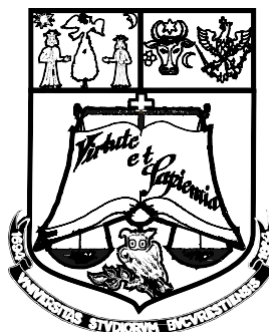


**UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
FACULTATEA DE GEOLOGIE ȘI GEOFIZICĂ
ȘCOALA DOCTORALĂ DE GEOLOGIE**



TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

**Studiu integrat, GNSS și seismotectonic al ariei
seismogene NV Galați**

**Coordonator,
Prof. Dr. VICTOR MOCANU**

**Student doctorand,
NĂSTASE ILIE EDUARD**

2021

**UNIVERSITATEA DIN BUCUREȘTI
FACULTATEA DE GEOLOGIE ȘI GEOFIZICĂ
ȘCOALA DOCTORALĂ DE GEOLOGIE**

**Studiu integrat, GNSS și seismotectonic al ariei
seismogene NV Galați**



**Coordonator,
Prof. Dr. Victor Mocanu**

**Student doctorand,
Năstase Ilie Eduard**

2021

Acronime și Abrevieri

BA Banat zone	GAMIT GNSS at MIT
BeiDou - COMPAS BeiDou Navigation Satellite System	GDOP Geometric dilution of precision
CDD Code Delay Discriminator	GEDI Global Ecosystem Dynamics Investigation
CEEX CERCetare de EXcelență	GEM Global Earthquake Model Strain Rate
CERGOP Central European Geodynamic Project	GGOS Global Geodetic Observing System
CGPS Continuous GPS stations	GIA Glacial Isostatic Adjustment
CHAMP Challenging Mini-Satellite Payload for Geophysical Research and application	GIPSY – OASIS GNSS Inferred Positioning System
CM Crișana – Maramureș zone	GIS Geographic Information System
CORS Continuously Operating Reference Stations	gLAB GNSS-Lab Tool from ESA
COSMIC Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate	GLASS Geodetic Linking Advanced Software System
DA Danubian zone	GLOBK Global Kalman filter
DART Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis	GLONASS GLObalnaya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
DD Double Difference	GMT Generic Mapping Tools
DEM Digital Elevation Model	GNSS Global Navigation Satellite System
DGNSS Differential GNSS	GNSS-IR GNSS Interferometric Reflectometry
DGPS Differential GPS	GNSS-R GNSS Reflectometry
DOP Dilution of Precision	GNSS-RO GNSS Radio Occultation
DORIS Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite	GOCE Gravity field and Ocean Current Explorer, ESA mission
DTM Military Topographic Directorate	GPS Global Positioning System
ECI Earth Centered Inertial	GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment
EGU European Geosciences Union	GRACE-FO GRACE Follow On
EPOS project (European Plate Observing System)	GRUAN Global Climate Observing System Reference Upper-Air Network
EUREF EUropean REference Frame	GSRM Global Strain Rate Map Project
EV the area in the front of the South-Eastern Carpathians Arc bend	IAG International Association of Geodesy
FC the Făgăraș Mountains zone which is prolonging across Carpathians	ICAO International Civil Aviation (Chicago Convention)
FD Fault Detection	ICESat Ice, Cloud, and land Elevation Satellite
FFRDC Federally Funded Reasearch and Development Center	ICGFC in the past IGFCOT Institute of Geodesy, Cadastre, Photogrammetry and Cartography
FGG Faculty of Geology and Geophysics - University of Bucharest	IDS International DORIS Service
	IERS International Earth Rotation and Reference Systems Service
	IGS International GNSS Service
	ILRS International Laser Ranging Service
	InSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar

Studiu integrat, GNSS și seismotectonic al ariei seismogene NV Galați

Universitatea din București, Facultatea de Geologie și Geofizică – 2021

Năstase Ilie Eduard

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change	PLL Phase Lock Loop
IRNSS (later renamed NavIC) and Japan's Quasi-Zenith Satellite System or QZSS	Pol-InSAR Polarimetric SAR Interferometry
ISES Integrated Research in Solid Earth Sciences	PPP Precise Point Positioning
ITRF International Terrestrial Reference Frame	PRN Pseudo Random Code
IVS International VLBI Service for Geodesy and Astrometry	PSD Post-Seismic Deformation
JPL Jet Propulsion Laboratory	QC Quality Control
LEO Low Earth Orbiter	RAIM Receiver Autonomous Integrity Monitoring
LOS line-of-sight	RINEX Receiver INdependent EXchange Format
M Magnitude	RMS Root-Mean-Square
MAA Romanian Ministry of Agriculture	ROTI GPS-based Rate of TEC Index
MAD Median Absolute Deviation	RSMN Romanian Strong-Motion Network
MELD Median Estimation of Local Deformation	RTCM Radio Technical Commission for Maritime Services
MEOSAR Medium-Earth Orbit Satellites	RTK Real Time Kinematic
MHz Megahertz	SAR Synthetic Aperture Radar
MIDAS Median Interannual Difference Adjusted for Skewness	SARPS Standards And Recommended Practices
MO Moesian Platform	SATM Science and Applications Traceability Matrix
MORVEL Mid-Ocean Ridge VELOCITY	SGSLR Space Geodesy Satellite Laser Ranging
MSF Median Spatial Filtering	SINEX Solution Independent Exchange Format
NASA National Aeronautics and Space Administration	SLR Satellite Laser Ranging
NAVSTAR-GPS NAVigation Satellites with Time And Ranging – Global	SMAP Soil Moisture Active Passive
NGA National Geospatial-Intelligence Agency	SNR Signal-to-Noise Ratio
NGS National Geodetic Survey	SOPAC Scripps Orbit and Permanent Array Center
NIEP National Institute for Earth Physics	SSF Spatial Structure Function
NISAR NASA-Indian Space Research Organization Synthetic Aperture Radar	SSM/I Special Sensor Microwave Imager
NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration	SVN Satellite Vehicle Number
NRMS normalized	SWOT Surface Water Ocean Topography
NSF National Science Foundation	TDX TanDEM-X
NSRS National Spatial Reference System	TEC ionospheric total electron
OASIS Orbit Analysis and Simulation Software	TOPEX Topography Experiment
PBO Plate Boundary Observatory	TRF Terrestrial Reference Frame
PD-BD Pre-Dobrogean and Barlad Depression zones	USGS U.S. Geological Survey
PDOP Position dilution of precision	USNO U.S. Naval Observatory
	UTC Universal Time Coordinated
	VADASE Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-alone Engine
	VGOS VLBI Global Observing System
	VLBI Very Long Baseline Interferometry

CUPRINS

INTRODUCERE	5
CAPITOLUL 1	6
TEHNOLOGIA GNSS ȘI GEODEZIA SPAȚIALĂ CA METODĂ DE DETERMINARE A PARAMETRILOR DE DEFORMARE ȘI MODELARE A MIȘCĂRILOR CRUSTALE	
1.1 DETALIILE FUNDAMENTALE ALE TEHNOLOGIEI GNSS	6
1.2 GEODEZIA SPAȚIALĂ	7
1.3 ROTAȚIA CORPULUI RIGID	7
1.4 SISTEME DE REFERINȚĂ	8
CAPITOLUL 2	9
ANALIZA PROCESULUI DE DEFORMARE A CRUSTEI	
2.1 DEFORMĂRILE CRUSTALE	9
2.2 HAZARDURILE GEOLOGICE: CUTREMURELE	9
CAPITOLUL 3	10
SEISMOTECTONICA ROMÂNIEI	
3.1 MODELAREA GEODINAMICĂ: FLUXUL DIN MANTAUĂ SUPERIOARĂ ÎN ROMÂNIA ÎN CADRUL REGIONAL (BALCANIC)	11
CAPITOLUL 4	13
2013 – UN ROI DE CUTREMURE CRUSTALE ÎN ZONA NV GALAȚI	
4.1 CONTEXTUL TECTONIC NV GALAȚI	14
4.2 SEISMICITATEA ÎN ZONA DE STUDIU	14
4.3 2013 – UN ROI DE CUTREMURE CRUSTALE ÎN ZONA NV GALAȚI	14
CAPITOLUL 5	16
POSSIBIL IMPACT ASUPRA SEISMICITĂȚII ZONEI DE STUDIU PRIN ACTIVITĂȚI ANTROPICE ȘI ALTE FENOMENE/HAZARDURI NATURALE	
5.1 SEISMICITATEA INDUSĂ	17
5.2 ACTIVITATEA SEISMICĂ DECLANȘATA DE PRECIPITAȚII ABUNDENTE	18

CAPITOLUL 6 **18**

GEODEZIA SATELITARĂ ÎN ZONA NV GALAȚI

6.1 REȚELE GNSS PERMANENTE DE REFERINȚĂ ÎN ROMÂNIA	19
6.2 STAȚII GPS DE CAMPANIE ÎN ZONA DE STUDIU	20
6.3 ACHIZIȚIA DE DATE GNSS/GPS ȘI ANALIZA CANTITATIVĂ ȘI CALITATIVĂ	21

CAPITOLUL 7 **21**

PROCESAREA DATELOR

7.1 PROGRAMELE GIPSY OASIS, MIDAS ȘI GAMIT	21
7.2 METODE PPP ȘI DD DE PRELUCRARE A DATELOR GNSS	21
7.3 ANALIZA VITEZELOR DE DEFORMARE VERTICALĂ UTILIZÂND MATLAB ȘI GPS IMAGING	22
7.4 ANALIZA VITEZELOR DE DEFORMARE ORIZONTALE ȘI A RATELOR TENSIUNILOR TECTONICE UTILIZÂND MELD	24

CAPITOLUL 8 **25**

STUDIU INTEGRAT, ANALIZA MULTIDISCIPLINARĂ ȘI MULTISENZOR

8.1 SENZORI COLOCAȚI	25
8.2 FILTRAREA DATELOR	26
8.3 DATE GNSS DE FRECVENȚĂ MARE	27
8.4 ANALIZA SEMNALULUI, ÎNTÂRZIERILOR ȘI A PERTURBAȚIILOR IONOSFERICE	28

CAPITOLUL 9 **28**

CONTRIBUȚII PERSONALE

9.1 CONCLUZII	29
---------------	----

MULȚUMIRI **33**

BIBLIOGRAFIE SELECTATĂ **34**

ANEXE

Introducere

În septembrie 2013 a avut loc un roi seismic în zona NV Galați, în România. Au fost efectuate investigații geofizice în zona epicentrală și în regiunile din apropiere, la scurt timp după începerea deosebitului eveniment seismic. Episodul roiului a inclus sute de cutremure cu magnitudini cuprinse între 0,1 și 4,0, în general asociate cu sistemul cunoscut de falii active, din zona de studiu. Anterior episodului de tip roi, activitatea seismică era prea slabă pentru a putea fi înregistrată de rețeaua de monitorizare existentă la nivel național. Numărul mare de evenimente crustale de mică adâncime (adâncimi mai mici de 10 km) s-a petrecut pe o perioadă scurtă de timp într-o zonă cu seismicitate scăzută și dispersată, dar în vecinătatea unei zone populate, ceea ce a creat îngrijorare și a atras atenția sporită a mass-mediei.

Au trecut 6 ani de când s-au înființat diferite rețele de stații GNSS de referință și de campanie în zona NV Galați. În ultimul deceniu, s-au dezvoltat noi instrumente pentru a îmbunătăți observațiile și analiza cutremurelor, a activității tectonice și a hazardul seismic în regiunile cu deformare litosferică lentă, precum aceasta. Îmbunătățirile în poziționarea precisă a punctelor (PPP), detecția defazajelor de timp, “cycle-slip” și alte întreruperi pe toate constelațiile, frecvențele și semnalele GNSS, raportul semnal-zgomot al fazei purtătoare, metodele de filtrare, ne-au determinat să obținem îmbunătățiri și mai fiabile, noi soluții din combinația omogenă a tuturor rețelelor. Teza prezintă o analiză a tuturor datelor RINEX disponibile procesate cu ajutorul software-ului GIPSY, cu viteze 3D derivate de algoritmul „MIDAS” (Median Interannual Difference Adjusted for Skewness). Am analizat mișcarea plăcilor și a ratelor de deformare derivate din algoritmul „MELD” (Median Estimation of Local Deformation), care funcționează deosebit de bine în cazul analizei semnalului vitezei de deformare din serii de timp de lungă durată în zonele cu deformare scăzută. De asemenea, am analizat mișcarea verticală a terenului, derivată prin tehnica GPS Imaging, care folosește un filtru spațial median. O varietate de studii geofizice este disponibilă datorită unei analize combinate de Double Difference și PPP, arătând două zone distincte, aferente faliei Sf. Gheorghe. O zonă este legată de blocul tectonic de nord-est și prezintă o mișcare de ridicare; cealaltă este legată de blocul tectonic de sud-vest, unde toate vitezele au avut un trend negativ.

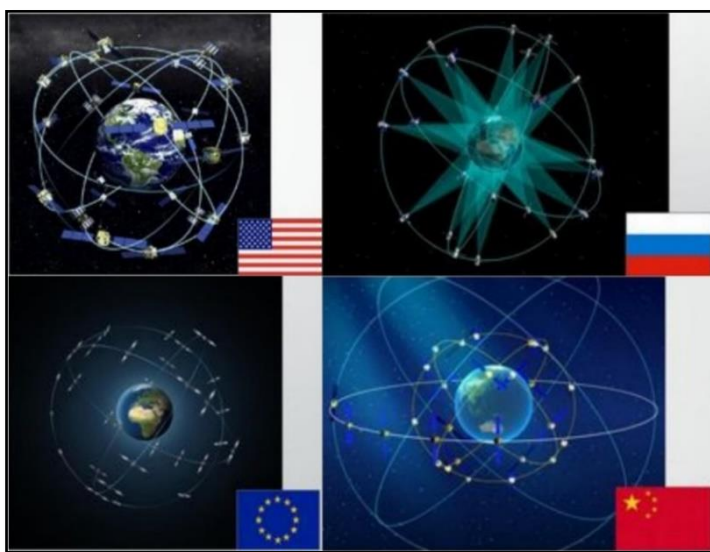
Capitolul 1

Tehnologia GNSS și geodezia spațială ca metodă de determinare a parametrilor de deformare și modelare a mișcărilor crustale

Pentru cei mai mulți dintre noi, Global Navigation Satellite System, cunoscut sub numele de GNSS, un sistem de navigație prin satelit, înseamnă un sistem folosit pentru a identifica locațiile geografice pentru o varietate de utilizatori de pe Pământ. Începând ca o strategie de apărare pentru US Air Force, tehnologia Global Positioning System (GPS) a evoluat dintr-un sistem de apărare restricționat la a fi la dispoziția tuturor. În zilele noastre, această tehnologie este și mai accesibilă datorită apariției smartphone-urilor și cu posibilitatea de a integra de-a lungul timpului și alte sisteme GNSS. Alte două sisteme globale, operaționale, de navigație sunt GLONASS al Rusiei și Galileo al Uniunii Europene. Galileo ar fi pe deplin operațional până la sfârșitul anului 2020, urmat de sisteme regionale și naționale care au fost și sunt încă dezvoltate, cum ar fi BeiDou din China, Sistemul regional de navigație prin satelit din India sau IRNSS (redenumit ulterior NaviC) și Sistemul de navigație prin satelit Quasi-Zenith din Japonia, QZSS. China este în proces de extindere a BeiDou în sistemul global BeiDou-2 GNSS până în 2020. Detalii suplimentare în Anexa 1, Tabelul TA1.1.

Deși sateliții GNSS variază ca an de fabricație și design, modelul lor principal de funcționare rămâne același. Pentru a transmite informații de la satelit pe Pământ, în Banda L sunt transmise două unde purtătoare, denumite L1 și L2. Receptoarele GNSS sunt compuse din două părți importante, o antenă care primește semnale prin satelit și o unitate de procesare. Pentru a determina poziția receptorului, informațiile trebuie colectate de la cel puțin trei sateliți. O trecere completă a unui satelit GNSS care orbitează Pământul la o altitudine de orbită medie se face în 11 ore, 58 de minute și 2 secunde. Semnalele codificate transmise conțin detalii precise ale poziției

satelitului și un marcaj temporal foarte stabil provenit de la un ceas atomic. Pentru ca receptorii să poată determina în mod continuu ora, această informație este codificată de satelitul care difuzează semnalul. Folosind diferența de timp dintre timpul de recepție a semnalului și timpul de difuzare, receptorul calculează: distanța sau raza de la receptor la satelit; locația satelitului și astfel se ajustează continuu pentru o poziționare precisă. Rezultatele finale în ceea ce privește latitudinea, longitudinea și înălțimea sunt obținute prin traducerea poziției precise a receptorului față de fiecare satelit într-un sistem de coordonate de pe Pământ.



Sursa: <https://www.geospacialworld.net/>

Figura 1.1: Constelațiile GNSS

1.1 Detaliile fundamentale ale tehnologiei GNSS

Rețeaua International GNSS Service (IGS) este compusă din aproximativ 500 de stații distribuite la nivel global, operate de peste 200 de agenții, instituții de cercetare și universități autofinanțate de pe tot globul, cuprinzând peste 100 de țări (vezi **Anexa 1, Figura A1.1**). Sediul IGS este situat la JPL (Jet Propulsion Laboratory). JPL operează 51 de stații din rețeaua GNSS. Un lucru foarte important și util pentru toți utilizatorii, IGS calculează și pune la dispoziție informațiile despre orbită și ceas în mod gratuit. Toate informațiile despre orbită de la IGS sunt disponibile cu o întârziere foarte scurtă, de 17 ore. În ceea ce privește post-analiza, orbitele sunt disponibile după 13 zile, incluzând intervalele de timp și parametrii de orientare ai Pământului precum mișcarea de rotație. Există peste 500 de stații GNSS în rețeaua IGS și peste 15000 de utilizatori obișnuiți interesați de informații geodezice de înaltă calitate, cum ar fi mișloacele de transport aerian, măsurători topografice de precizie etc. În plus, IGS oferă gratuit informații

esențiale în procesarea avansată a datelor geodezice, cum ar fi întârzierile troposferice, variațiile ionosferice, atât ca date, cât și ca hărți.

Galileo – Uniunea Europeană (Figura 1.2). Acest program a fost conceput de Agenția Spațială Europeană (ESA). Franța, Germania și Italia sunt țările lider. Datorită abordării complexe și a avantajelor preconizate, proiectului Galileo i s-au alăturat și alte țări avansate tehnologic (Elveția și Norvegia), urmate în curând de țări non-UE precum Ucraina și chiar țări non-europene, precum Israel și Maroc. Inițial, PR China își confirmă interesul față de proiect, dar în curând decide să continue cu BeiDou, programul complet chinezesc. Acest program a fost conceput în așa fel încât aplicațiile civile au fost considerate, spre deosebire de GPS, GLONASS, sau BeiDou, de uz militar (cel puțin la începutul dezvoltării lor). Programul Galileo este considerat o versiune mai bună decât cele anterioare, cu acces gratuit pentru obținerea unei precizii de un metru și cu acces plătit pentru o precizie la nivel de centimetru. Cu toate acestea, în caz de forță majoră, sistemul ar fi doar de uz militar. Programul a fost afectat de probleme de finanțare, precum și de divergențe cu SUA pe probleme de securitate, însă acestea au fost depășite și acum 12 sateliți din totalul de 30 de sunt în prezent complet funcționali pe orbită completă. Se prevede ca starea operațională completă să fie atinsă până în 2020.

O caracteristică ce face Galileo unic în comparație cu sistemul actual Cospas Sarsat este faptul că este conceput pentru a oferi o nouă funcție globală de căutare și salvare (SAR) ca parte a sistemului MEOSAR. Nu numai că va retransmite semnalele de primejdie de la balizele de urgență către centrul de coordonare de salvare, dar va oferi și o legătură de întoarcere către emițător pentru a confirma primirea semnalului SOS și va iniția operațiunile de salvare.

Sursa: <https://www.esa.int/>

Performanța GNSS poate fi măsurată în mai multe moduri: *acuratețe, disponibilitate, integritate și continuitate*. În timp ce acuratețea este cea mai evidentă calitate a unui sistem de navigație, alte măsuri, cum ar fi disponibilitatea sistemului, integritatea datelor și continuitatea serviciului, sunt de asemenea importante.

Sursa: <https://www.esa.int/>

1.2 Geodezia Spațială

Geodezia este știința ce calculează atât dimensiunea, cât și forma planetei noastre. În plus, se referă și la analiza de calcul și de distribuție a câmpului gravitațional al globului. De asemenea, este asociată cu astronomia geodezică care este orientată spre definirea, modelarea și calcularea cadrelor de referință de tip terestru (și ceresc). Implică diverse metode de observare a spațiului. Această știință a început să se dezvolte odată cu inițierea erei spațiale pe 4 octombrie 1957, când URSS a lansat primul satelit artificial din istorie, și anume Sputnik I, primul instrument fabricat de om care a orbitat globul terestru. Viteza sa a fost impresionantă pentru acea perioadă, fiind vorba despre 98 de minute pentru a face o rotație completă. Greutatea sa a fost de 83,5 kg. Acesta a fost începutul erei spațiale și, de asemenea, o competiție spațială extraordinară între SUA și fosta URSS. 1957 a fost Anul Geofizic Internațional, un reper pentru studiile geofizice moderne la scară globală. Desfășurarea și utilizarea sateliților artificiali a devenit parte din normalitate, în prezent, chiar și sectorul privat putând lansa mii de sateliți. Dintre cei 3372 de sateliți artificiali care orbitează Pământul la 1 ianuarie 2021, mulți sunt privați, iar compania SpaceX a lui Elon Musk intenționează să pună pe orbită până la 42000 de sateliți în următoarele două decenii. Mulți dintre aceștia sunt și vor fi folosiți pentru a studia în detaliu dimensiunea și forma planetei noastre, precum și pentru a monitoriza diverse obiecte și fenomene ale Pământului. Pentru toate aplicațiile geodezice, este nevoie de un sistem de referință foarte precis și astfel a apărut VLBI (Very Long Baseline Interferometry) ca o a doua tehnică esențială care s-a dezvoltat încă din 1997, când a fost lansat HALCA, primul telescop dedicat. Scopul final este stabilirea unui sistem de referință de top precis și foarte stabil de tip

inerțial, luat în considerare pentru a monitoriza rotația globului cu ajutorul quasarelor (un sistem mai precis și cadru de referință cu caracter extragalactic). Sursa: (www.ngs.noaa.gov)

1.3 Rotația corpului rigid

Vitezele unghiulare pentru continentul Eurasiatic sunt enumerate în **tabelul 1.1**, se pot vedea vitezele unghiulare pentru Eurasia, inclusiv viteza de rotație și valoarea luată în considerare pentru unghiul Euler de rotație.

