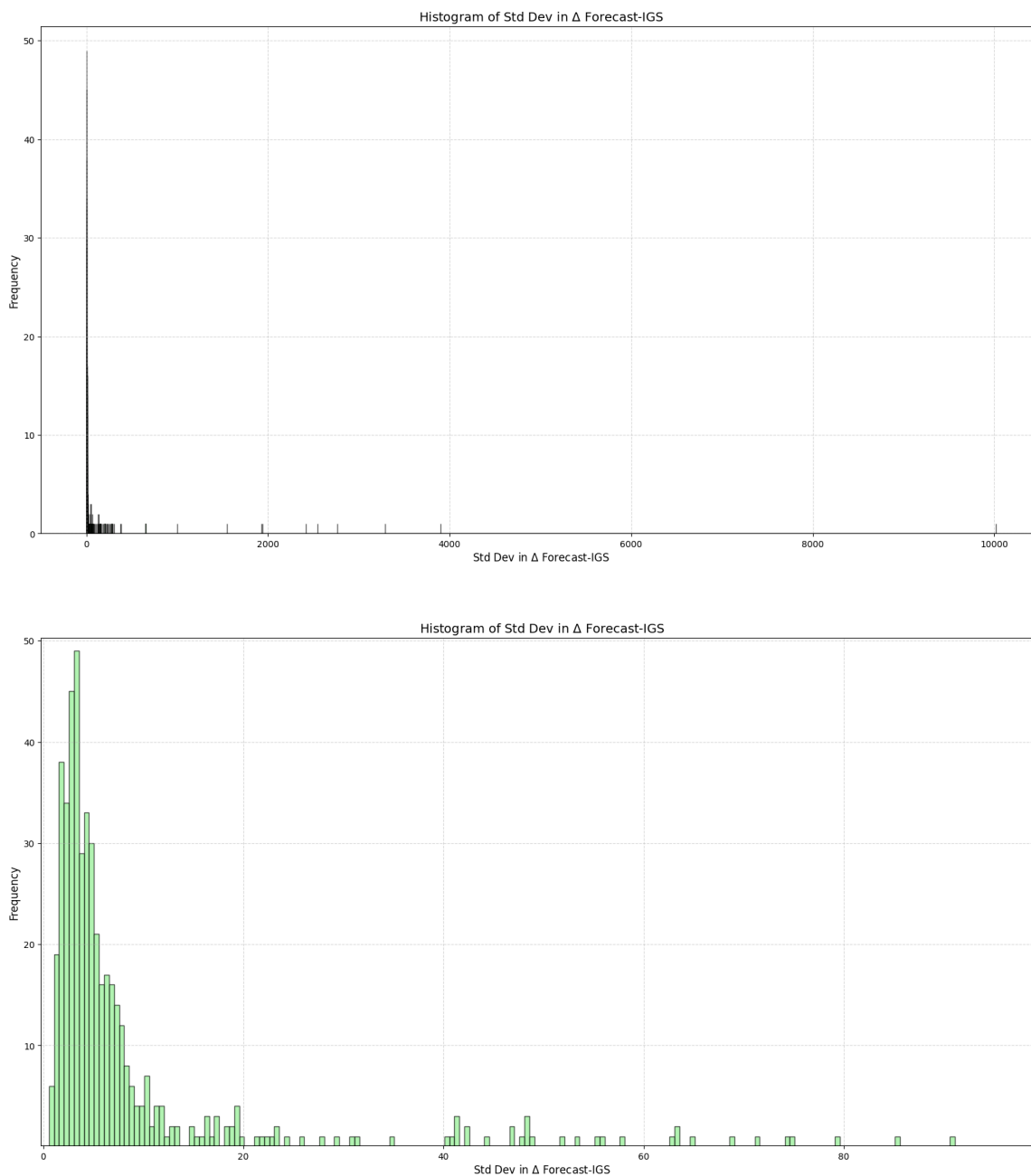


Figura 8: Histograma abaterii standard a diferenței medii dintre datele de prognoză și cele de referință, integrală (sus) și în intervalul (0,100) (jos)

Valoarea cu cea mai mare frecvență este 3,5 TECU. Dimensiunea similară a histogramelor deviației standard dintre diferența prognoză-referință și acumasturile-referință sugerează că modelul de prognoză a reușit să mențină în mare măsură o formă și o uniformitate similare cu cele ale datelor de intrare.

