



UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ

Raport de cercetare 2

Spectre de răspuns în deplasări pentru mișcări seismice ale terenului generate de surse crustale și de adâncime intermediară

Doctorand: *Ing. Paul Olteanu*

Conducător de doctorat: *Prof. univ. dr. ing. Radu Văcăreanu*

20 Iulie 2017

Cuprins

Introducere	5
1 Cutremure crustale și de adâncime intermediară.....	5
1.1 Cutremure crustale	7
1.2 Cutremure de adâncime intermediară (subcrustale).....	11
2 Lege de atenuare pentru ordonatele spectrului de deplasare	13
2.1 Baza de date. Procesarea înregistrărilor. Tipuri de teren	14
2.2 Legea de atenuare.....	18
2.2.1 Setul de înregistrări naționale moderate și puternice.....	23
2.2.2 Setul de înregistrări digitale	28
2.2.3 Setul ce cuprinde toată baza de date	29
2.3 Testarea legii de atenuare.....	30
3 Spectre neliniare de deplasare	34
3.1 Baza de date	36
3.2 Model histeretic.....	38
3.3 Rezultate.....	39
3.3.1 Valorile coeficientului de amplificare	39
3.3.2 Influența condițiilor de teren.....	42
3.3.3 Influența magnitudinii.....	42
3.3.4 Influența distanței epicentrale	43
3.3.5 Formă funcțională pentru valorile mediane	44
3.3.6 Spectre inelastice de deplasare pentru un scenariu seismic dat	46
Concluzii	48
Mulțumiri	49
Anexă	50
Coeficienți de regresie pentru setul de cutremure 1977 - 1990.....	50
Coeficienți de regresie pentru setul de înregistrări digitale.....	55
Coeficienți de regresie pentru setul ce cuprinde toată baza de date.....	58
Bibliografie	61