EULER POLE (Grade)		RATA DE ROTAȚIE (Grade / Mil de ani)
LAT N	LON E	
61.38	-78.85	0.927

Tabelul 1.1 Viteza de rotație și polul Euler pentru Eurasia. Sursă: **Kreemer et al. 2014**

Câteva detalii suplimentare sunt prezentate în **Anexa 3, Tabelul TA1.2**, inclusiv viteza unghiulară raportată plăcii tectonice stabile din Pacific, pentru viteza de rotație și poziția polului de rotație Euler. Modelul publicat în 2014 de **Kreemer et al.** include toate pozițiile pentru polii de rotație Euler și ratele de rotație asociate cu 50 de plăci tectonice. Trebuie să menționăm că vitezele unghiulare pentru 36 de plăci tectonice au fost estimate pornind de la vitezele GPS publicate de GEM Strain Rates. Alte rezultate pentru șase plăci tectonice au fost publicate de **Bird et al., 2003**, 2003 pentru proiectul PB2002 și de către **DeMets et al., 2010** pentru proiectul MORVEL. Toate au fost raportate la cea mai mare placă de referință, placa pacifică.

1.4 Sisteme de referință

Un sistem de referință terestru este un sistem de referință spațial atașat Pământului în rotație și include specificarea originii sale (de obicei în centrul de masă al Pământului), direcțiile sale principale (conectate cu ecuatorul sau cu axele de rotație și cu meridianul principal) și o scară de lungime. Un cadru de referință terestru reprezintă realizarea sistemului de referință terestru printr-un set de coordonate și viteze ale unor puncte de referință stabile de pe suprafața Pământului, ale căror poziții sunt calculate cu acuratețe în funcție de timp. Astfel de puncte de referință sunt locațiile stațiilor de urmărire GNSS, SLR, Very Long Baseline Interferometry (VLBI) și Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS). Utilizarea datelor de urmărire prin satelit din aceste locații are ca rezultat pozițiile orbitei satelitului care sunt exprimate în acea realizare particulară a cadrului de referință terestru.

Adoptarea și utilizarea sistemelor și cadrelor de referință terestre comune permit corelarea diferitelor măsurători geodezice în spațiu și timp (vezi **Figura 1.4**). Punctele de referință utilizate pentru realizarea cadrului de referință terestru sunt selectate astfel încât să aibă mișcări constante și previzibile pe suprafața Pământului la intervale de timp care variază de la luni la decenii. În consecință, cadrul în sine evoluează lent și previzibil și astfel poate fi folosit mai mulți ani fără o actualizare majoră. Calitatea poziționării în cadrul de referință terestru este descrisă în termeni de precizie, acuratețe, stabilitate și decalaj (vezi **Caseta 1.1**). Acuratețea cadrului de referință terestru poate fi specificată – prin cuantificarea incertitudinii sau prin compararea a două realizări de cadre de referință – folosind șapte parametri și variațiile lor în timp. Acești parametri sunt originea (trei translații), orientarea (trei unghiuri de rotație) și scara (scalar). Cerințele științifice privind acuratețea sau stabilitatea mai multor dintre acești parametri ai cadrului de referință determină nevoile viitoare pentru infrastructura geodezică.” (Sursa: **Evolving the Geodetic Infrastructure to Meet New Scientific Needs, 2020**) & <http://itrf.ensg.ign.fr/>

Capitolul 2

Analiza procesului de deformare a crustei

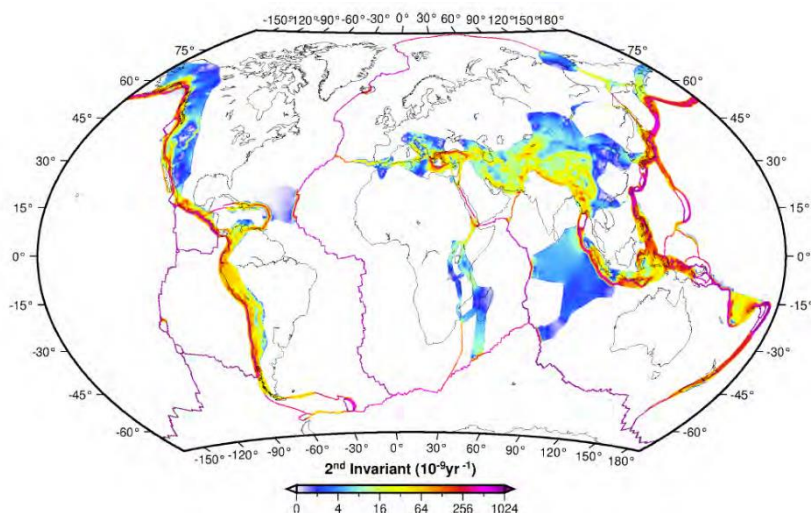
Scopul proiectului GEM Strain Rate a fost să analizeze și să sintetizeze toate datele geodezice disponibile pentru a crea un set global de date de viteze geodezice care pot fi utilizate pentru a modela mișcările plăcilor și ratele de deformare în zonele de contact ale plăcilor. Până la finalul său, au fost estimate 6.533 de viteze din serii temporale de poziții care au fost derivate din analiza datelor RINEX care erau fie disponibile gratuit, fie puse la dispoziție special pentru acest proiect. Toate aceste viteze, cu excepția a 15, au fost utilizate în modelare. În cele din urmă, au fost adăugate 13.318 viteze din 216 studii din literatura publicată pentru a obține un total final de 20.979 viteze la 17.491 de locații unice utilizate în modelare. Dintre toate vitezele, 16.325 sunt în zonele de graniță ale plăcilor (așa cum sunt definite de autori), iar celelalte 4.654 de viteze sunt pentru puncte pe plăci sau blocuri tectonice rigide, predefinite. A fost creată un grid global care are 144.827 de celule deformante cu dimensiunea de $0,2^\circ$ (latitudinală) pe $0,25^\circ$ (longitudinală) care acoperă zonele de delimitare a plăcilor, cu celulele rămase acoperind 50 de plăci și blocuri rigide. Pentru 36 dintre aceste plăci, au fost estimate rotația corpului rigid din setul nostru de date, iar rotațiile plăcilor rămase sunt preluate din literatură. Rotațiile corpului rigid sunt utilizate drept condiții de margine în calculele vitezei de deformare. Câmpul vitezei de deformare (**Figura 2.1**) este modelat

utilizând metoda Haines și Holt, care utilizează funcții polinomiale pentru a obține un câmp tensor de gradient de viteză interpolat, din care sunt derivate ratele de deformare, ratele de vorticitate și vitezele prezizibile.

Figure 2.1 – Contururile celui de-al doilea invariant al tensorului tensiunii tectonice.

Imagine preluată din **Kreemer et al. 2014**.

Au fost, de asemenea, estimate incertitudinile modelului, specifice acestei rețele de înaltă rezoluție, ceea ce indică faptul că



există încă multe zone cu incertitudini mari ale tensiunilor de deformare în care distanța dintre punctele de date este adesea mult mai mare decât dimensiunile celulei. Cu toate acestea, modelul și datele introduse reprezintă o îmbunătățire imensă față de modelul anterior al ratei de deformare globală din 2004. Toate rezultatele sunt transferate în GEM și sunt, de asemenea, arhivate și afișate de un server dedicat, găzduit de UNAVCO (gsrm2.unavco.org), unul dintre partenerii proiectului. În plus, a fost creat un layer în format kmz de contururi al celui de-al doilea invariant al ratelor de deformare a modelului și un instrument online care ar permite unui utilizator să-și încarce propriile viteze și să le traseze cu vitezele din setul de date GEM în 53 de cadre de referință diferite. (**Kreemer et al. 2014**)

2.1 Deformările crustale

Cele mai multe dintre vitezele geodezice derivate din măsurătorile de campanie pot fi găsite publicate în literatură. În cazurile pe care le-am ales să le includ în teză, publicațiile raportează rate de viteză pentru stațiile CGPS, aceste date nu sunt disponibile publicului. Câteva publicații precum „**Bettinelli et al., 2006; Saria et al., 2013; Shen și colab., 2011; Shen și colab., 2011; Weber et al., 2011**” documentează viteze derivate din DORIS, VLBI sau trilateration (tehnică non-GPS). Toate cele 210 publicații din care au fost utilizate date în **Kreemer et al. 2014**, sunt enumerate. Pentru mai multe studii, informații despre coordonatele stației sau vitezele din locațiile IGS din apropiere au fost furnizate informații suplimentare de către cercetători. Dacă vrem să comparăm, modelul anterior creat include date din 86 de studii. Pentru prima dată, (**Gagnon et al., 2005**; folosit prin compilarea **Chlieh et al., 2011**), Japonia (**Tadokoro et al., 2012; Sato et al., 2013**) și o câteva estimări de viteză de la markeri submarini, off-shore (în larg) Peru, au fost incluse.

Atenția mai multor studii s-a concentrat exclusiv pe zonele dintre plăci care au fost incluse în sinteză, deși nu au fost rezolvate valorile tensiunilor existente în aceste zone. Aceste studii ar putea fi considerate utile în viitor pentru a modela ratele de deformare în interiorul plăcii. Ar putea fi astfel benefic să le includă în compilarea vitezei ca atare. Aici, au fost luate în considerare diferite studii care, de exemplu, pun constrângeri fie asupra ratelor de deformare influențate de GIA (*Mazzotti et al., 2005; Lidberg et al., 2010; Kierulf et al., 2013*), fie asupra unei zone dintre plăci cunoscute active din punct de vedere seismic, zonă, cum ar fi Munții Carpați (*van der Hoeven et al., 2005*).

În situații particulare, cum ar fi în sud-estul zonei Alaska, unde ratele de deformare datorate GIA interferă cu ratele de deformare tectonice, autorii au inclus vitezele GPS corectate din GIA în studiile lor originale (*Elliott et al., 2010, 2013*).

Discuții:

- Motivul principal pentru care unele zone cu o acoperire mare de date, cum ar fi Europa de Vest sau Statele Unite ale Americii Centrale și de Est, nu sunt în prezent modelate este că se așteaptă ca ratele de deformare să fie la sau sub incertitudinea datelor privind viteza GPS. Mai mult, adăugarea acelor regiuni la zona pentru care ratele de deformare sunt modelate în prezent ar adăuga o sarcină de calcul semnificativă.
- Există încă multe falii seismogenice importante, cu atât mai puțin zone cu falii necunoscute cu acoperire GPS insuficientă în jur. Este posibil ca această situație să nu se schimbe pentru o lungă perioadă de timp, totuși cunoașterea ratei de acumulare a deformării pentru aceste falii este esențială pentru a evalua rata de activitate a acestora. O posibilă soluție pentru îmbunătățirea rezoluției spațiale este utilizarea InSAR în zonele cu acoperire GPS limitată.
- Pentru a ajuta la îmbunătățirea rezoluției și a utilității hărților InSAR pentru tensiunile de deformare au folosit cele mai recente evoluții GPS (de exemplu, *Wei et al., 2010, Tong et al., 2013*), cu toate acestea, aceste îmbunătățiri conduc doar la imagini ale deformărilor, în direcția liniei de vedere (LOS) a satelitului. Problema principală constă în 1) ambiguitatea în vectorul viteză 3D care poate explica viteza LOS și 2) faptul că LOS este insensibil la viteze de-a lungul direcției traiectoriei satelitului. Prin urmare, InSAR singur nu poate recupera niciodată câmpul tensor al gradientului de viteză necesar pentru a determina rata de deformare. Cu toate acestea, câmpurile ratei de deformare dintr-o combinație de date GPS și InSAR au fost evidențiate în publicații recente (*Wang et al., 2012*).

Capitolul 3

Seismotectonica României

Informațiile despre mecanismul producerii unui cutremur sunt fundamentale pentru a determina câmpul de stres și pentru a defini zonele seismogenice și, în același timp, o informație de bază pentru calcularea hazardului seismic prin abordare deterministă. Acest capitol extinde catalogul soluțiilor planului de falie pentru cutremurele din România, finalizate anterior până în 1997, pentru anul 1998 până în prezent. Catalogul se limitează geografic la Orogeneza Carpaților și la zona extracarpatică situată în partea de sud-est a României deoarece investigații similare acoperă restul țării. Catalogul cuprinde 259 de evenimente seismice de adâncime intermediară și 90 de evenimente seismice crustale, înregistrate în intervalul de timp luat în considerare cu soluții de plan de falie constrânse în erori acceptabile (minimum 10 polarități de încredere, raport mic al polarităților respinse față de polaritățile inițiale și adâncimea focală diferită de zero). Soluțiile planului de falie ale cutremurelor din Vrancea generate într-o placă de scufundare închisă în manta reflectă procesul geodinamic dominant în regiunea de studiu. Investigațiile noastre reproduc, de asemenea, trăsăturile tipice relevate de toate studiile anterioare asupra activității seismice subcrustale (alunecare predominantă, falie inversă, care caracterizează atât cutremurele slabe, cât și cele puternice). În ceea ce privește activitatea cutremurului crustal, câteva aspecte noi rafinate sunt evidențiate în lucrări mai recente: (1) un deficit al componentei de alunecare pe întreaga zonă de avanfosă a Carpaților, (2) un model diferit de câmp de stres în zona Făgăraș – Câmpulung, în comparație cu Platforma Moesiană și Depresiunile Predobrogeană și Bârlad, (3) o gamă mai mare pentru unghiul

de scufundare al planurilor nodale în sursa subcrustală Vrancea, ~ 40° -70° față de ~ 70°, așa cum se consideră de obicei. (Radulian et al.,2018)

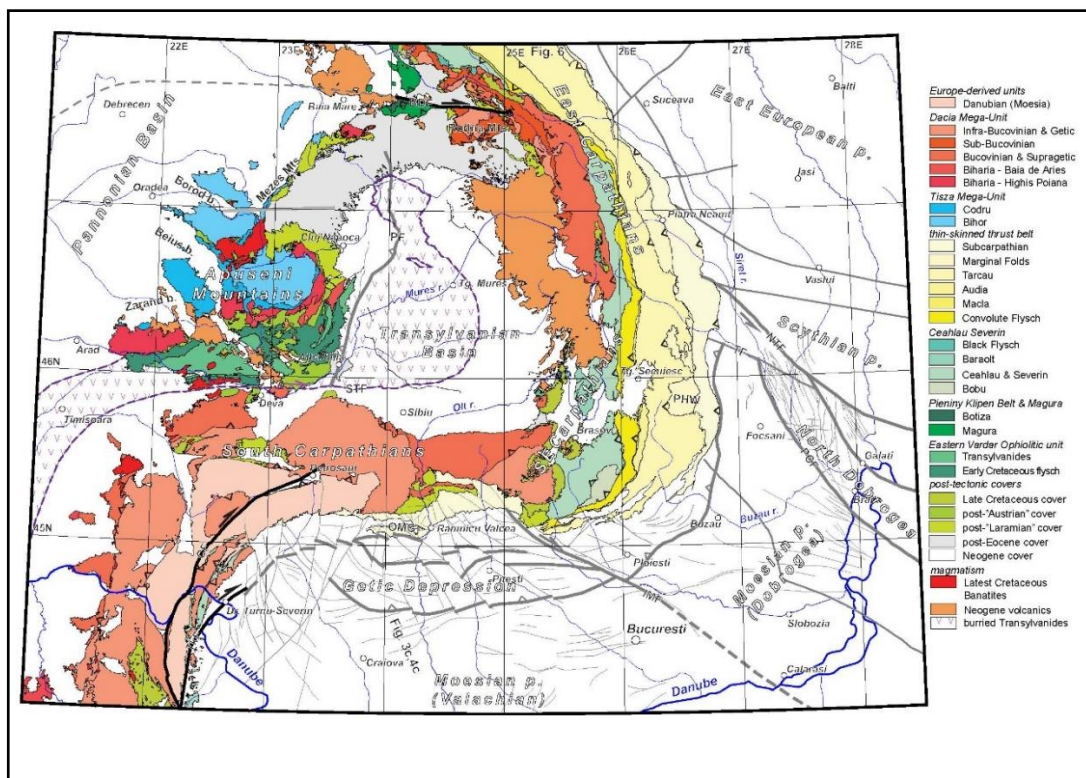


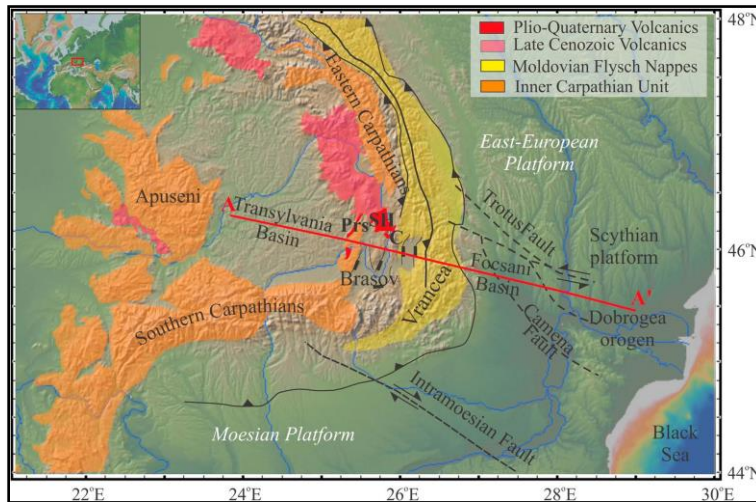
Figura 3.1 – Harta unităților tectonice din România (Săndulescu, 1984).

Tr.D = Depresiunea Transilvaniei, Bar.D = Depresiunea Bârlad, IM.F = Falia intramoesiană, Vr&BF = Zona crustală Vrancea și bazinul Focșani, PrD.D = Depresiunea predobrogeană și promontoriul Dobrogean de Nord, DZ&TgJ = Zona Dunării și Vestul Olteniei, Sh = zona Shabla, Fa = zona Făgăraș-Câmpulung-Sinaia, Ban = zona Banat, Cr&Mar = zona Crișana și Maramureș. Sursa: Radulian et al.,2018..

Seismicitatea din România are ca punct focal curbura Arcului Carpaților, și anume regiunea Vrancea. Aici, o placă litosferică izolată care coboară în manta eliberează permanent energie seismică într-un volum extrem de îngust. În medie, trei cutremure cu magnitudinea peste 7 au fost raportate în fiecare secol pe o perioadă de șase secole. Originea seismicității de adâncime medie în zona Vrancea este încă discutabilă. Volumul litosferic activ seismic poate fi aproximat printr-o prismă orientată vertical între 60 și 170 km adâncime, cu o secțiune transversală orizontală de 30 x 70 km². Peste 60 km și sub 170 km, seismicitatea este brusc întreruptă, deși corpul de mare viteză, determinat de tomografia seismică, se extinde considerabil dincolo de aceste limite (Martin et al., 2006, Ren et al., 2012). Activitatea seismică din scoarță este dispersată pe orogeneza și promontoriul Carpaților cu îmbunătățiri semnificative în mai multe zone seismogenice, așa cum sunt definite mai întâi de (Radulian et al., 2000): EV – zona din fața curburii arcului Carpaților de Sud-Est., FC – zona Munților Făgăraș care se prelungește peste Carpați spre orașul Câmpulung, zone PD-BD - Depresiunea Predobrogeană și Bârlad, care aparțin aceleiași unități tectonice (Platforma Scitică), BA – zona Banat, DA – zona Dunării și CM – zona Crișana-Maramureș. Cutremurele crustale sunt de obicei mici până la moderate ($M_w < 6$). Doar în zona FC au fost raportate în catalogul românesc câteva șocuri de magnitudine peste 6 ($M_{max} = 6,5$), într-un interval de timp de aproximativ un mileniu (Oncescu et al., 1999). Seismicitatea crustei este în general asociată cu sistemele de falii ale fundamentului (Bala et al., 2015). În Figura 3.2 ne concentrăm atenția asupra zonelor seismogenice situate în partea de sud-est a României. Poziționarea celorlalte zone seismice este reprezentată în Figura 3.2 după (Radulian et al., 2000).

3.1 Modelare Geodinamică: Fluxul din Mantaua Superioară în România în cadru regional (balcanic)

Un set mare de observații geologice și geofizice din regiunea Carpaților de Sud-Est care se află la joncțiunea lanțurilor muntoase ale Carpaților Orientali și Meridionali (Carpații de Sud-Est) și adiacentă bazinelor Transilvaniei și Focșani (**Figura 3.3**) este folosit pentru a deduce că tasarea și ridicarea activă a suprafeței se dezvoltă în principal prin dinamica la nivelul mantalei ca urmare a coliziunii plăcilor din ultimii 10 milioane de ani (de exemplu, **Burchfiel, 1980; Cloetingh et al., 2004; Gvirtzman, 2002; Matenco et al., 2007; Molin et al., 2012; Sandulescu, 1988; Schmid et al., 2008**). Cu alte cuvinte, formarea bazinului de avanfosă Focșani de 13 km adâncime (de exemplu, **Tarapoanca et al., 2003, 2004; Figure 3.3**) este



legată de slab-ul Vrancea în scufundare verticală, văzut ca un corp de mare viteză la studii de tomografie seismică, de ex., **Martin et al., 2006**).

Figure 3.3. Harta geologică simplificată a Carpaților de Sud-Est (**Matenco et al., 2007; Popa et al., 2012**). A-A' indică profilul investigat, care taie Carpații de Sud-Est de la Bazinul Transilvaniei până la Bazinul Focșani (Prs, Perșani; SH, sud Harghita; și C, vulcanici Ciomatul). (Fondul arată topografia cu râurile majore; **Ryan et al., 2009**).” Imagine de la **Şengül-Uluocak et al., 2019**.