Subfurtunile și ruperile aurorale sunt factori esențiali ai creșterii TEC și scintilației de fază. Aceste fenomene sunt asociate cu curenți ionosferici intensi, precum electrojetul spre vest, și au loc în regiunile de graniță ale curenților aliniați câmpului (FAC) ascendenți și descendenți, în zona discontinuității Harang. Precipitația electronilor energetici în ionosferă determină

apariția unor gradienti abrupti ai densității electronilor și a unor neregularități, ceea ce, la rândul său, induce variabilitatea TEC și scintilația de fază.

Furtunile solare care generează Aurora Boreală oferă o oportunitate unică pentru calibrarea funcției de cartografiere. Hărțile au fost calculate pentru o valoare α crescută în 40 de trepte pentru o funcție quadratică și una quadratică inversă, $\phi = (rr^2)\alpha$ și $\phi = (1/r^2)\alpha$.

Au fost identificate trei date în care Aurora a fost observată pe întreg teritoriul țării și pentru care au fost disponibile suficiente date: 05.11.2023, 10.05.2024 și 12.09.2024.

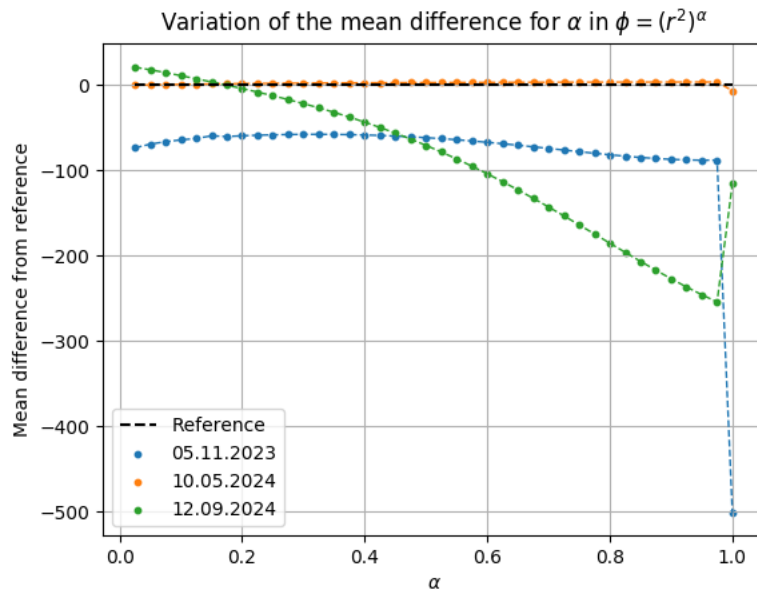


Figura 9: Variația unui interval mare de parametri pentru exponentul α al multicuadraticii directe pentru fiecare dintre cele 3 date cu Aurora Boreală deasupra României