Se sugerează că ridicarea suprafeței Munților Carpați de Sud-Est dedusă de datele geomorfologice este controlată de ridicarea mantalei fierbinți de sub această regiune (de exemplu, de către **Molin et al., 2012**). Deplasările rapide ale suprafeței din regiunea mediteraneană în conformitate cu studiile geodinamice recente sugerează că acestea au fost controlate de topografia dinamică indusă de fluxul din manta, în plus față de izostazia crustală de tip Airy (de exemplu, **Faccenna, Becker, Auer, et al., 2014; Faccenna, Becker, Miller, et al., 2014**), Becker, Miller, et al., 2014). În contextul subducției plăcilor, detașării plăcii, delaminării și instabilităților convective, o serie de modele geodinamice este utilizată pentru a explica cauza tasării și ridicării cuplate în Carpații de Sud-Est (de exemplu, **Göğüş et al., 2016; Ismail-Zadeh et al., 2005, 2012; Matenco, 2018**, și referințele din acesta).

Discuții

- Se pare că activitatea seismică din zona Platformei Moesice este limitată la Est de fluviul Dunărea, de-a lungul căruia există o falie importantă, despre care se presupune că este o caracteristică tectonică a crustei. Deși ținuturile tectonice din Dobrogea Centrală și de Sud aparțin Platformei Moesice, doar câteva cutremure survenite aici sunt raportate în catalogul ROMPLUS. Așadar, se pare că această falie separă zona seismogenă MO de zonele mai stabile ale Dobrogei Centrale și de Sud la est. Cele două falii importante, Peceneaga Camena și Capidava – Ovidiu, intră în aceste zone (după cum se vede și se monitoriza clar la suprafață pe mai multe sectoare). Activitatea seismică istorică de-a lungul acestei falii din Dobrogea este însă net redusă, dacă o comparăm cu activitatea seismică de-a lungul faliei Sf. Gheorghe în Dobrogea de Nord (**Figura 3.2**).
- Cutremurele crustale exprimă mai degrabă deplasarea și re poziționarea diferitelor blocuri din zonă și nu urmăresc mișcările transcurente semnificative între unitățile tectonice din regiune de-a lungul faliilor principale. Aceste blocuri sunt delimitate fie

de sistemul principal de falii, care se desfășoară paralel cu Curbura Arcului Carpaților, fie de falii secundare, distribuite pe o direcție generală care este aproximativ perpendiculară pe direcția sistemului de falii principale.

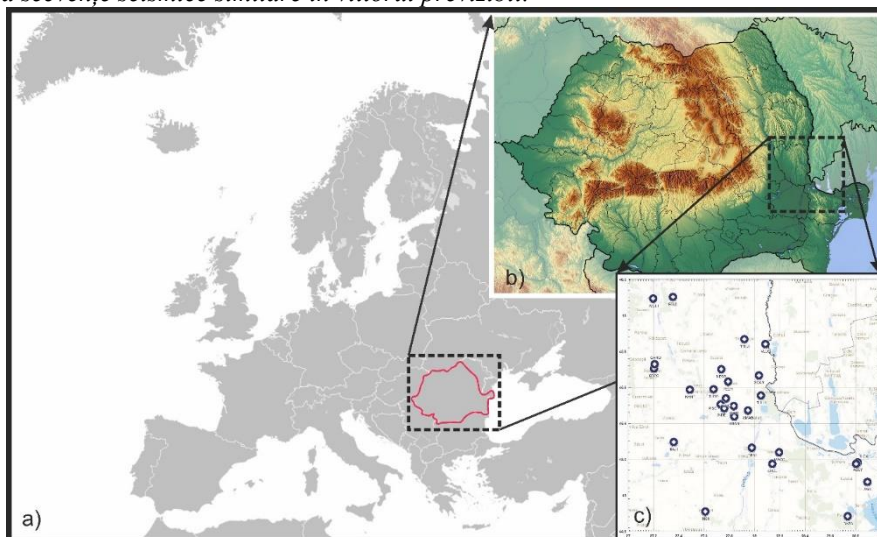
- Trăsăturile tipice relevate de toate studiile anterioare privind activitatea seismică subcrustală în regiunea Vrancea: alunecarea predominantă, falia inversă, care caracterizează atât cutremurele slabe, cât și cele puternice (*Enescu 1980, Oncescu 1987, Oncescu and Trifu 1987*) (*Appendix 3, Figure A3.2*) păstrează soluțiile planului de falie ale cutremurelor din Vrancea generate de plăci care se scufundă în manta. Axa T apropiată de verticală și axa P apropiată de orizontală tind să fie orientate perpendicular pe Arcul Carpaților. Gruparea puternică a focarelor și rata mare de apariție în timp relevă un proces geodinamic care eliberează foarte eficient tensiunile tectonice. Așadar, extensia continuă verticală sau subverticală în plăci, în paralel cu compresia predominantă NV-SE, poate fi asociată cu o serie destul de extinsă de modele active propuse recent:
 1. tragere puternică în jos prin scufundare gravitațională în astenosferă a unei plăci oceanice (*Sperner et al., 2004*);
 2. delaminare litosferică continentală activă (*Knapp et al., 2005*);
 3. Deshidratarea rocilor (*Ismail-Zadeh et al., 2000*);
 4. Instabilitatea gravitațională (*Lorinczi and Houseman 2009*);
 5. Instabilitatea termică (*Cloetingh et al., 2004, Demetrescu et al., 2007*).
 6. Joncțiune triplă instabilă (*Besutiu 2001*).

Capitolul 4

2013 – Un roi de cutremure crustale în zona NV Galați

Regiunea Galați-Izvoarele, situată în Estul României (Figura 4.1 c), a devenit de interes relativ recent, când a „găzduit” o succesiune neobișnuită de cutremure intense. În perioada septembrie-noiembrie 2013, în zonă au fost înregistrate câteva sute de cutremure de crustă. Au existat mai multe încercări de a explica fenomenul și s-au format ipoteze mai mult sau mai puțin documentate. S-au făcut unele speculații cu privire la potențiala legătură dintre activitățile seismice și industria petrolieră. Acest capitol sintetizează rezultatele sondajelor geofizice locale efectuate în zonă, analizate împreună cu seismicitatea observată. Principalele rezultate ale studiilor efectuate (*Besutiu et al., 2019*) evidențiază regiunea Galați-Izvoarele ca zonă seismică activă, aparținând prelungirii în Nord-Vest a zonei mobile (active) a Dobrogei de Nord. Cutremurele au fost generate în principal într-o structură locală de tip graben puternic fragmentat, suprapus transversal pe versantul descendent al promontoriului Nord Dobrogean. Sistemul de tip graben a fost și ar putea fi (re)activat de fiecare dată când forțele tectonice care acționează asupra Lanțului Carpatic se intensifică. Regiunea Galați-Izvoarele ar trebui privită ca o zonă predispusă producerii de cutremure, iar orice creștere semnificativă a stresului tectonic în curbura Carpaților poate genera secvențe seismice similare în viitorul previzibil.

Figura 4.1: a) Harta Europei, cu contur alb, granițele statelor membre și conturul frontierei României, cu roșu; b) Harta României, forme de relief și selecție, cu pătrat, conturează zona de studiu punctată în negru; c) zona de studiu extinsă Nord-Vest Galați și toate stațiile GPS/GNSS, de campanie și permanente existente.



4.1 Contextul tectonic NV Galați

În general, geologia zonei de studiu reflectă un mediu asemănător unei platforme, cu un strat sedimentar post-tectonic acoperit care se suprapune pre-neogenului nepliat și având un substrat fracturat. Învelișul sedimentar este compus în principal din nisip, iar compartimentele neogene sunt în mare parte acoperite de depozite aparținând Cuaternarului (*Saulea et al., 1967*).

4.2 Seismicitatea în zona de studiu

La sud de depresiunea Bârlad se identifică o zonă seismogenă, situată la limita marginii de Sud-Vest a Depresiunii Predobrogene cu orogenul nord-dobrogean: falia Sf. Gheorghe. În general, seismicitatea și mecanismele focale definitorii sunt similare cu cele menționate pentru Depresiunea Bârlad: activitate seismică moderată ($M_w \leq 5,3$), grupată preponderent de-a lungul faliei Sf. Gheorghe și regimul extensional al câmpului de deformare. Aceasta reflectă cele două zone aparținând aceiași unități tectonice (platforma scitică). Din acest punct de vedere, ele ar putea fi considerate o singură zonă seismogenă.

La 11 09 1980 a avut loc un cutremur între Galați și Brăila cu magnitudinea $M_w = 4,6$, hipocentrul situat la aproximativ 19 km adâncime și intensitatea epicentrală de VI grade. La stația seismologică Carcaliu au fost înregistrate 49 de replici, la aproximativ 18 km distanță epicentrală, cea mai mare replică atingând $M_L = 3,3$ (*Radu et al., 1988*).

4.3 2013 – Un roi de cutremure crustale în zona NV Galați

Activitatea seismică studiată a început cu un grup de 6 evenimente în perioada 6-9 septembrie 2013 (*Figura 4.5*) și s-a desfășurat pe o perioadă de trei luni (ultimele evenimente localizate s-au petrecut între 18 și 22 decembrie 2013). Distribuția în timp și mărime a cutremurelor este specifică unei secvențe de tip „seismic”. Clusterelor seismice reprezintă grupuri de cutremure de magnitudine apropiată care nu conțin evenimente de tip „șoc principal” semnificativ mai mari decât restul cutremurelor. Roiurile seismice apar atunci când tensiunea acumulată este descărcată printr-o structură deosebit de neomogenă.

Cursul temporal al cutremurelor (*Figura 4.5*) este caracterizat de o alternanță între perioadele active și inactive. Magnitudinea maximă ($M_L = 4,0$) a fost înregistrată pe 29 septembrie, la ora 18:10. Trei dintre grupurile cu seismicitate ridicată prezintă cutremure cu magnitudini de peste 3,5: 22-25 septembrie, 28-30 septembrie și 2-5 octombrie. Este interesant de observat că activitatea seismică a scăzut brusc în urma cutremurului din Vrancea din 6 octombrie 2013 ($M_L = 5,5$), ceea ce poate sugera o oarecare interdependență între regimul tectonic din Vrancea (predominant) și regimul tectonic din zona crustală a avanfosei carpatice.

Dacă urmărim în detaliu istoria seismicității din Vrancea (zona crustală și subcrustală) reprezentată în *Figura 4.5*, comparativ cu istoria seismicității din zona Izvoarele-Negrea, observăm un posibil efect de „ping-pong”: intensificarea în Zona Izvoarele-Negrea corespunde unui deficit în zona Vrancea și invers. Din această perspectivă, se remarcă lipsa cutremurelor în zona Vrancei (atât în zona crustală, cât și subcrustală) din 18 septembrie (când s-a înregistrat un cutremur cu magnitudinea 3,8) și până pe 6 octombrie (data producerii unui cutremur cu magnitudinea 5,5). Este o perioadă de aproximativ 17 zile în care singurele evenimente înregistrate în zona Vrancei au fost un cutremur subcrustal cu magnitudinea 2,5 (la limita de detectare a rețelei seismice) pe 5 octombrie și un cutremur cu magnitudinea 2,1, pe 5 octombrie. De asemenea, gruparea cutremurelor din Vrancea din 22-26 octombrie se suprapune unei perioade de deficit de seismicitate în zona Izvoarele-Negrea. În lunile noiembrie și decembrie, cutremurele generate în zona Izvoarele-Negrea scad ca număr și magnitudine (magnitudinile înregistrate nu depășesc valoarea de 2,5), în timp ce activitatea din zona Vrancea intră într-un regim „normal”, cu evenimente de magnitudine aproximativ 3, distribuite uniform în timp.

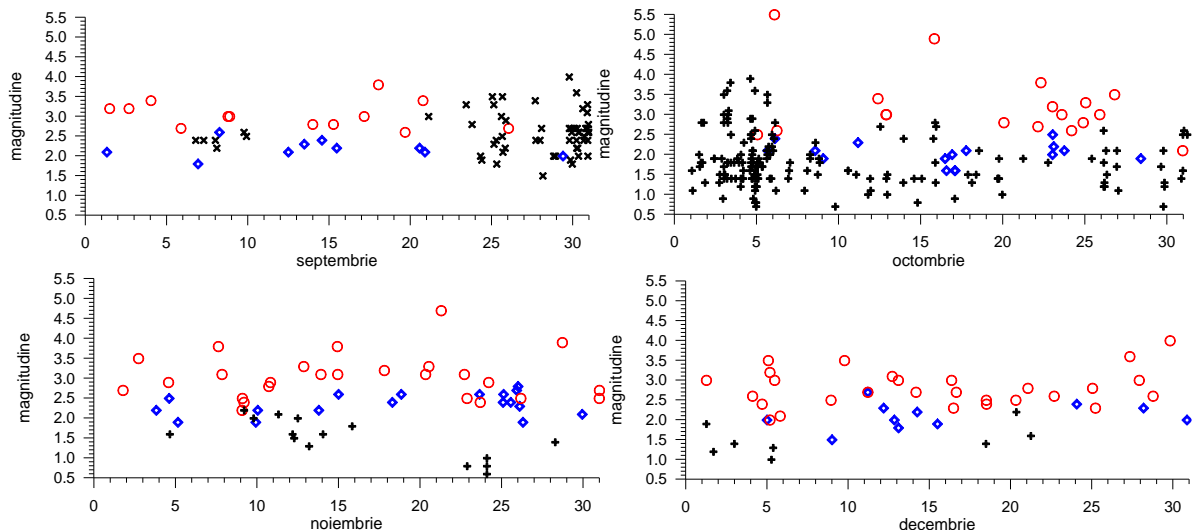


Figura 4.5: Activitatea seismică din perioada septembrie – decembrie 2013 în zona Izvoarele-Negrea (simboluri negre) și în paralel cu zona Vrancea (simboluri roșii pentru cutremure subcrustale, $h < 60$ km și simboluri albastre pentru cutremure crustale din zona de avanfosă carpatică) Sursa: **Raport INCDFP, 2013**

Începând cu data de 28 septembrie 2013, Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului a trimis în repetate rânduri în zona Galați – comuna Slobozia Conachi, satele Izvoarele, Negrea și Schela câteva echipe de specialiști pentru instalarea de echipamente de detecție și măsurare, pentru o primă evaluare a aspectelor geofizice relevante și a efectelor macroseismice (**Figura 4.6 a**).

Distribuția epicentrelor reprezentate în **Figura 4.6 b**) și **Figura 4.7** prezintă o tendință de aliniere a focarelor roiului seismic pe direcția NE-SV, perpendicular pe direcția sistemului de falii principale, Peceneaga-Camena (spre Sud) / Sf. Gheorghe (la Nord). Este interesant de observat că această aliniere începe să se formeze cu aproximativ patru ani înainte de începerea roiului seismic (**Figura 4.4**). Rămâne o întrebare deschisă dacă orientarea epicentrelor este legată de activarea unei falii situate între falia Peceneaga-Camena și falia Sf. Gheorghe sau dacă avem de-a face cu un sistem complex de activări succesive a multiplelor falii orientate NV-SE, situate între cele două falii majore.

Distribuțiile în spațiu ale hipocentrelor și pe două secțiuni verticale de-a lungul pantei pe care s-au produs cutremurele și, de asemenea, perpendicular pe pantă, sunt prezentate în figurile de mai jos (**Figura 4.7**).

Discuții

- Făcând referire la datele disponibile în catalogul nostru seismic (www.infp.ro), roiul seismic este foarte neobișnuit pentru zona Galați, atât datorită amplitudinii cât și a duratei evenimentelor.
- Fenomenul de roi seismic nu este unic în România. El poate fi întâlnit în alte regiuni seismice precum în fața curbării Carpaților, în regiunea Sinaia. În România însă, din datele instrumentale, roiul seismic de la Galați este semnificativ mai mare ca durată și, de asemenea, ca număr de evenimente comparativ cu roiuri seismice similare.
- Epicentrele acestui roi seismic sunt aliniate pe direcție NE-SV, cu adâncimea focală a evenimentelor variind de la 1 la 27 km. Cele mai multe dintre ele au fost situate între 1-10 km adâncime. Această distribuție spațială a epicentrelor este paralelă cu cele două falii transversale situate la nord de zona epicentrală a faliilor seismice, de décroșare și normale (**Matenco et al., 2007**) și perpendiculară pe sistemul de falii dominant situat NE-SV, între falia Sf. Gheorghe la Nord și Peceneaga-Camena la Sud, iar falia Pechea traversează pe diagonală fluxul seismic.

- Aceste microseisme au reactivat cel mai probabil un sistem local de falii de dimensiuni reduse, situat între două mari unități tectonice (Sf. Gheorghe și Peceneaga-Camena) și paralel cu faliile transversale care traversează sistemul menționat înainte.
- Soluțiile de mecanism focal ale cutremurelor studiate obținute din polaritățile unde P prezente prezintă predominant o falie normală cu o componentă de alunecare laterală importantă în mai multe cazuri. O caracteristică constantă este un plan de înclinare orientat aproximativ în direcția NE-SV, care se scufundă în direcția SE.
- Axele principale ale moment tensorului prezintă o variabilitate destul de mare în azimut: axa T are două direcții predominante NE-SV, plus NV-SE (în cele mai multe cazuri), în timp ce direcția axei P variază. Regimul câmpului de stres în zona seismică indică un câmp de stres predominant extensional (înclinarea lui T este mai mică de 45° , iar înclinația lui P în majoritatea cazurilor este mai mare de 45°).
- Roiul seismic apărut în 2013 este considerat a fi cel mai reprezentativ roi seismic care a avut loc în România, fără implicații asupra hazardului seismic evaluat în zona Galați (Craiu et al., 2017).

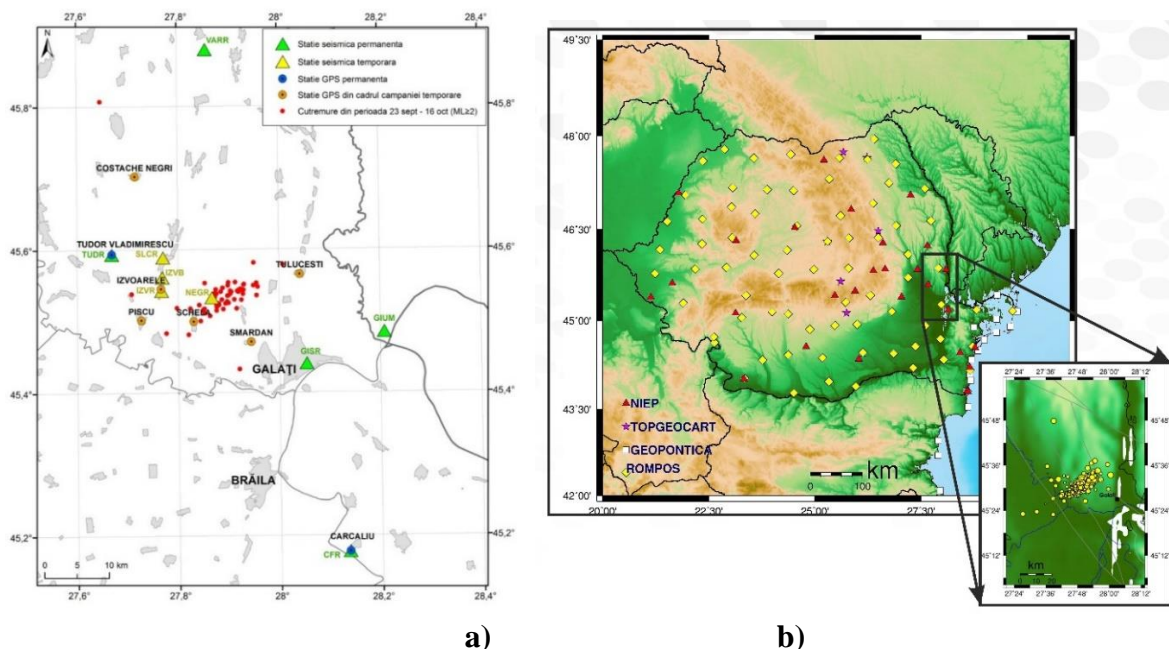


Figure 4.6: a) Echipamentele instalate la data de 28 septembrie 2013 de Institutul National de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pamantului in zona Galati – comuna Slobozia Conachi, satele Izvoarele, Negrea si Schela, Impreuna cu statiile permanente existente si epicentrele cutremurelor înregistrate până în acel moment b) alinierea epicentrelor pentru întreaga secvență de cutremure. Sursa: Raport INCDFP, 2013 & Năstase et al., EGU 2019

Capitolul 5

Posibil impact asupra seismicității zonei de studiu prin activități antropice și alte fenomene/hazarduri naturale

Ce este seismicitatea indusă? În general, seismicitatea indusă are de-a face cu evenimentele seismice care sunt rezultatul activităților umane. Activitatea umană poate provoca seismicitate indusă în mai multe moduri diferite, inclusiv prin operațiuni geotermale, injectarea apelor uzate, acumularea rezervorului (apa din spatele barajelor) și operațiuni cu petrol și gaze, cum ar fi fracturarea hidraulică. Dovezi pentru existența activității seismice declanșată de precipitații – un factor cunoscut și important pentru generarea cutremurelor sunt fluidele, deoarece variațiile presiunii porilor modifică rezistența defectelor. Astfel, dacă crusta este suficient de aproape de starea sa critică, acestea pot iniția cutremure. Pe baza observațiilor asupra seismicității izolate de sub Muntele Hochstaufen, dens monitorizat, din SE Germaniei, acum putem demonstra că scoarța Pământului poate fi atât de

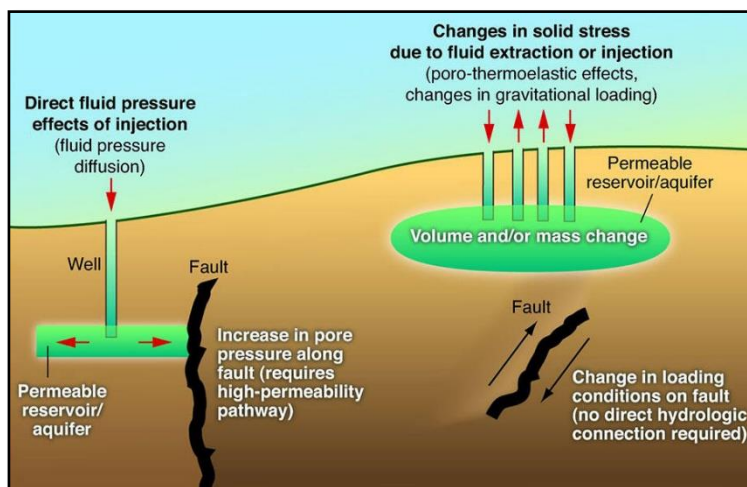
fragilă, încât chiar și variațiile minuscule ale presiunii asociate cu precipitațiile pot declanșa cutremure în câteva minute la adâncime de câțiva kilometri. S-a constatat că activitatea seismică înregistrată este strâns corelată cu modificările spațio-temporale ale presiunii porilor datorate apei pluviale care se infiltrează și în concordanță cu răspunsul faliilor descris de legea frecării. (Hainzl et al., 2006)