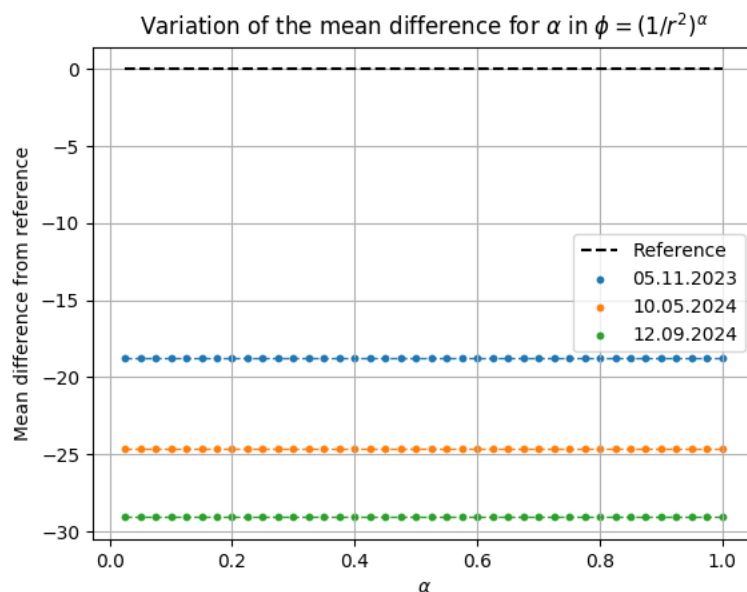


Figura 10: Variația unui interval mare de parametri pentru exponentul α al inversei multicuadraticice pentru fiecare dintre cele 3 date cu Aurora Boreală deasupra României

Cele mai bune rezultate obținute din seturile de date analizate par să provină dintr-o valoare a lui α de aproximativ 0,175 într-o formulă quadratică, așa cum este prezentat în Fig. 9. Formula quadratică inversă generează hărți uniforme, în care majoritatea variațiilor provin din valorile inițiale propriu-zise, conform Fig. 9.

Activitatea intensificată a ciclului solar, care a generat evenimente ionosferice rare, precum apariția fenomenului Aurora Borealis pe teritoriul României, a oferit o oportunitate de a utiliza aceste evenimente pentru testarea calibrării funcțiilor de interpolare în condiții speciale. Datele brute din mai multe episoade de auroră, care au avut loc în datele de 05.11.2023, 11.05.2024 și 12.09.2024, au fost reinterpretate utilizând două funcții de intrare diferite pentru interpolarea RBF: o funcție quadratică directă și una quadratică inversă, aplicate pe o gamă largă de parametri.

Cele mai bune rezultate au fost obținute folosind o funcție quadratică directă $\phi(r) = (r^2)^{0.175}$. Acest rezultat reprezintă un punct de plecare în înțelegerea relației dintre evenimentele ionosferice speciale și activitatea zilnică obișnuită. Luând în considerare o recalculare viitoare a hărților anterioare și analizând diferite posibilități, acest lucru ar putea fi să indice o potrivire mai precisă, ceea ce ar fi benefic pentru îmbunătățirea performanței generale a serviciului, fie să confirme caracteristicile unice ale fenomenului de auroră, care a apărut convenabil înaintea maximului ciclului solar ce urmează.

Pe măsură ce interesul pentru Conștientizarea Situațională Spațială (SSA) și Meteo-Spațial crește, iar din ce în ce mai multe misiuni sunt planificate pentru lansare, precum ESA Vigil, programată pentru 2031, sau încep să furnizeze produse, precum eSwarm, care oferă deja date și dezvoltă produse pentru monitorizarea meteo-spațială, menținerea și îmbunătățirea acestui serviciu reprezintă o oportunitate promițătoare de a contribui la un domeniu de studiu în plină expansiune.