Figura 5.1 – Efectele injecției de fluid și retragerii, pe care le pot avea asupra defectelor din apropiere. Sursa <https://www.usgs.gov/>

5.1 Seismicitatea indusă

USGS evaluează relațiile fizice dintre injecția (sau extracția) fluidului și cutremure prin simulări computerizate. Aceste relații pot fi studiate doar indirect cu ajutorul observațiilor, astfel încât simulările pe calculator contribuie la o interpretare mai detaliată și mai corectă a fenomenelor complicate și puțin înțelese de declanșare a activităților seismice. Oamenii de știință pot folosi, de asemenea, aceste simulări pentru a sublinia modele complexe de seismicitate înregistrate de stații seismice temporare sau permanente. (Anexa 5, Figura A5.1). (Andrews R.D. et al., 2015)

Alte procese fizice, precum schimbările de temperatură, presiune și tensiune asociate cu producția de energie geotermală, sunt, de asemenea, modelate de USGS pentru a înțelege mai bine cutremurele induse. Studiile în jurul instalațiilor geotermale și de captare a carbonului au observat deformarea suprafeței asociată cu compactarea rezervorului și injectarea de dioxid de carbon lichid. Una dintre simulările USGS descrie procesul tectonic indus de curgerea fluidelor dintr-un puț de injecție. Se crede că seismele induse sunt cauzate în principal de creșterea presiunii fluidului în interiorul faliilor. Pentru a vedea cum se modifică presiunea fluidului în subteran ca răspuns la injecție, trebuie să simulăm un flux de fluid. Un scenariu similar de injecție simulată în Oklahoma descrie o creștere a presiunii fluidului de la puț până la 5 mile, urmată în timp de aceeași presiune în pori detectabilă la aproape 15 mile distanță. USGS utilizează date similare pentru a evalua dacă schimbările de presiune la o defecțiune cunoscută sunt suficient de semnificative pentru a provoca un cutremur. (Anexa 5, Figura A5.2). Sursa: <https://www.usgs.gov/>



Declanșarea cutremurelor. Hazardurile naturale, cum ar fi căderile de pietre și prăbușirile tunelurilor, alunecările de teren, scufundarea structurilor etc. au fost de obicei recunoscute ca surse pentru declanșarea seismelor. Acest lucru a fost recunoscut chiar și în istorie, când civilizațiile timpurii au început să înțeleagă importanța activităților miniere. În zilele noastre, cutremurele induse de om au loc la o scară mult mai mare. Activitățile industriale moderne, cum ar fi mineritul, umplerea și descărcarea rapidă a tuturor tipurilor de rezervoare, generarea de energie geotermală, extracția hidrocarburilor și în special fracturarea asociată gazelor de șist sunt considerate în mod obișnuit potențiali declanșatori ai activităților seismice care ar putea genera pierderi materiale, financiare și umane semnificative. Compania Dutch Petroleum Ltd. (NAM BV), angajând cercetători pentru a efectua un studiu al cutremurelor induse de om, a demonstrat că multe tipuri de activități industriale au potențial seismogenic, așa cum se presupunea deja. O problemă care crește odată cu dezvoltarea la scară largă a industriei (Gillian Foulger et al., 2018). Uneori, dar nu foarte des, activitățile umane legate de

industrie, agricultură etc. ar putea genera evenimente mici și medii care, rareori, pot declanșa cutremure mai mari și dăunătoare (*Gillian Foulger et al., 2018*) (**Figure 5.2**).

5.2 Activitatea seismică declanșată de precipitații abundente

O creștere minimă a stresului poate face uneori câmpul de stres să atingă limita, suficient pentru a declanșa un cutremur și, printre procesele naturale care asigură această creștere aproape nesemnificativă, se pot număra precipitațiile abundente. Alte procese care pot declanșa cutremure în ceea ce un om de știință numește „dezastru care declanșează dezastru” sunt mișcarea plăcilor tectonice, topirea calotei glaciare și chiar activitățile umane. Un factor important care trebuie controlat atunci când o falie geologică alunecă este presiunea apei care este invariabil conținută în zonele de falie ca apă subterană. În condiții specifice, presiunea apei subterane este în creștere și fractura ar putea ajunge în faza de „deblocare”: asta se întâmplă atunci când cele două părți ale faliei alunecă una pe lângă alta provocând un cutremur. Să luăm ca exemplu injecția de apă în fântâni din diverse motive: creșterea factorului final de recuperare în industria hidrocarburilor, injectarea de apă și abur etc. care, în cazuri particulare, au o capacitate mică de a declanșa cutremure. Chiar și modificările hidrologice care sunt mici sau au loc pe o anumită perioadă de timp pot favoriza modificări ale presiunii fluidului în zonele de fractură; astfel, în mod deloc surprinzător, evenimente precum ploile extreme ar putea încuraja apariția unui seism. De exemplu, pentru evenimente care necesită timp, deoarece pânzele freatice subterane au niveluri în scădere care declanșează în cele din urmă cutremure. Oamenii de știință au semnalat mai multe cazuri de precipitații abundente care au avut rol principal în producerea unui seism. De exemplu, investigațiile recente ale roiului seismic care a avut loc în 2002 lângă Piding în sud-estul Germaniei și estul Lucerna - Bisisthal în Elveția Centrală, care a avut loc după ploi abundente. Investigațiile privind conexiunile complexe dintre precipitații și seismicitate sunt încă la început și rezultatele rămân discutabile (*Jaime A. Convers et al., 2020*).

Capitolul 6

Geodezia satelitară în zona NV Galați

REȚEA REGIONALĂ GNSS / GPS PENTRU MONITORIZAREA DEFORMAȚILOR ÎN ZONA CARPATO - DUNUBIANO - PONTICĂ ȘI STUDIUL IMPACTULUI CUTREMURELOR LOCALE

Rețeaua modernă românească GNSS/GPS (Global Navigation Satellite System/Global Positioning System) a început în 2001, când a fost instalată prima stație permanentă pe vârful Lăcăuți din regiunea muntoasă a Zonei de curbare a Carpaților, la vest de zona epicentrală Vrancea. În prezent, rețeaua are 29 de stații operaționale în timp real (Figura 6.1). Obiective principale, cum ar fi monitorizarea expresiilor de suprafață a modificărilor crustale care au loc în și în jurul Carpaților Românești și a unităților tectonice învecinate, ca rezultat direct al proceselor tectonice privitye la scară mai mare (de exemplu pe flancul de nord-est al interacțiunii Africa- Europa) și observarea mișcărilor crustale pentru a înțelege mai bine interconexiunile suprafață-adâncime ale cutremurelor de adâncime intermediară având și cutremure de mică adâncime din zona Vrancea. Rețeaua GNSS/GPS poate oferi, de asemenea, măsurători de mediu îmbunătățite, fiabile și de mare precizie pentru prognozele meteo globale, monitorizarea climei, analiza meteorologică a ionosferei și climei satelitare, precursori de cutremur (studii ionosferice, *Năstase et al., 2016*), studii coseismice, poziționare GNSS și navigație și alte cercetări în scopuri complementare, cum ar fi seismologia GPS, folosind date GPS de înaltă frecvență de la 1 Hz la 50 Hz. (www.gps.infp.ro) *Năstase, 2016*.

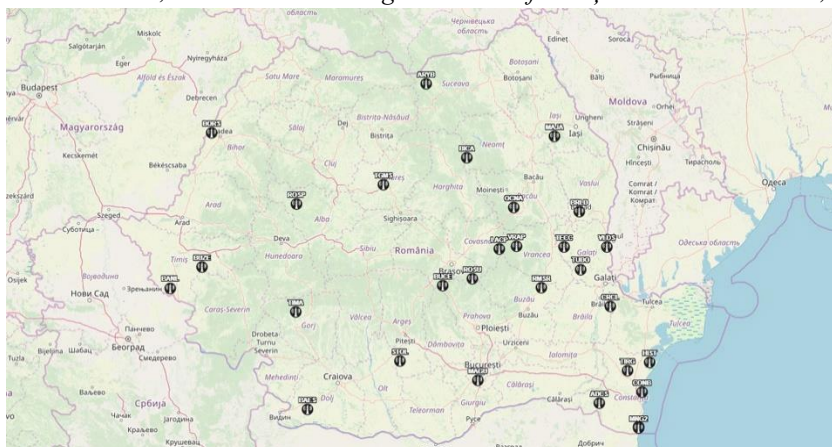


Figura 6.1: Harta României și a rețelei de stații GNSS permanente aparținând Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului (INFP), noiembrie 2019

6.1 Rețele GNSS permanente de referință în România

Prima stație permanentă GNSS a fost instalată în 1999, la Facultatea de Geodezie a Universității Tehnice de Construcții din București. De atunci, numărul stațiilor este în creștere. În prezent, peste 140 de stații permanente GNSS acoperă întreg teritoriul României. Voi face în continuare o scurtă prezentare a rețelelor GNSS actuale (**Figura 6.2**).

Rețeaua de stații permanente **ROMPOS** deține 74 de stații și este o rețea comercială care își propune să furnizeze servicii de corecție DGNSS/RTK, utilizate ulterior pentru măsurători cadastrale. Acesta este un proiect al Agenției Naționale de Cadastru și Publicitate Imobiliară (**Figura 6.2**). Rețeaua de stații permanente GNSS **GeoPontica** este dezvoltată și întreținută de Institutul Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Geologie Marină și Geoecologie (GeoEcoMar). Geopontica (formată din 18 stații terestre, dintre care 13 sunt situate în România, și 5 în Bulgaria) furnizează date din partea de vest a Mării Negre, cu privire la mișcările verticale ale scoarței terestre (izostazie, cotă, tasarea solului, prelevarea sub formă de bazin de sol etc., **Figura 6.2**). Rețeaua GPS permanentă **TGRef** – TOPGEOCART a apărut ca un răspuns firesc la solicitările utilizatorilor de a achiziționa echipamente Leica GNSS. TGref este în plină dezvoltare și acoperă în prezent cu servicii de corecție RTK 8 orașe din centrul și estul României și a furnizat corecții DGPS pentru aproape întreg teritoriul național (**Figura 6.2**).

Institutul Național de Fizica Pământului (INFP) gestionează o rețea robustă de stații de referință GPS/GNSS pentru monitorizarea deformațiilor din spațiul carpato-dunăreanopontic și impactul cutremurelor locale. Extinderea rețelei a început în anul 2001, când a fost instalată prima stație pe vârful Lăcăuți din zona muntoasă a Carpaților de Curbură, la vest de zona epicentrală a Vrancei. Rețeaua a fost înființată ca urmare a unui proiect internațional de cercetare stabilit în cadrul parteneriatului strategic dintre Institutul Național pentru Fizica Pământului (INFP), Facultatea de Geologie și Geofizică – Universitatea București (FGG), Universitatea Tehnică din Delft, Universitatea din Utrecht, și Centrul de Cercetare pentru Științe Pământului din Țările de Jos (ISES). Incepând cu anul 2013, rețeaua GPS este susținută și dezvoltată de INFP. Concentrându-se pe zona seismică Vrancea și zona Carpaților de Curbură, rețeaua este formată din 29 de stații operaționale (**Figura 6.2**). Acestea vor oferi observații ale mișcărilor crustei pentru o analiză îmbunătățită a interconexiunilor suprafață – profunzime ale cutremurelor de adâncime medie, precum și măsurători avansate, riguroase și foarte precise ale condițiilor meteorologice pentru prognozele meteo, monitorizarea climei, precursorii seismici (studii ionosferice), poziționarea GPS și navigație și alte tipuri de cercetări complementare. În prezent, progresul în domeniul tehnologiei GNSS și al algoritmilor de calcul, cum ar fi procesarea datelor disponibile în general la 20 Hz (și chiar mai mult), ne fac să căutăm peste tot sisteme și algoritmi care ar face o estimare în timp real a formelor de undă și a mișcărilor cosmice. Astfel, vom putea confirma, îmbunătăți și analiza mai îndeaproape rezultatele obținute de la senzorii seismici plasați și senzorii de accelerație, în special de la senzorii atmosferici, magnetici, de temperatură cu infraroșu, de înclinare și/sau array. Așanumitul sistem VADASE (Variometric Approach for Displacements Analysis Stand-alone Engine) nu necesită complexitate tehnologică suplimentară sau analiză centralizată a datelor. Practic, poate fi încorporat în software-ul receptorului GPS, aducând astfel o contribuție semnificativă la avertizarea de tsunami și la alte sisteme de evaluare a hazardurilor naturale. Cu ajutorul și sprijinul Leica Geosystem și Topgeocart, șapte licențe demo au fost instalate pe receptoarele noastre Leica GR10 și 30 atunci când sistemul a devenit complet operațional în 2019. Această abordare se bazează pe observațiile diferențelor de timp pentru o purtătoare de fază pe o singură frecvență, obținută la o rată de 1 Hz sau mai mare, folosind un singur receptor

autonom și produse standard GPS de bandă largă (date de orbită și de timp), care reprezintă informații auxiliare disponibile zilnic în timp real. În cadrul acestei abordări, am estimat inițial seriile de timp ale deplasărilor de la epocă la epocă (Năstase et al. 2016).

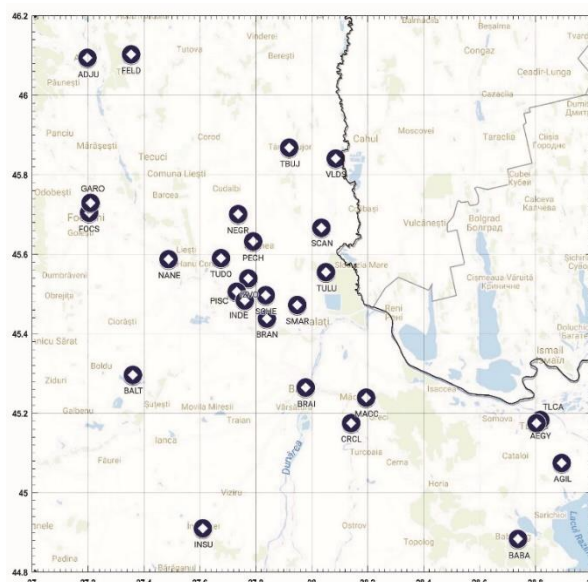
6.2 Stații GPS de campanie în zona de studiu

Primele sondaje de geodezie satelitară GPS din România au fost realizate în 1994, coordonate de National Geodetic Survey (NGS) al Statelor Unite – și implicând Ministerul Agriculturii din România (MAA), fostul Institut de Geodezie, Cadastru, Fotogrammetrie și Cartografie (ICGFC, în trecut IGFCOT) și Direcția Topografică Militară (DTM). Sondajele au continuat până în 1995, ca parte a unui proiect european internațional, CERGOP (Central European Geodynamic Project), conceput pentru studii geodinamice în Europa Centrală și de Est (Schenewerk et al. 1993). În anii următori, a început un alt program internațional, denumit CRC461 – „Cutremurele puternice: O provocare pentru Geoștiință și Inginerie tehnică civilă”; acest program a inclus achiziția de date GPS din regiunea investigată, începând cu anul 1997, când au fost instalate 28 de stații GPS, care acoperă o suprafață de 350 x 350 kilometri pătrați, din Estul României și centrate pe cea mai importantă zonă seismică din România (Anexa 6, Figura A6.3). Această rețea geodezică a fost evaluată în perioada 1997 – 2004 de specialiști olandezi de la Universitatea din Delft, dar și de specialiști de la Institutul German de Geodezie din Karlsruhe și de specialiști de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizica Pământului din România (Ghițau et al., 2003).

Din anul 2001, măsurătorile GPS de la rețeaua instalată în Vrancea au fost efectuate în cadrul SUBDUCT (Surface Behavior and Dynamical Units of the Southern Carpathians Tectonics), un proiect de cercetare inițiat de Centrul Olandez de Cercetare Integrată în Știința Pământului Solid (ISES) și Universitatea din Delft (Olanda) (Ambrosius et al., 2005). Obiectivele proiectului au fost realizate în colaborare cu experți români de la Facultatea de Geologie și Geofizică a Universității din București și Institutul Național pentru Fizica Pământului. Obiectivul principal al proiectului a constat în monitorizarea, analiza și interpretarea mișcărilor de suprafață cauzate de dinamica plăcilor litosferice – care sunt active în regiunea Vrancea (Carpații de Sud-Est) (Zoran et al., 2008).

Această rețea geodezică a fost măsurată între 1997 și 2004 de specialiști olandezi de la Universitatea din Delft, precum și de specialiști ai Institutului German de Geodezie din Karlsruhe, ai Facultății de Geologie și Geofizică a Universității din București și specialiști ai CD-ului Național Român. Institutul pentru Fizica Pământului. (Van der Hoeven et al., 2005). Rețeaua Vrancea cuprindea 54 de puncte de măsurare GPS, dintre care 6 stații permanente. Măsurătorile acestora au fost înregistrate între 2001 și 2004. În toate campaniile de măsurare au fost instalate receptoare GPS Leica XRS-1000 cu antene AT-504. Au avut loc șapte campanii de măsurare (în 1997, 1998, 2000, 2002, 2003, 2004 și 2006) până în 2006, folosind receptoarele Leica 300 și 500 și antenele corespunzătoare. Studiile GPS efectuate în perioada 1995-2004 au oferit informații utile privind mișcările tectonice locale în curbură arcului carpatic, mișcări caracterizate prin valori mici, mai mici de 1 mm/an pentru componenta orizontală și 3 mm/an pentru componenta verticală. (Mateciuc et al., 2019)

Figura 6.4: Harta cumulativă a stațiilor și campaniilor GPS și GNSS existente în zona de studiu.



6.3 Achiziție de date GNSS/GPS și analiză cantitativă și calitativă

Un deceniu de îmbunătățiri și dezvoltare de noi instrumente pentru statistici bazate pe date de observație, poziționare standard, deviații de timp și detecție Cycle-Slip și alte perturbări pe toate constelațiile, frecvențele și semnalele, altitudinea și azimuturile satelitelui, histogramele specifice altitudine, unghiul de tăiere, distanța de pseudo-frecvență în cazul reflexiilor multiple și a zgomotului acestuia, raportul semnal-zgomot în faza unei purtătoare, întreruperile de date și alte liste și statistici utile ne permit să analizăm în detaliu datele GNSS colectate pentru unul dintre principalele teme de cercetare care au rezultat în urma evenimentului unic de tip seismic din septembrie 2013 care a avut loc în zona de Est a României. (Năstase et al., 2016).

Capitolul 7

Procesarea datelor

În prezent, progresele acumulate de către tehnologia receptorului GNSS și a algoritmilor de calcul, cum ar fi rata de achiziție de 1 Hz (și chiar mai mult, până la 50 Hz), care sunt disponibile în mod public, ne fac să căutăm în întreaga lume sisteme și algoritmi care ar face posibilă o estimare în timp real a formelor de undă și a deplasărilor coseismice. Acest capitol evidențiază rezultatele obținute în ultimii ani prin analizarea datelor GNSS românești din trei studii de caz diferite dintr-o altă perspectivă și își propune să elaboreze o serie de aspecte și să ofere câteva direcții pentru lucrările viitoare care implică senzori seismologici netradiționali precum GPS și inclinometre în urma implementării noii generații de instrumente în procesarea datelor din rețeaua permanentă de stații de referință GNSS, având ca scop obținerea unei evaluări mai precise a impactului cutremurelor crustale din Vrancea și din România. (Năstase și colab., 2020).

7.2 Metode de procesare a datelor GNSS PPP și DD

Prelucrarea datelor a fost efectuată cu software-ul GipsyX (Bertiger et al., 2020), utilizând strategia de poziționare a punctului precis (PPP). GipsyX este un software de post-procesare dezvoltat la Jet Propulsion Laboratory (JPL) al NASA, Pasadena SUA. Ideea din spatele metodei PPP este că cele mai bune modele disponibile și datele post-procesate sunt folosite pentru a obține soluții zilnice foarte precise ale stațiilor GNSS din rețea. Modelele pentru distorsiunea cauzată de umezeala atmosferică (re3data.org: VMF Data Server; data de editare 2020-12-14), deplasarea cauzată de creșterea masei oceanice (Bos et al., 2020) a sitului sunt folosite pentru a corecta toate efectele care pot influența rezultatele. Valori precise ale orbitelor și ceasurilor sateliților GNSS sunt obținute de la JPL, fiecare set de produse conținând fișiere cu estimări consistente ale stării orbitale, estimări ale ceasului transmițătorului, informații despre altitudinea navelor spațiale, estimări ale parametrilor de rotație a Pământului (ERP) și informații despre distorsiunile de fază apărute pe banda largă.

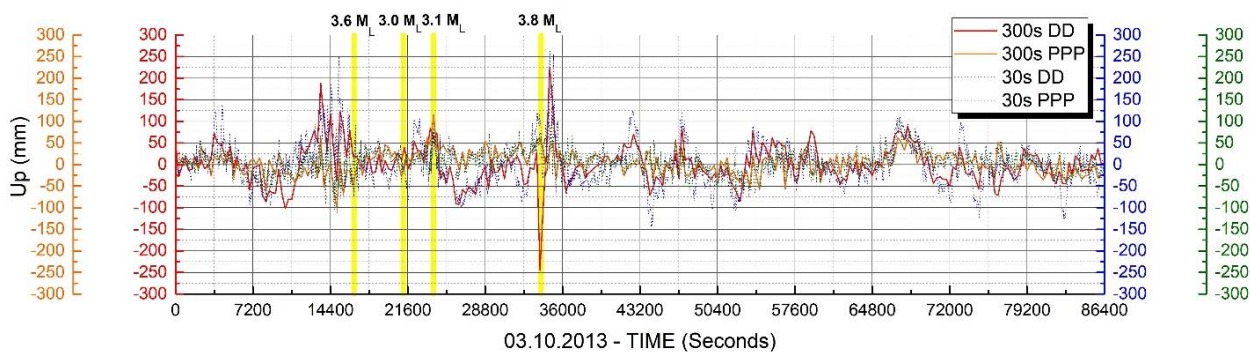


Figura 7.8 – Analiză comparativă PPP și DD 30s & 300s. Analiză monocomponentă pe 24 de ore din 2013, roi seismic NV Galați.