Bibliografie

- [1] K. Davies, Ionospheric Radio, London: Peter Peregrinus Ltd., 1990.
- [2] J. Sanz-Subirana, J. M. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares, GNSS Data Processing. Vol. I: Fundamentals and Algorithms, Leiden: ESA Communications, 2013.
- [3] A. J. Mannucci, B. D. Wilson and D. N. Yuan, “A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements,” *Radio Science*, vol. 33, pp. 565-582, Mai-Iunie 1998.
- [4] N. Jakowski, “TEC Monitoring by Using Satellite Positioning System,” in *Modern Ionospheric Science, EGS*, Berlin, Producerserv GmbH Verlagsservice Berlin, 1996.
- [5] B. L. H. Hofmann-Wellenhof and E. Wasle, GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more, Vienna: Springer, 2008.
- [6] G. Johnston, A. Riddell and G. Hausler, Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems, Springer, 2017.
- [7] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), “GPS.GOV,” [Online]. Available: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>. [Accessed 26 May 2019].
- [8] Global Positioning Systems Directorate, Systems Engineering and Integration Interface Specification IS-GPS-200, *NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces*, 2018.
- [9] “Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing,” [Online]. Available: <https://www.glonass-iac.ru/en/index.php>. [Accessed 26 Mai 2019].
- [10] Engineering, Russian Institute of Space Device, *Interface Control Document, Navigational Radiosignal in Bands L1, L2*, 2008.
- [11] European Space Agency, “What is Galileo?,” [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Satellite_navigation/Galileo/What_is_Galileo. [Accessed 15 January 2025].
- [12] European Space Agency, “ESA Navipedia Galileo Ground Segment,” [Online]. Available: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Ground_Segment. [Accessed 16 September 2024].
- [13] “BeiDou Navigation Satellite System,” [Online]. Available: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/>. [Accessed 15 January 2025].
- [14] “BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document,” China Satellite Navigation Office, 2019.
- [15] The Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, “Global Navigation Satellite System GLONASS Open Service Performance Standard (OS PS)”.
- [16] G. Seeber, Satellite Geodesy, Berlin: Walter de Gruyter, 2003.
- [17] G. Xu, GPS: Theory, Algorithms and Applications, Postdam: Springer, 2007.
- [18] Jet Propulsion Laboratory, “Horizons System,” [Online]. Available: <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/manual.html>. [Accessed 15 January 2025].
- [19] H. C. P. Lau and M. Schindelegger, “Chapter 15 - Solid Earth tides,” in *A Journey Through Tides*, Elsevier, 2023, pp. 365-387.
- [20] M. C. Kelley, The Earth's Ionosphere: Plasma Physic and Electrodynamics, Ithaca, NY: Academic Press, 2009.

- [21] D. McCarthy and G. Petit, "Models for atmospheric propagation delays," in *IERS Conventions*, 2013.
- [22] F. S. J. Crawford, *Waves; Berkeley Physics Course - Volume 3*, Berkeley: University of California, Berkeley, 1968.
- [23] N. Jakowski, C. Mayer, M. M. Hoque and V. Wilken, "Total electron content models and their use in ionosphere monitoring," vol. 46, 2011.
- [24] Y. Otsuka, T. Ogawa, A. Saito and et al., "A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan," *Earth Planets Space*, no. 54, pp. 63-70, 2002.
- [25] E. Sardon, A. Rius and N. Zarraoa, "Estimation of the transmitter and receiver differential biases," vol. 29, no. 3, 1994.
- [26] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling and B. P. Flannery, *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing (Third Edition)*, Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [27] X. Zhang, X. Ren, F. Wu and Q. Lu, "Short-term Prediction of Ionospheric TEC Based on ARIMA Model," *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, vol. 2, no. 1, pp. 9-16, 2019.
- [28] R. Tibshirani, *Introduction to Time Series: Fall 2023*, Berkeley: University of California Berkeley Library, 2023.
- [29] R. Kaiser and A. Maravall, "Notes on Time Series Analysis, ARIMA Models and Signal Extraction," *RePEc*, 2000.
- [30] R. Vankadara, S. Sasmal, A. Maurya and S. Panda, "An Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Based Forecasting of Ionospheric Total Electron Content at a low latitude Indian Location," in *2022 URSI Regional Conference on Radio Science (USRI-RCRS)*, Indore, India, 2022.
- [31] U. a. p. a. r. W. Group, C. Cesaroni, C. Marcocc, E. Pica and L. Spogli, "Electronic Space Weather upper atmosphere database (eSWua) - Total Electron Content (TEC) data, version 1.0.," Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Rome, 2020.
- [32] F. Constantin, E. Popescu, G. Chiritoi, F. Popescu, A. Nicolin-Zaczek, E. Nastase și A. Muntean, „Local Monitoring of TEC Using GNSS Services Over Romania," *Romanian Journal of Physics*, vol. 69, nr. 5-6, 2024.
- [33] O. J. Sovers and J. L. Fanselow, "Observation Model and Parameter Partial for the JPL VLBI Parameter Estimation Software "MASTERFIT"-1987," *JPL Publication*, 1987.
- [34] A. Saito, S. Fukao and S. Miyazaki, "High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS Network over Japan," *Geophysical Research Letters*, vol. 25, no. 16, pp. 3079-3082, 1998.
- [35] T. Sagiya, "A decade of GEONET: 1994-2003 The continuous GPS observation in Japan and its impact on earthquake studies," *Earth, planets and space*, vol. 56, no. 8, pp. 29-41, 2004.
- [36] M. Palomba and J. P. Luntama, "Vigil: ESA Space Weather Mission in L5," in *44th COSPAR Scientific Assembly*, 2022.
- [37] P. Mukhtarov, D. Pancheva, B. Andonov and L. Pashova, "Global TEC maps based on GNSS data: 1. Empirical background TEC model," vol. 118, no. 7, 2013.
- [38] W. Miyake and H. Jin., "Near-real time monitoring of TEC Over Japan at NICT (RWC Tokyo OF ISES)," *Advances in Geosciences*, vol. 21, pp. 143-153, 2010.

- [39] D. D. Mauro, M. D. Persio, S. Lepidi, F. Masci, G. Mele, A. Meloni and P. Palangio, "The INGV tectonomagnetic network in central Italy. Fifteen years of observations and future developments: an update," *Annals of Geophysics*, vol. 51, no. 1, pp. 137-146, 2008.
- [40] G. Ma and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan," *Annales Geophysicae*, vol. 21, no. 10, p. 2083-2093, 2003.
- [41] M. Kusaka, S. Miyazaki, K. Gotou and Y. Hatanaka, "GPS Earth Observation Network (GEONET) and its Application," *Journal of the Japan society of photogrammetry and remote sensing*, vol. 37, no. 2, pp. 45-40, 1998.
- [42] M. Kriegel and J. Berdemann, "Ionosphere Monitoring and Prediction Center," in *2020 European Navigation Conference (ENC)*, Dresden, 2020.
- [43] A. Krankowski, W. Kosek, L. W. Baran and W. Popinski, "Wavelet analysis and forecasting of VTEC obtained with GPS observations over European latitudes," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, pp. 1147-1156, 2005.
- [44] J. A. Klobuchar, "Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987.
- [45] P. B. Karlezi, K. Ruhl, A. Hilgers, A. Glover and D. Heyndrickx, "SWENET - ESA's portal for services and data on space weather effects," in *Proceedings of the 57th International Astronautical Congress (IAC 2006)*, Valencia, 2006.
- [46] N. Jakowski, S. Heise, A. Wehrenpfennig, S. Schlüter and R. Reimer, "GPS/GLONASS-based TEC measurements as a contributor for space weather forecast," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 64, no. 5-6, pp. 729-735, 2002.
- [47] International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and RTCM-SC104, "RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.03," 2015.
- [48] M. M. Hoque, N. Jakowski and R. Orús-Pérez, "Fast ionospheric correction using Galileo Az coefficients and the NTCM model," *GPS Solutions*, vol. 23, no. 2, 2019.
- [49] A. Farah, "Comparison of GPS/Galileo single frequency ionospheric models with vertical TEC maps," *Artificial satellites*, vol. 43, no. 2, pp. 75-90, 2008.
- [50] P. F. Bernath and e. al., "Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview," *Geophys. Res. Lett.*, no. 32, 2005.
- [51] U.S.A. Government, "National Oceanic and Atmospheric Administration," [Online]. Available: <https://www.noaa.gov/>. [Accessed 2024].
- [52] X. Ren, X. Zhang, X. W. and e. al., "Global Ionospheric Modelling using Multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS," *Scientific reports*, vol. 6, no. 1, 2006.
- [53] European Union Agency for the Space Program, Galileo Open Service Signal in Space Interface Control Document, European Union: European Union, 2021.
- [54] "Ionosphere Monitoring and Prediction Center," [Online]. Available: <https://impc.dlr.de/products/total-electron-content/near-real-time-tec/near-real-time-tec-map-europe>.
- [55] N. Balan, Y. Otsuka, T. Tsugawa, S. Miyazaki, T. Ogawa and K. Shiokawa, "Plasmaspheric electron content in the GPS ray paths over Japan under magnetically quiet conditions at high solar activity," *Earth, planets and space*, vol. 54, pp. 71-79, 2002.
- [56] G. Blewitt, "An automatic editing algorithm for GPS data," *Geophysical Research Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 199-202, 1990.
- [57] G. Bishop, A. Mazzella, E. Holland and S. Rao, "Algorithms that use the ionosphere to control GPS errors," in *Proceedings of Position, Location and Navigation Symposium-PLANS'96*, 1996.