Rezultatele sunt așa-numitele soluții de poziție non referențiale, aceste soluții de poziție fiind apoi transformate în ultimul cadru terestru internațional de referință, folosind o transformare globală parametru Helmert de 7 (3 rotații mici, 3 translații, 1 parametru de scară) furnizată tot de JPL. Soluțiile zilnice ITRF sunt convertite în funcție de o placă tectonică de referință, placa eurasiatică fixă, folosind cea mai recentă soluție publicată a polului de rotație utilizat pentru acea placa în cadrul de referință ITRF14 (*Altmimi et al., 2016*).

Am testat această metodă pentru mai multe stații GPS de măsurare continuă din regiunea stabilă eurasiatică, iar mișcărilor redade au fost aproape de zero, demonstrând validitatea metodei. Rezultatele studiilor noastre arată că structura internă a teritoriului României este destul de stabilă, dar întregul teritoriu al țării pare să se deplaseze subtil spre sud, spre Eurasia, cu ritmuri de accelerare de aproximativ 2,5 – 3,0 mm/an, în special în partea sudică. Speculăm că acesta este un efect îndepărtat cauzat de mișcarea de subducție a plăcii africane în contact cu placa eurasiatică de pe creasta Mării Egee, mult înspre sud. Până acum nu am observat semnalele de lungă durată din cauza cutremurelor de adâncime din Vrancea, unde efectele induse de mișcarea crustei sunt probabil mici.

7.3 Analiza vitezelor de deformare verticală utilizând MATLAB și GPS Imaging

MATLAB este un limbaj de înaltă performanță dedicat în special calculelor tehnice. Integrează calculul, vizualizarea și programarea într-un mediu ușor de utilizat. Problemele și soluțiile sunt exprimate în notații matematice cât mai familiare, iar utilizările tipice includ:

- Metode matematice și de calcul
- Modelare, simulare și prototipare
- Dezvoltarea algoritmului
- Grafică științifică și de inginerie
- Analiza, explorarea și vizualizarea datelor
- Dezvoltarea aplicațiilor, inclusiv proiectarea interfeței grafice cu utilizatorul

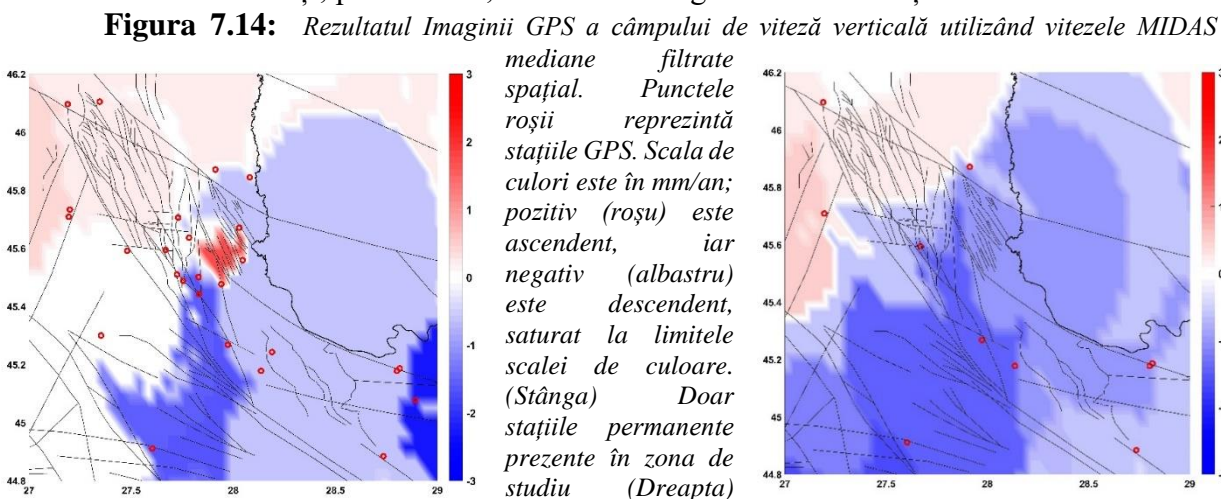
Funcția de structură spațială Similar cu „kriging”, avem nevoie de o funcție de structură spațială care să cuprindă informațiile reprezentând varianța semnalului care este atribuită distanței dintre stații. Stațiile aflate la distanță una de cealaltă au mai multe șanse să se deplaseze independent una față de alta decât stațiile care sunt aproape una de alta. Cât de rapid scade varianța vitezei verticale între perechile de stații odată cu distanța dintre stații depinde de lungimea de undă spațială subiacentă a semnalelor primite. Unele locații de pe Pământ au semnale verticale cu lungime de undă foarte mare. De exemplu, GIA din nordul Americii de Nord are viteze verticale care pot fi corelate până la 103 și 104 km din cauza sarcinii extinse și a răspunsului de recul a mantalei interne. Dimpotrivă, în alte locații, cum ar fi California de Sud, unde viteza verticală variază între sisteme acvifere și sisteme de falii separate doar de 100 până la 102 km, corelațiile pot fi slabe pe distanțe mult mai scurte (*Hammond et al., 2016*).

Filtrarea spațială mediană. Metoda a fost documentată în altă parte (*Hammond et al., 2016*), dar voi descrie pe scurt aspectele esențiale aici, deoarece acestea pot influența interpretarea rezultatelor mele. În a doua fază, „folosind un algoritm care înlocuiește viteza la fiecare stație cu mediana ponderată a valorilor stațiilor din apropiere, am filtrat vitezele la stații. Această etapă de filtrare reduce influența deviațiilor care sunt semnificativ diferite de ratele învecinate. Filtrarea luând în considerare mediana ponderată a vitezelor verticale în setul de stații conectate la punctul de evaluare (care în această etapă este o stație) și se realizează prin formarea unei triangulații Delaunay a locațiilor stațiilor pe o sferă (*Delaunay, 1934; Renka, 1997*). Triangulația Delaunay se dovedește utilă deoarece conectează punctul de evaluare la un set mic format din cele mai apropiate site-uri GPS învecinate, ceea ce menține aria contributivă cât mai mică posibil, având în vedere rezoluția/densitatea stațiilor. Software-ul utilizat pentru

calcularea triangulației este disponibil în mod deschis și utilizat în mod obișnuit și rulează cu un timp de execuție de obicei scurt, de asemenea, această triangulare este unică și reproductibilă. Din nou, folosim valori mediane (spre deosebire de medii), făcând noua valoare neinfluențată de deviații și îmbunătățind robustețea. Folosit în mod obișnuit în aplicațiile de procesare a imaginilor pentru a restabili deteriorarea filmelor, efectul seamănă cu cel al unui filtru de despeckling, adică corectează artefactele, erorile sau golurile introduse în generarea sau conservarea imaginilor (de ex., *Castleman, 1996*).

Imagistica În a treia etapă, am aplicat ca date de intrare algoritmul cu vitezele filtrate și am stabilit punctele de evaluare pe o grilă obișnuită cu o distanță de $0,05^\circ \sim 0,5$ km, atât în direcția de longitudine, cât și latitudine (*Figura 7.14*) și prin aceasta am realizat metoda de analiză grafică (denumită GPS Imaging). Deoarece este posibil să se aplice pasul de imagistică chiar și asupra datelor nefiltrate, al doilea pas poate fi totuși sărit. Aceste rezultate, însă, la vizualizarea unui câmp interpolat care în astfel de condiții este mai sensibil la viteze care diferă de câmpul robust variabil spațial, arătând puncte în susul și în josul stațiilor / puncte individuale care uneori schimbă semnul de la o stație la alta adiacentă. (*Hammond et al., 2016*) Am preferat să interpretez câmpul filtrat din *Figura 7.14*, în interesul rezolvării unui câmp mai reprezentativ pentru procesele geodinamice.

La acest pas, pentru a genera hărți ale vitezei verticale, cât mai robuste și asociate cu inflexiunea și fluiditatea Pământului solid pentru studiul de caz al tezei, am folosit această nouă metodă, a Imaginii GPS, pentru selectarea, filtrarea și interpolarea vitezelor verticale. Această tehnică utilizată ar putea fi descrisă în mod ideal ca un hibrid între filtrarea spațială mediană în stilul de procesare a imaginii și krigingul geostatistic. „Câmpul de viteză este eliminat, rezultând o valoare interpretativă îmbunătățită a datelor GPS, în timp ce semnalele care sunt prezente la mai multe stații sunt păstrate. Tehnica utilizează atât robustețea temporală a estimatorului de tendințe MIDAS (*Blewitt et al., 2016*), cât și robustețea spațială a filtrării spațiale mediane ponderate. Împreună, aceste metode permit recunoașterea semnalelor de acumulare a deformării elastice pe falii, deformării magmatice, relaxării postseismice vâscoase, ridicării tectonice, tasării cauzate de extracția apei subterane și revenirea elastică aferentă. (*Hammond et al., 2016*) Semnalele din toate aceste procese contribuie la câmpul de viteză verticală din România și, prin urmare, la zona seismogenă de NV Galați.



Toate stațiile disponibile. La fel ca în *Figura 7.12*, cu excepția unui interval minim de durată a seriei de timp de 2,5 ani și rata verticală este reprezentată grafic peste sistemul principal de falii suprapuse (sursa: proiect CEEEX nr.647/2005), *Figura 7.10* pentru a ilustra corelația dintre particularitățile imagistice și tectonice.

7.4 Analiza vitezelor de deformare orizontale și a ratelor tensiunilor tectonice utilizând MELD

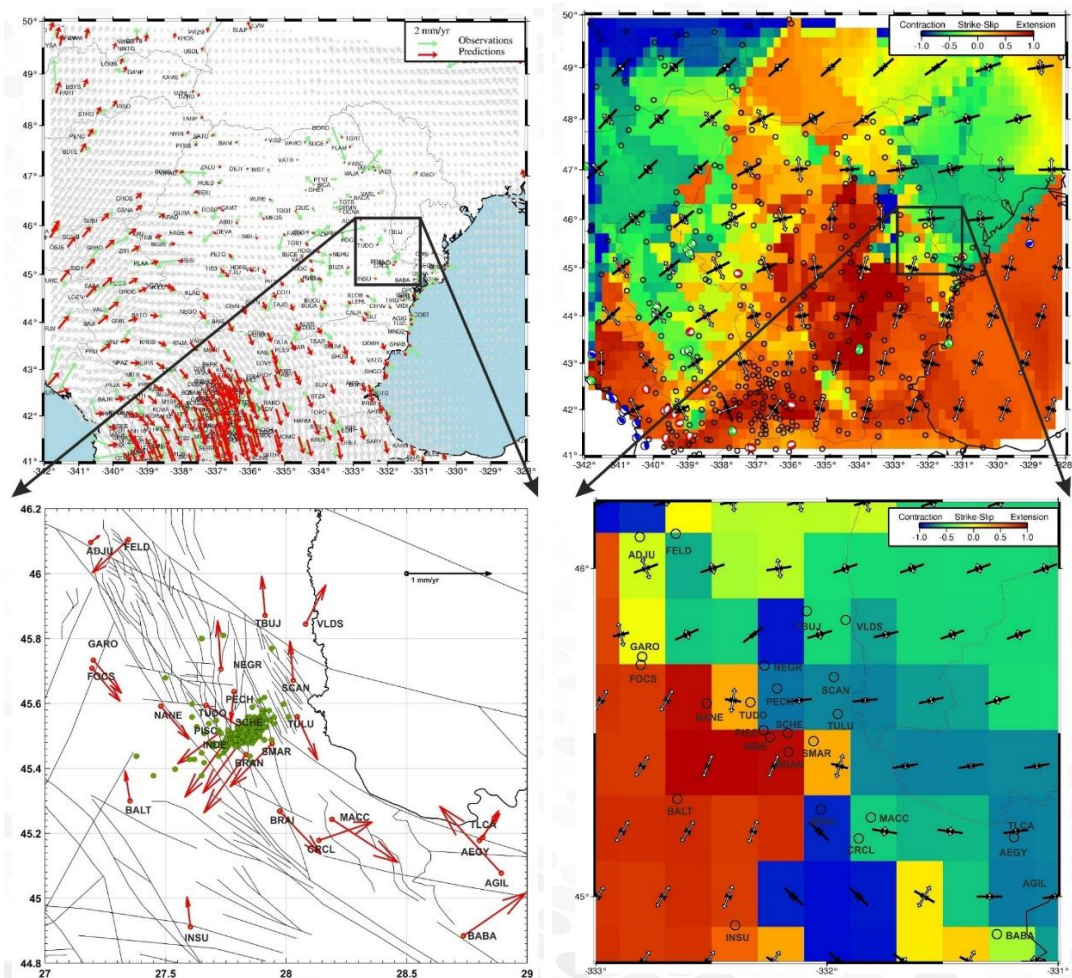


Figura 7.16 (stânga): Câmpul de viteză orizontal din România și zona regională (ambele afișate ca vectori în punctele de evaluare selectate și ca câmp de grilă al vitezei) și zoom peste zona de studiu NV Galați (ssf aplicat vectorilor orizontali ai vitezelor de deformare, epicentrele roiului seismic 2013 și sistemul principal de falii Proiect CEEX nr. 647/2005). Punctele de evaluare fac parte dintr-o grilă de 0,5°. Sursa: Năstase et al., EGU 2019.

Figura 7.17 (dreapta): România și stilul zonei regionale a tensorului și axelor vitezei de deformare și zoom peste zona de studiu NV Galați, definită de (Kreemer et al., 2014), stilul fiind afișat doar pentru locurile în care al 2-lea invariant al vitezei de deformare este de două ori mai mare decât deviația standard. Scara este saturată la -1 (compresie) când ambele axe principale sunt compresive și la +1 (extensie) când ambele axe principale sunt extensionale. Rezultatele sunt afișate pentru punctele de evaluare pe o grid de 0,5°. Sursa: Năstase et al., EGU 2019.

Algoritmul MELD constă în următorii pași. În primul rând, avem o triangulație Delaunay care este construită dintr-un set de puncte de observație pe o sferă, conform (Renka, 1997). În termeni reali, aceasta înseamnă că punctele de colocare nu pot fi utilizate în calculul metodei. Fac așadar o medie a locațiilor și vitezelor pentru toate punctele situate la o distanță de 5 km unul de celălalt pentru a rectifica acest lucru. Am identificat apoi triunghiul unic în care se află un anumit punct de evaluare. În teorie, aceasta ar putea oferi o estimare a $\dot{\epsilon}$ și $\dot{\omega}$ din vitezele la cele trei vârfuri ale triunghiului respectiv (să numim acest pas „nivelul 1”). Cu toate acestea, deoarece nu există redundanța a datelor (însemnând că numărul de valori de viteză obținute este egal cu numărul de parametri ai modelului), aceste estimări nu sunt robuste, astfel încât orice zgomot prezent în datele de viteză este înregistrat direct în estimările modelului,

acest lucru face ca parametrii modelului să fie foarte sensibili la deviații. Când rata de deformare reală este aproape de zero și este deosebit de acută când distanțele dintre vârfuri sunt mici (deoarece rata de deformare este o derivată spațială), această problemă este mai vizibilă și poate fi depășită luând în considerare mai multe date de viteză, eventual ponderate cu distanța până la punctul de evaluare și prin efectuarea unei regresii a celor mai mici pătrate. În timp ce problema deviațiilor este întotdeauna prezentă în orice estimare a celor mai mici pătrate, astfel de regresii vin în detrimentul rezoluției spațiale a estimării. În următorii pași ai MELD găsim o încercare de a depăși astfel de probleme. (*Kreemer et al., 2018*).

Capitolul 8

Studiu integrat, analiză multidisciplinară și multisenzor

*Datele de accelerație sunt esențiale pentru evaluarea pericolului seismic. O bună cunoaștere a condițiilor locale ale locației este necesară pentru a înțelege și utiliza corect acest tip de date. România are una dintre cele mai mari rețele de accelerometre din Europa, cu peste 135 de stații în timp real. În această lucrare, ne propunem să facem o caracterizare cuprinzătoare a locațiilor pentru opt dintre aceste stații, situate în partea de est a României. Folosim diverse seturi de date seismologice și realizăm investigații ale seismelor bazate pe zgomotul ambiental pentru a estima nivelul zgomotului de fond, frecvențele de rezonanță și amplificarea fiecărui punct de măsurare. De asemenea, derivăm parametrul $Vs30$ din profilele de viteză a undelor de forfecare de suprafață obținute prin inversarea undelor Rayleigh înregistrate în măsurătorile seismice active. Analiza noastră evidențiază rezultate similare pentru șapte stații: niveluri ridicate de zgomot pentru frecvențe mai mari de 1 Hz, rezonanță fundamentală bine definită la frecvențe joase (0,15–0,29 Hz), niveluri moderate de amplificare (până la 4 unități) pentru frecvențe între 0,15 și 5–7 Hz și aceeași clasă de sol (tip C) conform $Vs30$ estimat și Eurocod 8. În schimb, a opta stație pentru care clasa de sol este evaluată ca tip B prezintă un nivel de zgomot foarte bun pentru o gamă largă de frecvențe (0,01–20 Hz), o rezonanță fundamentală mai largă la frecvențe înalte (~8 Hz) și o curbă de amplificare plată între 0,1 și 3–4 Hz. (*Greco et al., 2019, coautor al studiului*).*

8.1 Senzori colocați

În această lucrare, *Greco et al., 2019*, au fost investigate condițiile punctului de măsurare pentru 8 stații RSMN situate în partea de est a României (*Figura 8.1*). Toate stațiile sunt echipate atât cu senzori de viteză de bandă largă, cât și cu accelerometre. Motivația din spatele selecției posturilor este dublă. În primul rând, stațiile acoperă în prezent o zonă care a fost slab monitorizată înainte de 2013, când în NV orașului Galați a avut loc un roi seismic neobișnuit. În al doilea rând, distribuția accelerațiilor înregistrate de stațiile RSMN arată, după fiecare cutremur semnificativ cu magnitudine $M_L \geq 4,0$, valori mai mari pentru majoritatea stațiilor utilizate în studiu și situate în vecinătatea orașului Galați decât pentru aproximativ toate celelalte stații.

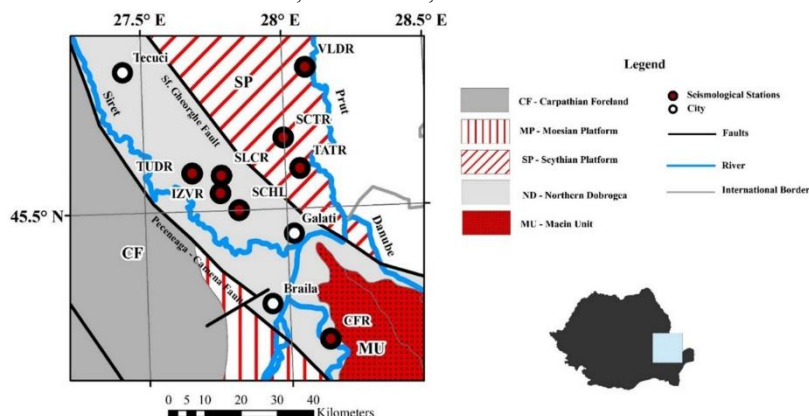


Figure 8.2 – Harta tectonică a zonei investigate (după Săndulescu, 1984) și stații seismice reprezentate cu puncte roșii. Sursa: *Greco et al., 2019*

Acest comportament este remarcat în *Anexa 8, Figura A8.2* care prezintă distribuția accelerațiilor maxime înregistrate de stațiile RSMN în timpul cutremurului din Vrancea din 2 august 2017 ($M_L = 4,9$, $H = 133$ km) și cutremurului din 16 august 2017, Galați ($M_L = 4,0$, $H = 11$ km). Stațiile RSMN operate de NIEP în zona de studiu erau rare înainte de 2013, existând o singură stație (CFR) în SE orașului Galați. În primăvara lui 2013, situația s-a schimbat, când

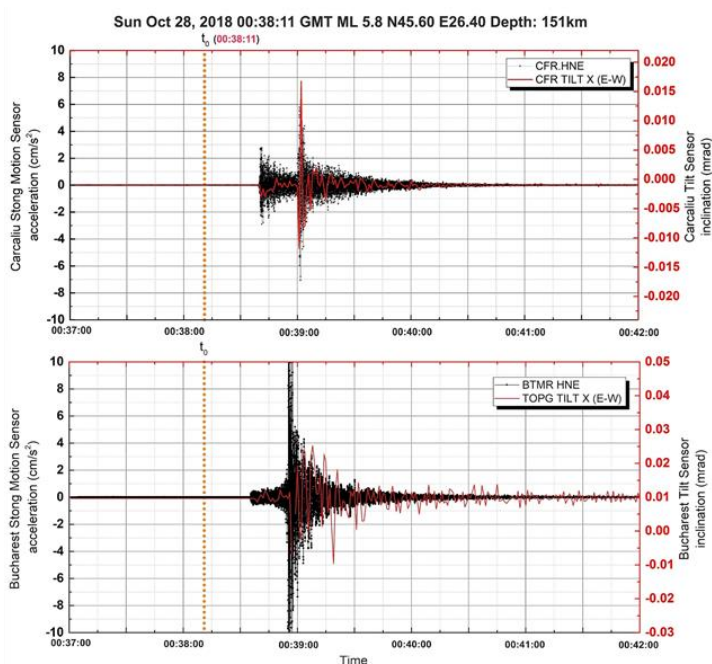
au mai fost instalate trei stații, una înainte și două în timpul roiului de la Galați. Rețeaua a fost modernizată cu o nouă stație în 2014 și încă două la mijlocul anului 2015 (**Figura 8.2**). În acest studiu au fost utilizate trei tipuri de date: de zgomot seismic, cutremur și înregistrări de date seismice active.

În plus, la analiza GPS, am luat în considerare înregistrările înclinometrelor și senzorii de accelerație și am testat sistemul VADASE. Înclinometrele care sunt utilizate în măsurătorile seismice sunt sensibile nu numai la mișcarea de translație, ci și la înclinare (**Graizer, 2016**). Această sensibilitate poate fi neglijată în studiile de măsurători în zone întinse de studiu, dar trebuie luată în considerare în studiile de accelerație în proximitate (de exemplu, cutremurele din Vrancea) deoarece poate introduce erori în măsurătorile continue de lungă durată, în special pentru calculul deplasărilor reziduale.

Deoarece senzorii verticali sunt mai puțin sensibili la înclinare, aceștia sunt potențial mai utili pentru calculele de deplasare reziduală și pe perioade lungi (**Graizer, 2005**). Luând acești factori în considerare, am decis să instalăm, să înregistrăm și să analizăm răspunsurile senzorilor de înclinație orizontală biaxială colocați în scopul realizării unei evaluări mai precise a impactului cutremurelor din Vrancea. Înclinometrele ne-au arătat că înregistrările senzorilor seismici, în aceste cazuri particulare, de mișcare puternică, sunt afectate proporțional de mișcarea implicată atât de sosirea undelor P, cât și a undelor S (**Figura 8.3**). Deși datele de înclinație sunt măsurate la 1 Hz, în comparație cu măsurarea la 100 Hz a accelerometrelor, informațiile lor sunt de încredere, așa cum se poate vedea în **Figura 8.3** și ar putea fi adăugate în analizele avansate ale erorilor înregistrărilor seismice.

În condiții normale spre favorabile, VADASE va scoate zgomot de viteză în componentele orizontale și verticale cu un σ de ordinul $1\sigma = 1$ mm/s, Est 3σ , Nord 5σ , Înălțime 8σ . În mod obișnuit, sensibilitatea minimă pentru algoritmul VADASE, viteza minimă detectată ar trebui să fie de 3,6 mm/s Est, 3,6 mm/s Nord, 8 mm/s Înălțime și viteza minimă recomandată pentru a fi utilizată pentru calculul precis al deplasării ar trebui să fie Est 8 mm/s, Nord 12 mm/s, Înălțime 20 mm/s (**Figura 8.4**). Pentru studiile noastre multisenzor și multidisciplinare, am avut senzori seismici de viteză și accelerometre colocați; în cazuri particulare, am avut câțiva senzori suplimentari: senzori atmosferici, magnetici, infrasunete, înclinație și/sau array. Începând din ianuarie 2019, din cauza recurențelor cu frecvență redusă a evenimentelor seismice puternice în zona Vrancea, am propus extinderea licențelor demo de testare VADASE pentru mai multe stații – 10 receptoare GR și pe o perioadă mai lungă de timp, de până la 12 luni. (**Năstase et al., 2020**)

Figure 8.3 – Liniile și punctele negre arată accelerația puternică a senzorului de accelerație de la Carcaliu (figura de sus) și București (figura de jos) la un interval de 5 minute. În partea de sus, linia roșie reprezintă înclinația înregistrată a senzorului de înclinație colocat. Linia punctată galbenă indică t_0 al cutremurului. Sursa: **Năstase et al., 2020**.



8.2 Filtrarea datelor

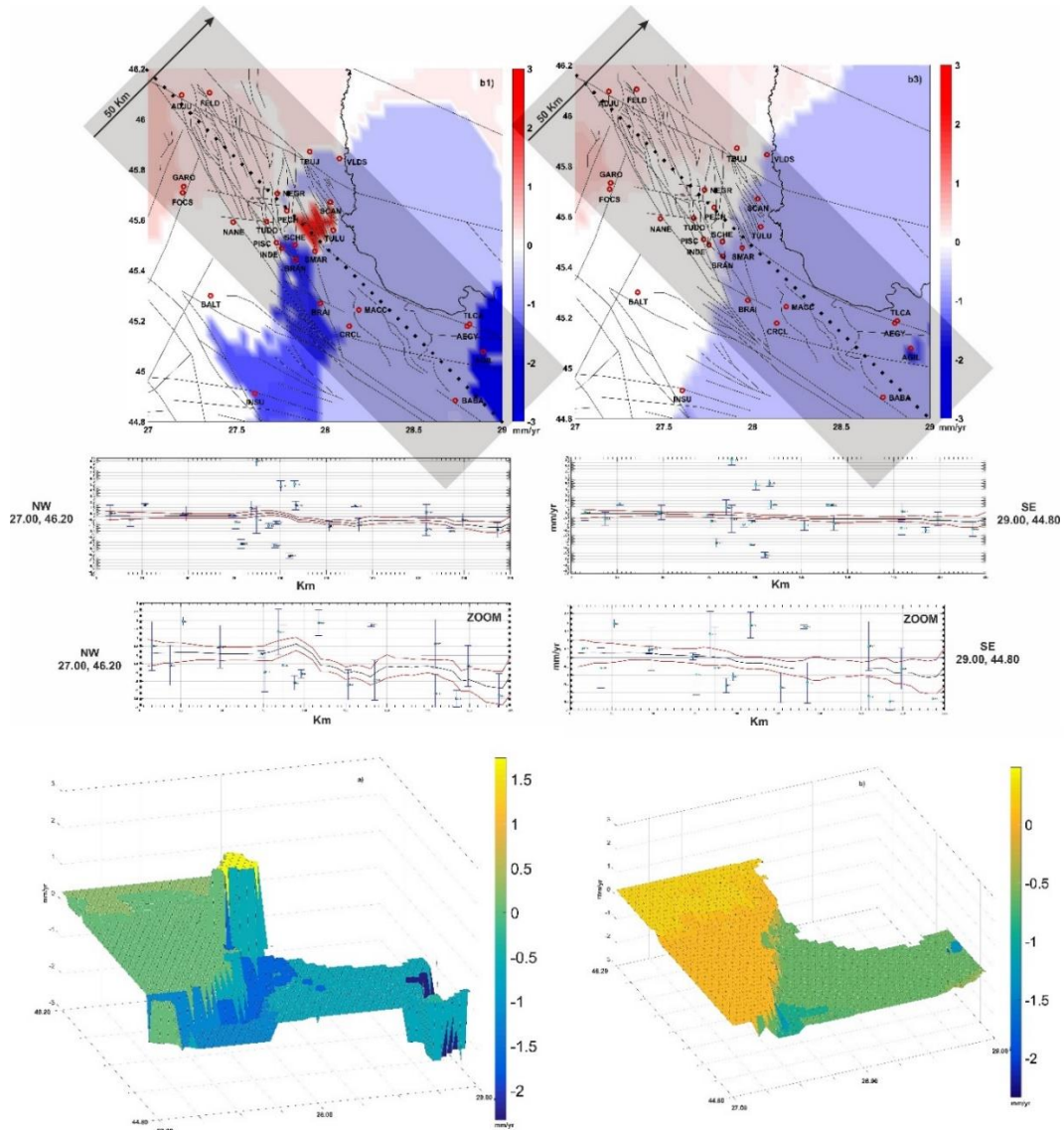


Figura 8.8 – Profil NV–SE peste rezultatele imagistice GPS brute ale câmpului de viteză verticală folosind vitezele MIDAS filtrate median spațial și rezultatele filtrate prin metoda bootstrapping. Punctele roșii reprezintă stațiile GPS. Scala de culori este în mm/an; pozitiv (roșu) reprezintă ridicare, iar negativ (albastru) reprezintă subsidență, saturată la limitele scalei de culoare. (Stânga) Doar stațiile permanente din zona de studiu (Dreapta) Toate stațiile disponibile. (În partea de jos) Reprezentări 3D ale ambelor rezultate. Sursa: Năstase et al., EGU 2019.

În statistică, metoda bootstrapping este orice test sau măsură care se bazează pe eșantionarea aleatorie cu înlocuire. Bootstrapping-ul permite alocarea unor măsuri de acuratețe (definite în termeni de deviație, varianță, intervale de încredere, eroare de predicție sau alte asemenea măsurători) aplicate eșantioanelor de măsurători. Această tehnică permite estimarea distribuției de eșantionare a aproape oricărei statistici folosind metode de eșantionare aleatoare. În general, se încadrează în clasa mai largă a metodelor de reeșantionare.

Metoda bootstrapping este practica de estimare a proprietăților unui estimator (cum ar fi varianța acestuia) prin măsurarea acelor proprietăți la eșantionarea dintr-o distribuție de aproximare. O alegere standard pentru o distribuție de aproximare este funcția de distribuție empirică a datelor observate. Dacă se poate presupune că un set de observații provine dintr-o populație independentă și distribuită identic, acest lucru poate fi implementat prin construirea unui număr de reeșantioane cu înlocuire a setului de date observat (și de dimensiune egală cu

setul de date observat). ([https://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_\(statistics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_(statistics))) Un mare avantaj al acestei metode este simplitatea sa. Este o modalitate simplă de a obține estimări ale erorilor standard și ale intervalelor de încredere pentru estimatorii complecși ai parametrilor distribuției, cum ar fi punctele de repartiție, proporțiile, raportul de cote și coeficienții de corelație. Metoda bootstrap este, de asemenea, o modalitate adecvată de a controla și verifica stabilitatea rezultatelor. Deși pentru majoritatea problemelor este imposibil să se cunoască adevăratul interval de încredere, bootstrap-ul este asimptotic mai precis decât intervalele standard obținute folosind varianța eșantionului și ipotezele de normalitate. Bootstrapping-ul este, de asemenea, o metodă convenabilă care evită costul repetării experimentului pentru a obține alte grupuri de date eșantioane. (<https://towardsdatascience.com/>)

8.4 Analiza semnalului, întârzierilor și perturbațiilor ionosferice

Analiza a patru evenimente seismice din România cu magnitudinea M_w 5,2 până la 6,0 prin utilizarea datelor TEC obținute din rețeaua de stații GPS de referință din România a arătat că fenomenele ionosferice precursore pot fi observate cu o zi sau cu până la câteva ore înainte de cutremurul crustal $M_w = 5,7$ și în apropiere de stațiile epicentrale, în timp ce anomaliiile preseismice TEC nu au fost identificate în cazul cutremurelor de adâncime sau de mică magnitudine și în timpul apariției unor furtuni geomagnetice majore (*Anexa 8, Figura A8.1*). De asemenea, acest studiu demonstrează că pentru a crește credibilitatea asupra prezenței fenomenelor precursore ionosferice asociate cu un cutremur și pentru a oferi concluzii mai sigure, este esențială aplicarea simultană a diferitelor tehnici precum Analiza de corelație încrucișată și Analiza spectrală. Rețeaua de stații GPS din România s-a dovedit un instrument util pentru investigarea fenomenelor ionosferice precursore asociate cu seismele. (*Năstase et al. 2016*)

Capitolul 9

Contribuții personale

Au trecut 6 ani de când s-au înființat diferite rețele de stații de referință GNSS și de campanie în zona NV Galați. În ultimul deceniu, am dezvoltat noi instrumente pentru a îmbunătăți observațiile și analiza cutremure, tectonica activă și hazardul seismic în regiuni cu deformare litosferică lentă precum aceasta. Îmbunătățirile în poziționarea precisă a punctelor (PPP), detecția cycle-slip și alte întreruperi pe toate constelațiile, frecvențele și semnalele, raportul semnal-zgomot al fazei purtătoare, metodele de filtrare ne-au determinat să obținem poziții îmbunătățite și mai fiabile de la combinația omogenă a tuturor rețelelor. Teza prezintă o analiză a tuturor datelor RINEX disponibile procesate cu ajutorul software-ului GIPSY, cu viteze 3D derivate de algoritmul „MIDAS” (Median Interannual Difference Adjusted for Skewness). Am analizat mișcarea plăcii și ratele de deformare derivate de algoritmul „MELD” (Estimarea medie a deformației locale), care funcționează deosebit de bine pentru a prelua semnalul seriilor de timp de lungă durată a tensiunilor crustale în zonele cu deformare scăzută. De asemenea, am analizat mișcarea verticală a terenului derivată prin tehnica GPS Imaging, care folosește un filtru spațial median. Mai multe studii geofizice sunt disponibile datorită unei analize combinate Double Difference și PPP, care arată două zone distincte aparținând faliei Sf. Gheorghe. O zonă este legată de blocul tectonic de nord-est și prezintă o mișcare de ridicare; cealaltă este legată de blocul tectonic de sud-vest, unde toate vitezele au avut un trend negativ.

Experiența de teren

Experiența și certificările mele în domeniul GNSS acoperă instalarea și întreținerea echipamentelor, achiziția și prelucrarea de date. Fenomenul de roi seismic din NV Galați, 2013, nu este unic în România; se întâlnește și în regiunile seismice ale avanfosei Curburii Carpaților sau în regiunea Sinaia. În România însă, din datele instrumentale, roiul seismic de la Galați a fost semnificativ mai mare, atât ca durată, cât și ca număr de evenimente, în comparație cu roiurile seismice similare. Odată cu amplasarea de echipamente seismice portabile în zona de studiu de către NIEP – Institutul Național pentru Fizica Pământului (echipamente instalate în

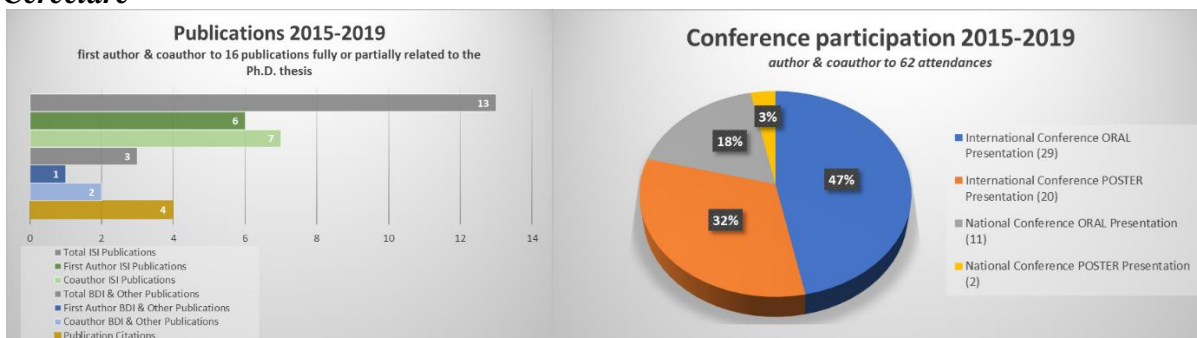
scopul creșterii calității localizării și înregistrării evenimentelor de amplitudine redusă), am instalat șapte puncte de măsurare GPS de campanie (**Figura 9.2**). Scopul lor principal a fost și continuă să fie acela de a determina viteza de deformare a crustei și direcția acelor deformații în zona de studiu. Între timp, din datele colectate au apărut și alte studii secundare. Așezarea stațiilor de campanie s-a realizat în mod omogen, prin amplasarea acestora în apropierea zonei seismice active, având ca stații de referință cele trei stații GNSS permanente: Carcaliu, Tudor Vladimirescu și Vlădești.

În calitate de cercetător științific și expert în domeniu responsabil de rețeaua de stații GNSS/GPS, operez în prezent (în ceea ce privește dezvoltarea, întreținerea, achiziția și analiza datelor) un număr de 30 de stații în timp real. (**Figura 9.3**)

Expertiza de laborator

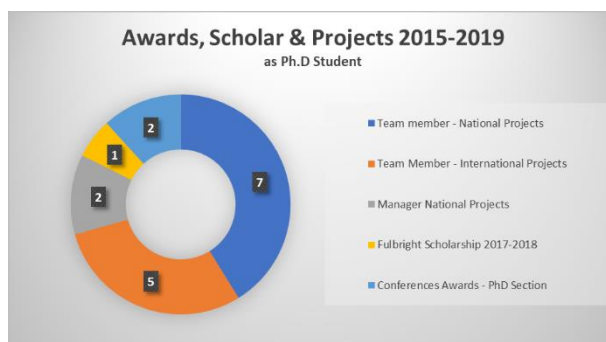
Expertiza mea variază de la analizarea datelor până la modelarea și interpretarea mișcărilor crustei, modelarea blocurilor cu scopul de a înțelege riscul seismic și diverse aspecte ale determinării mișcării absolute a plăcilor din planul de referință geodezică. În calitate de fost cercetător vizitator Fulbright și colaborator al Universității din Nevada, Reno, SUA, în anul universitar 2017-2018 am fost găzduit de Laboratorul de Geodezie satelitară Nevada (NGL) unde am procesat și analizat date de la > 18.000 de stații GPS din întreaga lume. Cercetarea mea s-a axat pe geodezia spațială, inclusiv dezvoltarea rețelei GPS, analizarea datelor, modelarea și interpretarea științifică a mișcărilor crustei și cuprinde 1) o analiză a tensiunilor crustale și a potențialului de declanșare a faliiilor cu scopul de a înțelege riscul seismic și dinamica litosferei, 2) interpretarea mișcării verticale a terenului pentru a înțelege formarea munților, creșterea relativă a nivelului mării și ajustarea izostatică glaciară și 3) diverse aspecte ale cadrului de referință geodezic și mișcărilor plăcilor tectonice. În calitate de cercetător științific și expert în domeniu responsabil de rețeaua de stații GNSS/GPS, operez în prezent (în ceea ce privește dezvoltarea, întreținerea, achiziția și analiza datelor) un număr de 30 de stații în timp real. (**Figura 9.3**)

Cercetare



9.1 Concluziile tezei de doctorat:

- Roiul seismic înregistrat pe parcursul a trei luni în zona de nord-vest a orașului Galați a fost destul de anormal datorită numărului de evenimente și activități în acest interval de timp. Deși zona este activă din punct de vedere tectonic, proximitatea unui câmp de exploatare petrolieră pe termen lung a pus problema unui posibil efect declanșator al acestor activități antropice. Întrebarea a fost imperativă nu numai pentru oamenii de știință, ci și pentru mass-media, care i-a presat

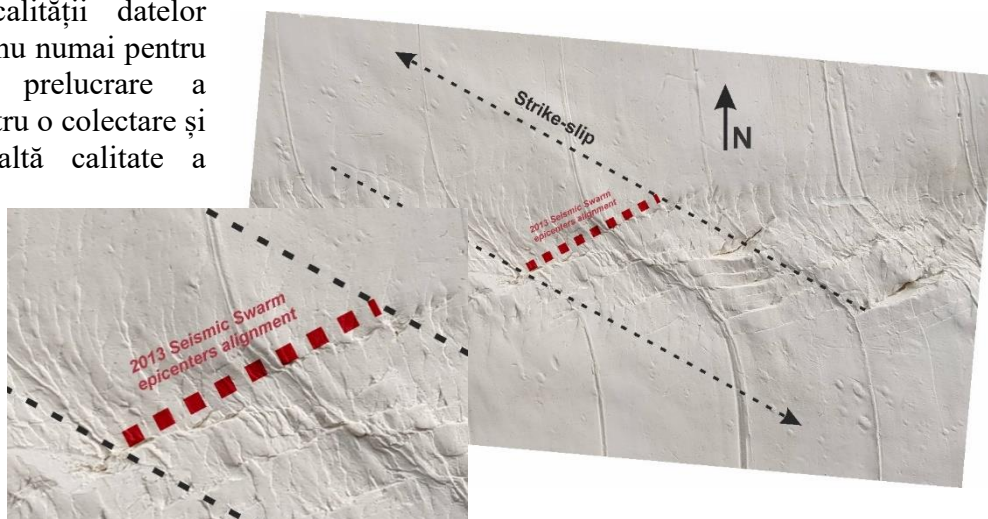


pe seismologi să ofere un răspuns bine justificat. Cu toate acestea, o mulțime de întrebări legate de posibilele mecanisme care stau la baza acestei activități seismotectonice complexe rămân fără răspuns.