- [58] G. J. Bishop, D. S. Coco, N. Lunt, C. Coker, A. J. Mazzella and L. Kersley, "Application of SCORE to extract protonospheric electron content from GPS/NNSS observations," in *Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1997)*, 1997.
- [59] M. Buonsanto, S. Gonzalez, X. Pi, J. Ruohoniemi, M. Sulzer, W. Swartz, J. Thayer and D. Yuan, "Radar chain study of the May, 1995 storm," *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, vol. 61, no. 3-4, pp. 233-248, 1999.
- [60] S. Fukao, T. Sato, T. Tsuda, S. Kato, K. Wakasugi and T. Makihiro, "The MU radar with an active phased array system: 1. Antenna and power amplifiers," *Radio Science*, vol. 20, no. 6, pp. 1155-1168, 1985.
- [61] C. Ho, A. Mannucci, U. Lindqwister, X. Pi and B. Tsurutani, "Global ionosphere perturbations monitored by the worldwide GPS network," *Geophysical Research Letters*, vol. 23, no. 22, pp. 3219-3222, 1996.
- [62] L. Kersley and J. Klobuchar, "Storm associated protonospheric depletion and recovery," *Planetary and Space Science*, vol. 28, no. 5, pp. 453-458, 1980.
- [63] E. Sardón and N. Zarraoa, "Estimation of total electron content using GPS data: How stable are the differential satellite and receiver instrumental biases?," *Radio science*, vol. 32, no. 5, pp. 1899-1910, 1997.
- [64] J. Ventura-Traveset and D. Flament, EGNOS: The European Geostationary Navigation Overlay System – A cornerstone of Galileo, Noordwijk: ESA Publications Division, 2006.
- [65] N. Jakowski, S. Stankov, D. Klaehn, C. Becker, J. Rueffer and C. Daub, "On the operational space weather service for GNSS precise positioning," in *European Space Weather Week (ESWW)*, Noordwijk, 2004.
- [66] D. Bilitza, "International Reference Ionosphere 2000," *Radio Science*, vol. 36, no. 2, 2001.
- [67] M. Pajares, J. Juan, J. Sanz, R. G.-R. A. Orús Pérez, J. Feltens, A. S. S. Komjathy and A. Krankowski, "The IGS VTEC maps: A reliable source of ionospheric information since 1998," *Journal of Geodesy*, vol. 83, pp. 263-275, 2008.
- [68] J. Dow, R. Neilan and R. Chris, "The international GNSS Service in a Changing Landscape of Global Navigation Satellite Systems," *Journal of Geodesy*, vol. 83, pp. 191-198, 2008.
- [69] R. Leitinger, M.-L. Zhang and S. Radicella, "An improved bottomside for the ionospheric electron density model NeQuick," *Annals of Geophysics*, vol. 48, 2009.
- [70] N. Jakowski, S. Stankov and K. D. , "Operational space weather service for GNSS precise positioning," *Annales Geophysicae*, vol. 23, pp. 3071-3079, 2005.
- [71] C. Mayer, "A new global TEC model for estimating transionospheric radio wave propagation errors," *Journal of Geodesy*, vol. 85, no. 12, 2011.
- [72] A. Mazzella, E. Holland, A. Andreassen and G. Bishop, "Autonomous estimation of plasmaphere content using GPS measurements," *Radio Science*, vol. 37, no. 6, 2002.
- [73] R. Bent, S. Llewellyn and P. Schmid, "Ionospheric refraction corrections in satellite tracking," *NTRS*, 1971.