- Roiul seismic este foarte neobișnuit pentru zona Galați prin scara sa (magnitudine și durată), dacă ne referim la datele disponibile din catalogul nostru seismic (www.infp.ro). Epicentrele acestui roi seismic sunt aliniate pe o direcție NE–SV, cu o adâncime focală a evenimentelor care variază de la 1 la 27 km, majoritatea în proporție de 90% fiind situate în intervalul de adâncime 1–10 km. Această distribuție spațială a epicentrelor este paralelă cu cele două falii transversale situate la NV de zona epicentrală a roiului seismic (forfecare și falieri normală și perpendiculară pe sistemul de falii dominant pe direcție NE–SV, între falia Sf. Gheorghe din partea de nord și Peceneaga-Camena în partea de sud, în timp ce falia Pechea traversează roiul seismic pe diagonală). Roiul seismic din 2013 este considerat cel mai reprezentativ dintre roiurile seismice care s-au produs pe teritoriul României și care nu au implicații în evaluarea riscului seismic din zona Galați.
- Deși știm că din punct de vedere geodinamic regiunea este capabilă să genereze cutremure mici până la moderate, există totuși nevoia de a explica particularitățile bine definite ale distribuției seismicității în spațiu și timp și ale mecanismelor focale asociate așa cum au fost evidențiate de această analiză. Rolul jucat de creșterea difuziei presiunii porilor ca factor declanșator ar trebui investigat în continuare. Până acum, rezultatele adunate sugerează că componenta tectonică este principala responsabilă pentru acest proces complex.
- Cutremurele crustale din zona de studiu nu reprezintă un eveniment singular, ci fac parte din seismicitatea înregistrată în mod normal în zona activă Dobrogea de Nord: neobișnuită a fost intensitatea seismicității și combinarea cu un alt hazard natural care s-a produs concomitent (cantități mari de precipitații), factori ce au crescut impactul emoțional asupra populației. (*Besutiu et al., 2019*)
- Roiul seismic din 2013 s-a produs în principal într-o structură locală, foarte fragmentată, asemănătoare grabenului, amplasată transversal pe întregul versant descendent de NV al Promontoriului Dobrogea de Nord, în fața fundamentului Pechea-Izvoarele. Structura presupusă include mai multe compartimente locale ridicate/coborâte create de sisteme de falii de diferite tipuri care amplifică potențialul seismic și pot justifica marea varietate de soluții de falieri observate. (*Besutiu et al., 2019*)
- Trebuie menționat că structura asemănătoare grabenului a fost conturată prin inversarea datelor gravitaționale și geomagnetice de până la 10 km adâncime într-un volum în care au fost detectate 90% din hipocentrele cutremurelor. Mai adânc, amploarea fenomenului a fost doar presupusă. Prezența structurii locale foarte predispuse la seism nu exclude apariția cutremurelor de-a lungul altor falii regionale ale Promontoriului Nord Dobrogea, dar ar putea explica focarul roiului Galați-Izvoarele în acea regiune restrânsă. (*Besutiu et al., 2019*)
- Roiul Galați-Izvoarele a fost cauzat în principal de o intensificare neobișnuită a forțelor tectonice în avanfosa Carpaților de SE, bine reflectată de creșterea ratei de alunecare a faliei Peceneaga-Camena înregistrată la Observatorul Geodinamic Baspunar. Nu există cercetări suficiente pentru a clarifica mecanismul geodinamic din spatele creșterii stresului. (*Besutiu et al., 2019*)
- Principalele cutremure din roiul Galați-Izvoarele nu își au originea în lucrările de explorare/extracție a petrolului. Deși fracturarea ar putea declanșa unele evenimente seismice de mică magnitudine în învelișul sedimentar, la nivelul exploatării petrolului,

stresul generat nu se poate propaga în jos în subsol, unde se află majoritatea hipocentrelor, datorită acțiunii presiunii litostatice. (*Besutiu et al., 2019*)

- Regiunea Galați-Izvoarele trebuie privită ca o zonă predispusă la seism și orice creștere semnificativă viitoare a stresului tectonic în crustă ar putea genera noi secvențe seismice.
- Am descris estimarea deplasărilor datorate undelor seismice utilizând o combinație optimă de date GPS de frecvență mare și date de accelerație cu nivele biaxiale colocate.
- Această teză își propune să explice în mod detaliat o serie de probleme și oferă câteva direcții pentru lucrări viitoare care implică senzori seismologici netradiționali, cum ar fi GPS și înclinometre. (vezi și *Anexa 9, Figura A9.1*)
- Comparând toate cele trei componente ale formelor de undă de deplasare estimate doar din GPS cu cele estimate utilizând un filtru de netezire, pentru diverse stații colocate, am ajuns la concluzia conform căreia calitatea semnalului se îmbunătățește semnificativ utilizând cea de-a doua metodă.
- Combinația optimă a deplasărilor GPS cu datele de accelerație oferă avantaje distincte. Sosirile undelor P au putut fi detectate în soluția combinată pentru multe cutremure puternice de pe tot globul, datorită preciziei mai mari a accelerometrelor.
- Spre deosebire de metoda combinată, abordarea numai prin GPS nu a detectat sosirea undei P din cauza sensibilității reduse a GPS-ului pentru a monitoriza mișcările verticale. Detectarea undei P este critică pentru o avertizare timpurie a unui cutremur, deoarece permite predicția sosirii undei S distructive. Am remarcat că există anumite limitări în ce privește estimarea în timp real a deplasărilor cu ajutorul datele GPS, dar am dovedit că rețeaua noastră GNSS este capabilă și pregătită pentru astfel de analize și pentru a aduce contribuții suplimentare la Rețeaua Seismică Națională în cazul nefericit al unei cutremur major din Vrancea care afectează teritoriul României.
- Am mers mai departe aplicând un filtru pentru a obține o combinație optimă de date de la stațiile GPS de frecvență mare și de la accelerometrele colocate, care profită de punctele forte și minimizează punctele slabe ale ambelor tipuri de date. Acest lucru a dus la o nouă metodologie de furnizare a seriilor temporale de deplasare cu precizie de milimetru/centimetru care poate fi utilizată pentru o evaluare mai bună a sursei seismice.
- Această analiză asigură o evaluare eficientă a locației și ne ajută să selectăm cea mai bună locație pentru stațiile noastre de referință/campanie. Le folosesc pentru a evalua codurilor și reflexiilor de tip multipath, pentru a verifica interferența RF și atenuarea semnalului, pentru a măsura calitatea și integritatea datelor și multe altele, cum ar fi controlul calității pentru verificarea cantității (informații de urmărire, întreruperi de date), a calității („cycle slips”, reflexii multiple, SNR) și formatul (conformitatea cu standardul RINEX) al datelor GNSS colectate.
- Monitorizarea calității datelor oferă informații nu numai pentru activitățile de prelucrare a datelor, ci și pentru o colectare și arhivare de înaltă calitate a datelor de către furnizori individuali sau de către servicii științifice precum



Institutul Național pentru Fizica Pământului (NIEP).

- Pentru rețeaua de stații de referință GNSS pe care o operează și pentru că generează o cantitate mare de date, o analiză detaliată nu este posibilă fără instrumente sofisticate de analiză și raportare. Prin urmare, am generat o gamă de rapoarte bazate pe HTML, pagini web (repozitoriu de date și disponibilitatea pe <http://gps.infp.ro>), grafice și distribuția calității datelor pentru produsele din date brute obținute de la rețeaua de referință pentru a urmări mai multe investigații detaliate.
- După ce am analizat întregul set de date, una dintre cele mai utile concluzii la care am ajuns este că, pentru unele locații, trebuie să folosesc ambaze (sau sisteme de centrare forțată) de cupru pentru măsurătorile de campanie pentru a elimina erorile datorate reflexiilor multiple și pentru a reduce SNR pentru unghiuri de elevație mai mici.
- Prezentul studiu evidențiază efectele importante pe care le pot induce activitățile umane, cu impact asupra evaluării hazardurilor la scară locală. Pentru a obține o modelare consistentă și fiabilă a acestor efecte, a fost crucială dezvoltarea unor sisteme de monitorizare continuă în zonele vulnerabile, precum cele investigate în studiul de caz al tezei și senzorii seismici în combinație cu analiza multi-parametrică corelată cu activitățile umane și folosind sisteme GIS. Mai mult, creșterea rezoluției pentru studiile coseismice și investigațiile comparative necesită frecvențe considerabil mai mari, de până la 20 Hz, pentru procesarea semnalului GPS și corecții adecvate (în cazul influențelor TEC, anomaliilor ionosferice etc.).
- În urma analizei deplasărilor 3D care au fost observate la stația de campanie IZVO, putem recunoaște stabilitatea centrului de fază al antenei atât înainte, cât și după eveniment; între timp se subliniază cu ușurință mișcarea provocată de seism, amplitudinea, direcția și durata acestuia.
- Din rezultatele preliminare care menționează vectorii de deplasare și de direcție în cadrul zonei de studiu, putem concluziona că valorile obținute sunt normale pentru rata de deplasare a scoarței terestre observată la nivel național și putem observa două tendințe distincte grupate de deplasare verticală, care pot fi explicate de existența unei falii de separare între cele două. (**Figura 9.5**)
- Am analizat mișcarea verticală a terenului derivată cu tehnica GPS Imaging, care folosește un filtru spațial median. O varietate de studii geofizice sunt acum posibile datorită unei analize combinate de Double Difference și PPP, care arată două zone distincte care aparțin faliei Sf. Gheorghe. O zonă este legată de blocul tectonic de Nord-Est și prezintă o mișcare de ridicare; cealaltă este legată de blocul tectonic de Sud-Vest, unde toate vitezele au avut un trend negativ. (**Figura 9.6**)

În încheiere, aș dori să rezum cele mai recente rezultate și principalele rezultate ale tezei:

- Zona seismogenă NV Galați este o zonă relativ mică, cu o structură tectonică foarte complexă și puternic fracturată la nivel crustal;
- Deformațiile verticale sunt clar structurate în trepte de la NV la SE, începând cu o zonă de ridicare, urmată de o zonă stabilă care se suprapune pe aliniamentul roiului seismic Galați, care se sfârșește cu o zonă de tasare care merge mai departe spre SE (Dunăre-Deltă-Marea Neagră) ;
- Deformațiile orizontale și valorile tensiunilor crustale pot fi, de asemenea, separate în trei zone distincte, dar de data aceasta trebuie să privim de la SV la NE. Pornind de la SV, se vede o zonă de dilatare clară, urmată de o zonă de forfecare, perpendiculară pe aliniamentul roiului seismic Galați, și continuă spre NE cu un comportament de contractare. (**Figura 9.6**)

Studiu integrat, GNSS și seismotectonic al ariei seismogene NV Galați

Universitatea din București, Facultatea de Geologie și Geofizică – 2021

Năstase Ilie Eduard

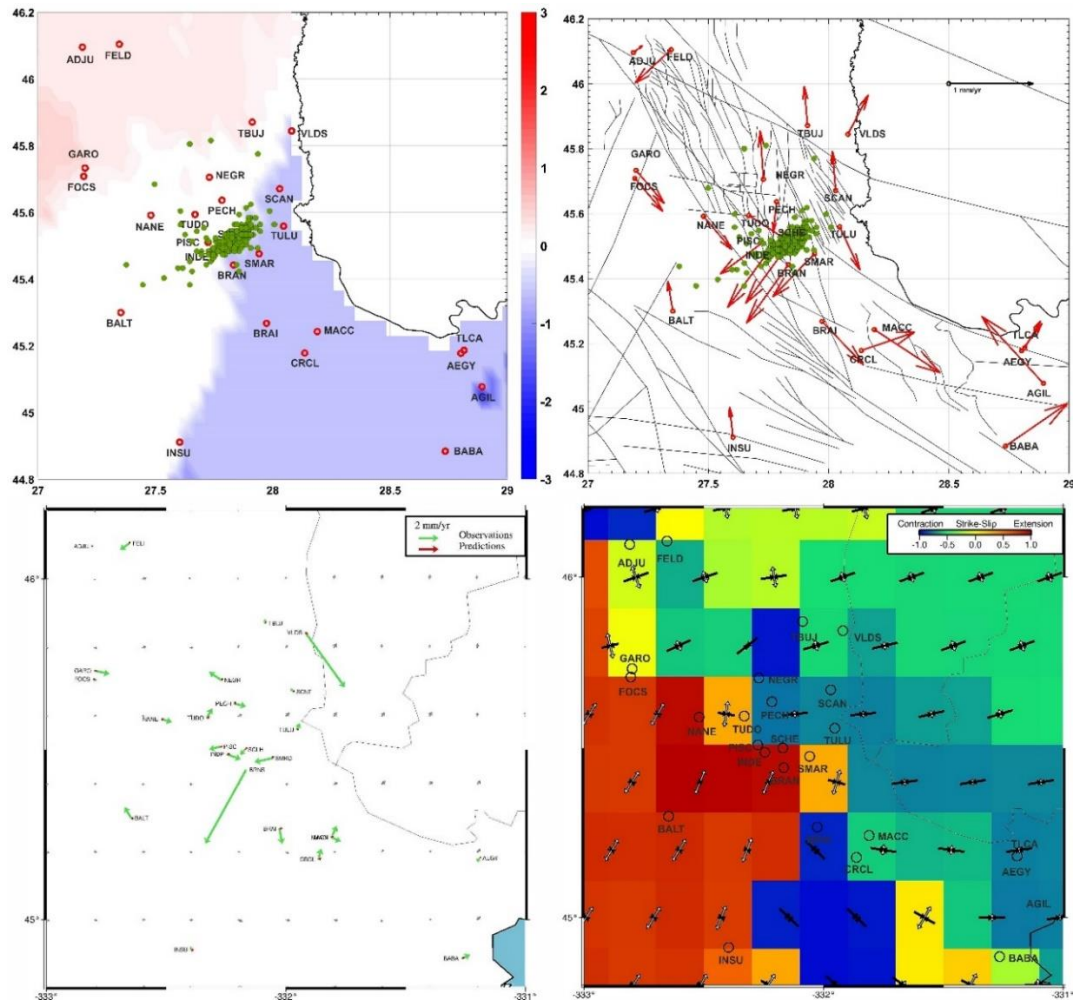


Figura 9.6 – Rezultatele finale ale tezei de doctorat

Mulțumiri:

Coordonator,
Prof. Dr. Victor Mocanu

Colaboratori,

Dr. Alexandra Muntean, Prof. Ir. Boudewijn Ambrosius, Dr. Constantin Ionescu, Dr. Dragoș Tătaru, Dr. Bogdan Grecu, Dr. Dragoș Toma-Dănilă, Dr. Sorin Nistor, Prof. Dr. Cornel Paunescu, Prof. Dr. William Hammond, Prof. Dr. Corne Kremer, Prof. Dr. Geoffrey Blewitt, Dr. Christina Oikonomou, Dr. Haris Haralambous, Eng. Viorel Pîrvu

Instituții,

The University of Bucharest, Faculty of Geology and Geophysics, Doctoral School of Geology
National Institute for Earth Physics, TopGeocart, GeoEcoMar, University of Nevada, Reno, US – Nevada Geodetic Laboratory
Tuturor instituțiilor naționale ce ne-au facilitat accesul în zona de studiu.

Finanțare,

Comisia Fulbright Româno-Americană și tuturor proiectelor naționale și internaționale care mi-au finanțat cercetarea și studiul tezei.

Bibliografie selectată

- Aki K, Richards PG (1980) Quantitative seismology, theory and methods, Vol. I and II. W.H. Freeman, San Francisco
- Altamimi Z., Collilieux X., Metivier L., (2011) ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame, *J Geodesy*, 85(8),457–473
- Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier, and X. Collilieux. 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121(8):6109-6131.
- Altamimi, Z., P. Rebischung, X. Collilieux, L. Métivier, and K. Chanard. 2019. Review of reference frame representations for a deformable Earth. *International Association of Geodesy Symposia*, pp. 1-6. https://doi.org/10.1007/1345_2019_66.
- Ambrosius B.A.C., Van der Hoeven A.G.A., Mocanu V., Munteanu L., Spakman W., Schmitt G. (2005) Ten Years of GPS Observations in Romania, *J. Balkan Geophys. Soc.*, 8, 197 – 200
- Andrews, R. D. and A. Holland (2015). Statement on Oklahoma seismicity, *Oklahoma Geological Survey*, 2 p.
- Aoki, Y., and C. H. Scholz (2003), Vertical deformation of the Japanese islands, 1996–1999, *J. Geophys. Res.*, 108(B5), 2257, doi:10.1029/2002JB002129
- Atanasiu, I. (1961). The earthquakes in Romania (in Romanian), Ed. Academiei, Bucharest, pp. 194.
- Bala, A., V. Raileanu, C. Dinu, M. Diaconescu (2015). Crustal seismicity and active fault systems in Romania, *Romanian Reports in Physics*, 67, 1176-1191.
- Besutiu, L. (2001). Vrancea active seismic area: a continental unstable triple junction?, *Rev. Roum. Geophys.*, 45, 59-72.
- Besutiu, L., Diaconescu, M., Zlăgnea, L. et al. *Pure Appl. Geophys.* (2019) 176: 65. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1956-0>
- Blewitt, G., (1990), An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, Vol. 17, No. 3, p. 199-202
- Blewitt, G., C. Kreemer, W. C. Hammond, and J. Goldfarb (2013), Terrestrial reference frame NA12 for crustal deformation studies in North America, *J. Geodyn.*, 72, 11–24, doi:10.1016/j.jog.2013.08.004.
- Blewitt, G., C. Kreemer, W.C. Hammond, and J.M. Goldfarb (2013), “Terrestrial reference frame NA12 for crustal deformation studies in North America”, *J. Geodyn.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2013.08.004>
- Blewitt, G., C. Kreemer, W. C. Hammond, and J. Gazeaux (2016), MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 2054–2068, doi:10.1002/2015JB012552
- Bock, Y., and D. Melgar. 2016. Physical applications of GPS geodesy: A review. *Reports on Progress in Physics* 79(10):106801
- Calais, E., J. Y. Han, C. DeMets, and J. M. Nocquet (2006b), Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, 111, B06402, doi:10.1029/2005JB004253
- Calais, E., L. Dong, M. Wang, Z. Shen, and M. Vergnolle (2006a), Continental deformation in Asia from a combined GPS solution, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24319, doi:10.1029/2006GL028433
- Castleman, K. R. (1996), *Digital Image Processing*, pp. 667, Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J.
- Chlieh, M., H. Perfettini, H. Tavera, J.-P. Avouac, D. Remy, J.-M. Nocquet, F. Rolandone, F. Bondoux, G. Gabalda, and S. Bonvalot (2011), Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166
- Cloetingh, S. A. P. L., Burov, E., Matenco, L., Toussaint, G., Bertotti, G., Andriessen, P. A. M., et al. (2004). Thermo-mechanical controls on the mode of continental collision in the SE Carpathians (Romania). *Earth and Planetary Science Letters*, 218(1-21), 57–76. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00645-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00645-9)
- Conrad, C. P. (2013), The solid Earth’s influence on sea level, *GSA Bull.*, 125(7/8), 1027–1052, doi:10.1130/B30764.1
- Constantinescu, L. and D. Enescu (1984). A tentative approach to possibly explaining the occurrence of the Vrancea earthquakes, *Rev. Roum. Geol., Geophys., Geogr., Ser Geophys.*, 28, 19-32.
- Cormen, T. H., C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein (2001), *Introduction to Algorithms*, MIT Press, Cambridge, Mass., isbn:9780262032933
- Craiu, A., Craiu, M., Diaconescu, M. et al. *Acta Geod Geophys* (2017) 52: 53). <https://doi.org/10.1007/s40328-016-0161-9>
- D’Agostino, N., & McKenzie, D. (1999). Convective support of long-wavelength topography in the Apennines (Italy). *Terra Nova*, 11(5), 234–238. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.1999.00252.x>
- Demetrescu, C., H. Wilhelm, M. Tumanian, S. B. Nielsen, A. Damian and V. Dobrică (2007). Time-dependent thermal state of the lithosphere in the foreland of the Eastern Carpathians bend. Insights from new geothermal measurements and

- modelling results, *Geophysical Journal International*, 170, 896-912.
- DeMets, C., R. G. Gordon, and D. F. Argus (2010), Geologically current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 181(1), 1–80, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x
- Enescu, D. (1980). Contributions to the knowledge of the focal mechanism of the Vrancea strong earthquakes of March 4, 1977, *Rev Roum. Géol Géophys Géogr Ser. Géophys.*, 24, 3-18.
- Enescu, D. (1992). Lithosphere structure in Romania. I. Lithosphere thickness and average velocities of seismic waves P and S. Comparison with other geophysical data, *Rev. Roum. Phys.*, 37, 623-639.
- Enescu, D. and B. D. Enescu B.D. (1993). Contributions to the knowledge of the genesis of the Vrancea (Romania) earthquakes, *Romanian Reports in Physics*, 45, 777 - 796.
- Faccenna, C., Becker, T. W., Miller, M. S., Serpelloni, E., & Willett, S. D. (2014). Isostasy, dynamic topography, and the elevation of the Apennines of Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 407, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.027>
- Fanis M, Stathis S. (2015) PLL bandwidth and noise in 100 Hz GPS measurements. *GPS Solutions*;19:173-185. DOI: 10.1007/s10291-014-0378-4
- Ganas, A., A. Marinou, D. Anastasiou, D. Paradissis, K. Papazissi, P. Tzavaras, and G. Drakatos (2013), GPS-derived estimates of crustal deformation in the central and north Ionian Sea, Greece: 3-yr results from NOANET continuous network data, *J. Geodyn.*, 67, 62–71, doi: 10.1016/j.jog.2012.05.010
- Gheorghe M., Iuliana Armaș, Eduard-Ilie Năstase, Alexandra Munteanu: “Potential of InSAR monitoring for seismic areas in Romanian”; *GeoPatterns*, Vol. 3, Issue 1, April 2018, pp. 23-31, <https://doi.org/10.5719/GeoP.3.1/4>
- Ghițău D., Gavrilăscu M., Nacu V., Dumitrașcu D., Năstase F., Mateciuc D. (2003) National Progress Report of Romania for CERGOP, for the 2nd CERGOP-2/Environment Working Conference, Warsaw, Poland, 2003.
- Ghoddousi-Fard R. (2017) Impact of receiver and constellation on high rate GNSS phase rate measurements to monitor ionospheric irregularities. *Advances in Space Research.*; 60(9):1968-1977
- Gillian R. Foulgera, Miles P. Wilsona, Jon G. Gluyasa, Bruce R. Juliana, Richard J. Daviesb (2018) Global review of human-induced earthquakes, *Earth-Science Reviews* 178 (2018) 438–514
- Göğüş, O. H., Pysklywec, R. N., & Faccenna, C. (2016). Postcollisional lithospheric evolution of the Southeast Carpathians: Comparison of geodynamical models and observations. *Tectonics*, 35, 1205–1224. <https://doi.org/10.1002/2015TC004096>
- Gourmelen, N., and F. Amelung (2005), Postseismic mantle relaxation in the Central Nevada Seismic Belt, *Science*, 310, 1473–1476.
- Graizer V., Tilts in Strong Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (6), 2090–2102 (2016)
- Grecu B., Bogdan Zaharia, Mihai Diaconescu, Andrei Bala, Eduard Nastase, Eduard Constantinescu, Dragos Tataru; “Characterization of site conditions for selected seismic stations in eastern part of Romania”; *Springer Journals Acta Geophysica*, Volume: 66 Issue: 2 Pages: 153-165, DOI: 10.1007/s11600-018-0117-2, Published: APR 2018, WOS:000429557400004
- Grecu B., Cristian Neagoe, Raluca Partheniu, Eduard Nastase, Bogdan Zaharia; “New seismic noise model for Romania”, Conference paper: 17th International Multidisciplinary Scientific Conference SGEM, At Albena, Bulgaria, Volume: III, 2017
- Gutenberg B, Richter CF (1944) Frequency of earthquakes in California. *Bull Seismol Soc Am* 34:185–188
- Gvirtzman, Z. (2002). Partial detachment of a lithospheric root under the southeast Carpathians: Toward a better definition of the detachment concept. *Geology*, 30(1), 51–54. [https://doi.org/10.1130/0091-613\(2002\)030<0051:PDOALR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-613(2002)030<0051:PDOALR>2.0.CO;2)
- Hainzl S., T. Kraft, J. Wassermann, H. Igel, and E. Schmedes (2006) Evidence for rainfall-triggered earthquake activity, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 33, L19303, doi:10.1029/2006GL027642
- Hainzl, S., and Y. Ogata (2005), Detecting fluid signals in seismicity data through statistical earthquake modeling, *J. Geophys. Res.*, 110, B05S07, doi:10.1029/2004JB003247
- Hamlington, B. D., P. Thompson, W. C. Hammond, G. Blewitt, and R. D. Ray (2016), Assessing the impact of vertical land motion on 20th century global mean sea level estimates, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 4980–4993, doi:10.1002/2016JC011747
- Hammond, J. O. S., J.-M. Kendall, G. Rumpker, J. Wookey, N. Teanby, P. Joseph, T. Ryberg, and G. Stuart (2005), Upper mantle anisotropy beneath the Seychelles microcontinent, *J. Geophys. Res.*, 110, B11401, doi:10.1029/2005JB003757.
- Hammond, W. C., and W. Thatcher (2004), Contemporary tectonic deformation of the Basin and Range province, western United States: 10 years of observation with the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 109, B08403, doi:10.1029/2003JB002746.

- Hammond, W. C., and W. Thatcher (2005), Northwest Basin and Range tectonic deformation observed with the Global Positioning System, 1999–2003, *J. Geophys. Res.*, 110, B10405, doi:10.1029/2005JB003678
- Hammond, W. C., and W. Thatcher (2007), Crustal deformation across the Sierra Nevada, northern Walker Lane, Basin and Range transition, western United States measured with GPS, 2000–2004, *J. Geophys. Res.*, 112, B05411, doi:10.1029/2006JB004625
- Hammond, W. C., G. Blewitt, and C. Kreemer (2011), Block modeling of crustal deformation of the northern Walker Lane and Basin and Range from GPS velocities, *J. Geophys. Res.*, 116, B04402, doi:10.1029/2010JB007817
- Hammond, W. C., G. Blewitt, Z. Li, H.-P. Plag, and C. Kreemer (2012), Contemporary uplift of the Sierra Nevada, western United States, from GPS and InSAR measurements, *Geology*, 40, 667–670, doi:10.1130/G32968.1
- Hauser, F., Raileanu, V., Fielitz, W., Dinu, C., Landes, M., Bala, A., & Prodehl, C. (2007). Seismic crustal structure between the Transylvanian Basin and the Black Sea, Romania. *Tectonophysics*, 430(1-4), 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.10.005>
- Hauser, F., V. Răileanu, W. Fielitz, A. Bala, C. Prodehl, G. Polonic and A. Schulze (2001). VRANCEA99 – The Crustal structure beneath the southeastern Carpathians and the Moesian Platform from a refraction seismic profile in Romania, *Tectonophysics*, 340, 233 -256.
- Ismail-Zadeh, A., Mueller, B., & Schubert, G. (2005). Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the earthquake-prone Southeastern Carpathians based on integrated analysis of seismic, heat flow, and gravity data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 149(1-2), 81–98. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.08.012>
- Ismail-Zadeh, A.T., G. F. Panza, B. M. Naimark, B.M. (2000). Stress in the descending relic slab beneath the Vrancea region, Romania, *Pure and Applied Geophysics*, 157, 111-130.
- Knapp, J. H., C. C. Knapp, V. Răileanu, L. Mațenco, V. Mocanu and C. Dinu. (2005). Crustal constraints on the origin of mantle seismicity in the Vrancea Zone, Romania: The case for active continental lithospheric delamination, *Tectonophysics*, 410, 311-323.
- Kodaira, S., T. Idaka, A. Kato, J. Park, and Y. Kaneda (2004), High pore pressure may cause silent slip in the Nankai Through, *Science*, 304, 1295 – 1298
- Koulakov, I., Kaban, M. K., Tesauero, M., & Cloetingh, S. (2009). P and S velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data. *Geophysical Journal International*, 179(1), 345–366. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04279.x>
- Kreemer, C. (2009), Absolute plate motions constrained by shear wave splitting orientations with implications for hot spot motions and mantle flow, *J. Geophys. Res.*, 114, B10405, doi:10.1029/2009JB006416
- Kreemer, C., and R. G. Gordon (2014), Pacific plate deformation from horizontal thermal contraction, *Geology*, 42(10), 847–850.
- Kreemer, C., and W. E. Holt (2001), A no-net-rotation model of present-day surface motions, *Geophys. Res. Lett.*, 28(23), 4407–4410, doi:10.1029/2001GL013232
- Kreemer, C., D. A. Lavallee, G. Blewitt, and W. E. Holt (2006), On the stability of a geodetic no-net-rotation frame and its implication for the International Terrestrial Reference Frame, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17306, doi:10.1029/2006GL027058
- Kreemer, C., E. Klein, Z-K Shen, M. Wang, L. Estey, S. Wier, F. Boler (2014) Global geodetic strain rate model, *Geological, earthquake and geophysical data*
- Kreemer, C., G. Blewitt, and R. A. Bennett (2010b), Present-day motion and deformation of the Colorado Plateau, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L10311, doi:10.1029/2010GL043374
- Kreemer, C., G. Blewitt, and W. C. Hammond (2010a), Evidence for an active shear zone in southern Nevada linking the Wasatch fault to the Eastern California shear zone, *Geology*, 38(5), 475–478, doi:10.1130/G30477.1
- Kreemer, C., Hammond, W. C., & Blewitt, G. (2018). A robust estimation of the 3-D intraplate deformation of the North American plate from GPS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 4388–4412. <https://doi.org/10.1029/2017JB015257>
- Kreemer, C., J. Haines, W. Holt, G. Blewitt, and D. Lavallee (2000), On the determination of a global strain rate model, *Geophys. J. Int.*, 52(10), 765–770.
- Kreemer, C., W. C. Hammond, G. Blewitt, A. A. Holland, and R. A. Bennett (2012), A geodetic strain rate model for the Pacific-North American plate boundary, western United States, Map 178, scale 1:1,500,000. Nevada Bureau of Mines and Geology, Reno, Nevada
- Kreemer, C., W. E. Holt, and A. J. Haines (2002), The global moment rate distribution within plate boundary zones, in *Plate Boundary Zones*, edited by S. Stein and J. T. Freymueller, pp. 173–190, AGU, Washington, D. C.
- Kreemer, C., W. E. Holt, and A. J. Haines (2003), An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation, *Geophys. J. Int.*, 154(1), 8–34, doi:10.1046/j.1365-246X.2003.01917.x

- Krige, D. G. (1951), A statistical approach to some mine valuations and allied problems at the Witwatersrand, Master's thesis, Univ. of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa
- Kubitschek D.G. and Born G.H., (2001) Modelling the anomalous acceleration and radiation pressure forces for the TOPEX/POSEIDON spacecraft, Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences, doi 10.1098/rsta.2001.0882
- Larson K. M., Bodin P., Gombert J. (2003) Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake, Science, 300, 1421–1424
- Leever, K. A., Matenco, L., Bertotti, G., Cloetingh, S. A. P. L., & Drijkoningen, G. G. (2006). Late orogenic vertical movements in the Carpathian Bend Zone-seismic constraints on the transition zone from orogen to foredeep. Basin Research, 18(4), 521–545. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2006.00306.x>
- Lidberg, M., J. M. Johansson, H.-G. Scherneck, and G. A. Milne (2010), Recent results based on continuous GPS observations of the GIA process in Fennoscandia from BIFROST, J. Geodyn., 50(1), 8–18, doi:10.1016/j.jog.2009.11.010
- Lorinczi, P. and G.A. Houseman (2009). Lithospheric gravitational instability beneath the Southeast Carpathians, Tectonophysics, 474, 322-336.
- Martin, M., Wenzel, F., & CALIXTO Working Group (2006). High-resolution teleseismic body wave tomography beneath SE-Romania-II. Imaging of a slab detachment scenario. Geophysical Journal International, 164(3), 579–595. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02884.x>
- Mateciuc N. D., (2010) Contributions to the knowledge of crustal deformation field in Romania (in Romanian), PhD Thesis, Fac. of Physics – Bucharest University, 234 pp
- Mateciuc N. D., Bala A. (2019) APPLICATIONS OF SPACE GEODESY METHODS IN ROMANIA, 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019
- Matenco L, Bertotti G, Leever K, Cloetingh S, Schmid SM, Tarapoanca M, Dinu C (2007) Large-scale deformation in a locked collisional boundary: interplay between subsidence and uplift, intraplate stress, and inherited lithospheric structure in the late stage of the SE Carpathians evolution. Tectonics 26(TC4011):2007. doi:10.1029/2006TC001951
- Matenco, L. (2018). Topo-Transylvania: A multidisciplinary Earth science initiative in central Europe to tackle local and global challenges. Acta Geodaetica et Geophysica, 53(3), 323–329. <https://doi.org/10.1007/s40328-018-0234-z>
- Matenco, L., Bertotti, G., Leever, K., Cloetingh, S., Schmid, S. M., Tarapoanca, M., & Dinu, C. (2007). Large-scale deformation in a locked collisional boundary: interplay between subsidence and uplift, intraplate stress, and inherited lithospheric structure in the late stage of the SE Carpathians evolution. Tectonics, 26, TC4011. <https://doi.org/10.1029/2006TC001951>
- Matheron, G. (1963), Principals of geostatistics, Econ. Geol., 58(8), 1246–1266, doi:10.2113/gsecongeo.58.8.1246
- MUNTEAN A., Boudewijn A.C. AMBROSIUS, Victor MOCANU, Eduard Ilie NASTASE, Constantin IONESCU; “SURFACE MOTIONS IN ROMANIA DERIVED FROM 15 YEARS OF CONTINUOUS GNSS MEASUREMENTS”, Conference paper: 17th International Multidisciplinary Scientific Conference SGEM, At Albena, Bulgaria, Volume: III, 2017
- MUNTEAN A., Eduard I. NASTASE, PhD. Student Liviu MANEA. INTEGRATING ROMANIAN GNSS PERMANENT NETWORKS FOR GEOSCIENCE PURPOSES. International Conference on Geoscience, GEOLINKS 2019, 26-29 March 2019, Atena, Grecia.
- Muntean A., Eduard Ilie Nastase, Victor Mocanu, Boudewijn Ambrosius. “USEFULNESS OF ROMANIAN GNSS NETWORKS FOR GEOSCIENCE PURPOSES”, Scientific Simpozionum ”GEOȘTIINȚELE ÎN SECOLUL XXI”, 18 October 2019, University of Bucharest, Faculty of Geology and Geophysics p.4
- Muntean A., Mocanu V., Ambrosius B. (2016) A GPS study of land subsidence in the Petrosani (Romania) coal mining area. Nat. Hazards, 80, 797-810
- Mushini SC, Jayachandran PT, Langley RB, MacDougall JW, Pokhotelov D. (2012) Improved amplitude-and phase-scintillation indices derived from wavelet detrended high-latitude GPS data. GPS Solutions.;16(3):363-373
- Nastase E, Alexandra MUNTEAN, Constantin IONESCU, Victor MOCANU, Boudewijn A.C. AMBROSIUS; “A REGIONAL GPS NETWORK FOR MONITORING THE CARPATHIAN-DANUBIAN-PONTIC SPACE DEFORMATIONS AND THE IMPACT OF LOCAL EARTHQUAKES”, Conference paper: 16th International Multidisciplinary Scientific Conference SGEM, At Albena, Bulgaria, Volume: III,48, p.381-388, WOS:000395499800048, ISBN:978-619-7105-57-5, ISSN: 1314-2704
- Nastase E., A. MUNTEAN, S. NISTOR, B. GRECU, D. TATARU “GPS PROCESSING TOOLS FOR BETTER IMPACT ASSESSMENT OF EARTHQUAKES IN ROMANIA”, Romanian Reports in Physics, Vol. 72, No. 2 (2020)

- Nastase E., Alexandra MUNTEAN, Constantin IONESCU, Victor MOCANU, Boudewijn A.C. AMBROSIUS; “COMBINED SOLUTIONS FOR AN INTEGRATED GNSS STUDY OVER NW GALATI SEISMOGENIC AREA ISSUED FROM GPS CONTINUOUS AND CAMPAIGN MEASUREMENTS”, Conference paper: The 6th National Conference on Earthquake Engineering and the 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology - 6CNIS & 2CNIS, 2017
- Nastase E., Christina Oikonomou, Dragos Toma-Danila, Haris Haralambous, Alexandra Muntean, Iren Adelina Moldovan, ” INVESTIGATION OF IONOSPHERIC PRECURSORS OF EARTHQUAKES IN ROMANIA USING THE ROMANIAN GNSS/GPS NETWORK”, Rom. Journ. Phys., Vol. 61, No. 7–8, p.1426–1436, 2016, WOS:000385603700026
- Nastase E., Victor Mocanu, Alexandra Muntean, Boudewijn Ambrosius, Corne Kreemer, William Hammond, Geoffrey Blewitt, Sorin Nistor, and Dragos Tataru - „Integrated GNSS and seismotectonic study of the slow lithospheric deformation in NW Galati seismogenic area”, EGU General Assembly 2019
- Nastase E.I., Muntean A., Ionescu C., Mocanu V., Ambrosius B.A.C. (2017) Quantitative and qualitative control for an integrated GNSS study over NW Galati seismogenic area., SGEM2017 Conference Proceedings, 17:14, 327-334
- Nastase I. E., Muntean A., Toma-Dănilă D., Constantin I., Mocanu V. (2016) „STUDY OF NW GALATI SEISMOGENIC AREA, 3 GPS CAMPAIGNS FROM 2013-2015, PRELIMINARY RESULTS” Conference paper: 16th International Multidisciplinary Scientific Conference SGEM, At Albena, Bulgaria, Volume: III, 80, Pag.631-638, WOS:000395499800080
- Neagoe C., L. Manea and C. Ionescu (2014). Romanian Data Center: modern way for seismic monitoring, Abstract EGU2014-3320, EGU General Assembly, Vienna, 2014.
- Oncescu, M. C. and C. I. Trifu. (1987). Depth variation of the moment tensor principal axes in Vrancea (Romania) seismic region, *Ann. Geophysicae*, 5B, 149-154.
- Oncescu, M. C., V. Marza, M. Rizescu and M. Popa (1999). The Romanian earthquake catalogue between 1983-1996, in *Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation*, F. Wenzel, D. Lungu, O. Novak (Editors), Kluwer Academic Publishers, 43-49.
- Oncescu, M. C. (1987). On the stress tensor in Vrancea region, *J. Geophys. Res.*, 62, 62-65.
- Oros, E., M. Popa and I. A. Moldovan (2008a). Seismological database for BANAT seismic region (ROMANIA) - Part 1: The Parametric Earthquake Catalogue, *Romanian Journal of Physics*, 53, 955-964.
- Oros, E., M. Popa and I. A. Moldovan (2008b). Seismological database for BANAT seismic region (ROMANIA) - Part 2: The Catalogue of the Focal Mechanism Solutions, *Romanian Journal of Physics*, 53, 965-977.
- Paraschiv, D. (1975). The geology of the hydrocarbon deposits in Romania. *Studii Tehnice și Economice Seria A*, 10, 363. (in Romanian).
- Paraschiv, D., Paraschiv, C., Andrei, C., Popescu, M., & Danet, N. (1983). On the pre- Neogene formations in the North-Dobrogean promontory. *Annual Institute of Geology and Geophysics*, 59, 19–27.
- Păunescu, C., Dimitriu, S.G., Mocanu, V., 2011 Sistemul de determinare a poziției utilizând sateliți (GNSS).
- Paunescu, C., Mocanu, V., Munteanu, L., Andrei, G., Muntean, A., Herebei, O., Veres I., Dima, N., Filip, L., 2008. Stability analysis of over-exploited mining areas by satellite geodesy, *GEO 2008, The scientific meeting of the Faculty of Geology and Geophysics, University of Bucharest*, Ed Vergiliu, 218-220, ISBN 978-973-7600-49-3.
- Popa M., Mircea Radulian, Daniela Ghica, Cristian Neagoe, Eduard Nastase; “Chapter 9: Romanian Seismic Network Since 1980 to the Present”, *Nonlinear Mathematical Physics and Natural Hazards, Springer Proceedings in Physics*, ISBN 978-3-319-14327-9, ISBN 978-3-319-14328-6 (eBook), 163, DOI 10.1007/978-3-319-14328-6
- Popa, M., Radulian, M., Szakács, A., Seghedi, I., & Zaharia, B. (2012). New seismic and tomography data in the southern part of the Harghita Mountains (Romania, Southeastern Carpathians): Connection with recent volcanic activity. *Pure and Applied Geophysics*, 169(9), 1557–1573. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0428-6>
- Radulian M, Mandrescu N, Popescu E, Utale A, Panza G (2000) Characterization of Romanian seismic zones. *Pure Appl Geophys* 157:57–77
- Radulian, M., E. Popescu, A. Bala and A. Utale (2002). Catalog of the fault plane solutions for the earthquakes occurred on the Romanian territory, *Romanian Journal of Physics*, 47, 663 - 670.
- Radulian, M., Mandrescu, N., Panza, G.F., Popescu, E, Utale, A., 2000, Characterization of seismogenic zones of Romania, *Pure appl. geophys.*, 157, 57-77.
- Radulian, M., N. Mandrescu, E. Popescu, A. Utale and G. F. Panza GF. (1999). Seismic activity and stress field in Romania. *Romanian Journal of Physics.*, 44, 1051-1069.
- Răileanu, V., A. Bala A., F. Hauser, C. Prodehl C. and W. Fielitz (2005). Crustal properties from S-

- wave and gravity data along a seismic refraction profile in Romania, *Tectonophysics*, 410, 251–272.
- Ren, Y., Stuart, G. W., Houseman, G. A., Dando, B., Ionescu, C., Hegedüs, E., et al., & South Carpathian Project Working Group (2012). Upper mantle structures beneath the Carpathian–Pannonian region: Implications for the geodynamics of continental collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 349–350, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.06.037>
- Renka, R. J. (1997), Algorithm 772: STRIPACK: Delaunay triangulation and Voronoi diagram on the surface of a sphere, *ACM Trans. Math. Soft.*, m23(3), 416–434
- Richter CF (1958) *Elementary seismology*. Freeman, San Francisco
- RINEX The Receiver Independent Exchange Format Version 3.02, (2012) International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM-SC104)
- Rodriguez, M., C. DeMets, R. Rogers, C. Tenorio, and D. Hernandez (2009), A GPS and modelling study of deformation in northern Central America, *Geophys. J. Int.*, 178(3), 1733–1754, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04251.x
- Săndulescu, M. (1984). *Geotectonics of Romania* (in Romanian), Ed. Tehnică, Bucharest, 334 pp.
- Sandulescu, M. (1988). Cenozoic tectonic history of the Carpathians. In L. H. Royden & F. Horvarth (Eds.), *The Pannonian Basin: A study in basin evolution* (Vol. 45, pp. 17–25). Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists.
- Şengül-Uluocak, E., Pysklywec, R. N., Göğüş, O. H., & Ulugergerli, E. U. (2019). Multidimensional geodynamic modeling in the Southeast Carpathians: Upper mantle flow-induced surface topography anomalies. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 3134–3149. <https://doi.org/10.1029/2019GC008277>
- Shaw, M., & Pysklywec, R. N. (2007). Anomalous uplift of the Apennines and subsidence of the Adriatic: The result of active mantle flow? *Journal of Geophysical Research*, 34(4), L04311. <https://doi.org/10.1029/2006GL028337>
- Shen, Z.-K., R. W. King, D. C. Agnew, M. Wang, T. A. Herring, D. Dong, and P. Fang (2011), A unified analysis of crustal motion in Southern California, 1970–2004: The SCEC crustal motion map, *J. Geophys. Res.*, 116, B11402, doi:10.1029/2011JB008549
- Sibthorpe, A., J. Weiss, N. Harvey, D. Kuang, and Y. Bar-Sever, Empirical modeling of solar radiation pressure forces affecting GPS satellites, AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, 2010.
- Tataru D., Eduard Nastase, Dragos Toma-Danila; “GEOPHYSICAL OPEN DATA AS AN EDUCATIONAL RESOURCE FOR STUDENTS”, Conference: 9th Annual International Conference of Education, Research and Innovation (iCERi), Pages: 4534-4540, 2016, WOS:000417330204099, ISBN:978-84-617-5895-1, ISSN: 2340-1095.
- Toader Victorin-Emilian, Moldovan Iren-Adelina, Marmureanu Alexandru, Dutta Pushan, Partheniu Raluca, Nastase Eduard; “MONITORING OF RADON AND AIR IONIZATION IN A SEISMIC AREA”, , Volume: 69 Issue: 3, Article Number: 709, 2017, WOS:000410598000015, ISSN: 1221-1451, eISSN: 1841-8759
- Van der Hoeven, A. G. A., V. Mocanu, W. Spakman, M. Nutto, A. Nuckelt, L. Matenco, L. Munteanu, C. Marcu, and B. A. C. Ambrosius (2005), Observation of present-day tectonic motions in the Southeastern Carpathians: Results of the ISES/CRC-461 GPS measurements, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 239(3–4), 177–184, doi:10.1016/j.epsl.2005.09.018
- Visarion, M., Sañdulescu, M., Stanica, D., & Veliciu, S. (1988). Contributions a` la connaissance de la structure profonde de la Plateforme Moesienne en Roumanie. *St Tehn Ec seria D (Geofizica)*, 15, 211–222
- Walpersdorf, A., S. Baize, E. Calais, P. Tregoning, and J.-M. Nocquet (2006a), Deformation in the Jura Mountains (France): First results from semi-permanent GPS measurements, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 245(1–2), 365–372, doi:10.1016/j.epsl.2006.02.037
- Wdowinski, S., Y. Bock, G. Baer, L. Prawirodirdjo, N. Bechor, S. Naaman, R. Knafo, Y. Forrai, and Y. Melzer (2004), GPS measurements of current crustal movements along the Dead Sea Fault, *J. Geophys. Res.*, 109, B05403, doi:10.1029/2003JB002640
- Wdowinski, S., Y. Bock, J. Zhang, P. Fang, and J. Genrich (1997), Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, 102(B8), 18,057–18,070, doi:10.1029/97JB01378
- Weber, J. C., J. Saleh, S. Balkaransingh, T. Dixon, W. Ambeh, T. Leong, A. Rodriguez, and K. Miller (2011), Triangulation-to-GPS and GPS-to-GPS geodesy in Trinidad, West Indies: Neotectonics, seismic risk, and geologic implications, *Mar. Pet. Geol.*, 28(1), 200–211
- Zoback, M. D., and H.-P. Harjes (1997), Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany, *J. Geophys. Res.*, 102, 18,477 – 18,492
- Zoran M., Mateciuc D., Neuner J., Ciucu C. (2008) Spatial techniques for investigating seismic areas (in Romanian), Conspress Publishing Bucharest Romania, 230