Listă figuri

FIG. 1-1 HARTA TECTONICĂ A PĂMÂNTULUI, (NASA, 2002).....	6
FIG. 1-2 ZONELE SEISMOGENE CE AFECTEZĂ TERITORIUL ROMÂNIEI, (BIGSEES, 2017).....	7
FIG. 1-3 COMPARAȚIE SEISM CRUSTAL (22.11.2014) vs. SEISM INTERMEDIAR (22.11.2009), $M_w = 5.4$, STAȚIA INCERC.....	9
FIG. 1-4 COMPARAȚIE SEISM CRUSTAL (22.11.2014) vs. SEISM INTERMEDIAR (22.11.2009), $M_w = 5.4$, STAȚIA GIURGIU.....	10
FIG. 1-5 POZIȚIA EPICENTRELOR CUTREMURELOR SUBCRUSTALE DIN CATALOGUL ROMPLUS, (INFP, 2017) STÂNGA. SECȚIUNE TRANSVERSALĂ NW-SE CU POZIȚIA PE VERTICALĂ A FOCARELOR CUTREMURELOR PRODUSE ÎN ZONĂ ÎNTRE ANII 1982 – 1989, ONCESCU ȘI BONJER CITAT ÎN (FROHLICH, 2006) DREAPTA.	11
FIG. 1-6 TOMOGRAFIE SEISMICĂ – EXPERIMENTUL CALIXTO, CITAT ÎN (ISMAIL-ZADEH, MUELLER & SCHUBERT, 2005).....	12
FIG. 1-7 POZIȚIA EPICENTRELOR PENTRU CUTREMURELE CU $M_w \geq 6.3$ PRODUSE ÎN SECOLUL XX, STÂNGA. VARIAȚIA MAGNITUDINII MOMENT CU ADÂNCIMEA (LUNGU, ALDEA, ARION & VĂCĂREANU, 2003), DREAPTA.	13
FIG. 2-1 DISTRIBUȚIA ÎN FUNCȚIE DE ORIGINE, TIPUL DE TEREN, MAGNITUDINE ȘI DISTANȚĂ A ÎNREGISTRĂRIILOR DIN BAZA DE DATE	14
FIG. 2-2 REPARTIZAREA CATEGORIILOR DE TEREN PE TERITORIUL ROMÂNIEI ȘI ÎMPREJURIMI, ADAPTAT DUPĂ (TRENDAFILOSKI, WYSS, ROSSET, & MARMUREANU, 2009), BAZAT PE DATE USGS (ALLEN & WALD, 2007) ...	18
FIG. 2-3 TIPURI DE DISTANȚE UTILIZATE ÎN EXPRESIILE LEGILOR DE ATENUARE	19
FIG. 2-4 VARIAȚIA LOGARITMULUI DEPLASĂRII SPECTRALE CU DISTANȚA EPICENTRALĂ ȘI CU CEA HIPOCENTRALĂ PENTRU $T = 1.0s$, TEREN TIP C PENTRU CUTREMURELE VRÂNCENE DIN 1977, 1986, 1990. SUS PENTRU PRAG DE MAGNITUDINE $M_w = 7.0$, JOS PENTRU ÎNTREAGA GAMĂ DE MAGNITUDINI	20
FIG. 2-5 VARIAȚIA LOGARITMULUI DEPLASĂRII SPECTRALE CU MAGNITUDINEA MOMENT PENTRU $T = 1.0s$, $150km < D_{EPI} < 175km$, TEREN TIP C PENTRU CUTREMURELE VRÂNCENE DIN 1977, 1986, 1990. STÂNGA FORMĂ LINIARĂ, DREAPTA VARIAȚIE PĂTRATICĂ.	21
FIG. 2-6 SPECTRE DE DEPLASARE PENTRU SEISMUL DIN 4.03.1977 PENTRU DOUĂ AMPLASAMENTE: INCERC ȘI CHIȘINĂU.....	23
FIG. 2-7 SPECTRE DE DEPLASARE PENTRU SEISMELE DIN 4.03.1977, 31.08.1986, 30.05.1990 ÎNREGISTRATE LA STAȚIA INCERC.....	24
FIG. 2-8 SPECTRE DE DEPLASARE SIMULAT PENTRU 4.03.1977, 30.05.1990 ÎNREGISTRATE LA STAȚIA INCERC, RESPECTIV ONEȘTI, LEGE FĂRĂ TERMEN PĂTRATIC	25
FIG. 2-9 VARIAȚIA CERINȚEI DE DEPLASARE CU MAGNITUDINEA ȘI TIPUL DE TEREN ȘI RAPORTUL ÎNTRE CERINȚELE DE DEPLASARE PE TEREN C, RESPECTIV B.....	26
FIG. 2-10 SPECTRE DE DEPLASARE GENERATE PENTRU MAI MULTE DISTANȚE EPICENTRALE ȘI TEREN C, RESPECTIV B.....	26
FIG. 2-11 SPECTRE DE DEPLASARE SIMULAT PENTRU 4.03.1977, 31.08.1986 ÎNREGISTRATE LA STAȚIA INCERC, LEGE CU TERMEN PĂTRATIC.....	27
FIG. 2-12 SIMULARE EREN 86.....	29
FIG. 2-13 SIMULAREA UNUI SEISM CU $M_w = 7.50$, $D_{EPI} = 150km$, VALORI MEDIANE, PENTRU CELE TREI SETURI.....	30
FIG. 2-14 DISTRIBUȚIE REZIDUURI NORMALIZATE SUS, QQ PLOT JOS.....	31
FIG. 2-15 DEPENDENȚA DE MAGNITUDINE A REZIDUURILOR INTER – EVENIMENT, TOT SETUL DE DATE	32
FIG. 2-16 DEPENDENȚA DE DISTANȚĂ A REZIDUURILOR INTRA – EVENIMENT, TOT SETUL DE DATE	32
FIG. 3-1 SISTEM ELASTO-PLASTIC ȘI SISTEMUL ELASTIC ASOCIAT, DUPĂ (CHOPRA, 2012)	34
FIG. 3-2 DISTRIBUȚIA ÎN FUNCȚIE DE ORIGINE, TIPUL DE TEREN, MAGNITUDINE ȘI DISTANȚĂ A ÎNREGISTRĂRIILOR DIN BAZA DE DATE	37
FIG. 3-3 DISTRIBUȚIA ÎN FUNCȚIE DE DISTANȚA EPICENTRALĂ ȘI PGA A ÎNREGISTRĂRIILOR DIN BAZA DE DATE.....	37
FIG. 3-4 MODELUL TAKEDA MODIFICAT CU DEGRADARE DE RIGIDITATE, (UTILITY SOFTWARE FOR DATA PROCESSING, 2016).....	38
FIG. 3-5 COEFICIENȚI DE AMPLIFICARE, VALORI MEDIANE, TEREN B ȘI C (STÂNGA), DETALIU (DREAPTA).....	40
FIG. 3-6 COEFICIENȚI DE AMPLIFICARE, VALORI MEDIANE, TEREN B (STÂNGA) ȘI C (DREAPTA)	40
FIG. 3-7 COEFICIENȚI DE AMPLIFICARE, VALORI MEDIANE $\pm 1\sigma$, TEREN B (STÂNGA) ȘI C (DREAPTA)	41
FIG. 3-8 VARIAȚIA Σ_c CU PERIOADA, $\mu = 3$. TEREN C	41

FIG. 3-9 INFLUENȚA CONDIȚIILOR DE TEREN, $\mu = 4$. TEREN B, STÂNGA; TEREN C ÎN DREAPTA	42
FIG. 3-10 INFLUENȚA MAGNITUDINII CUTREMURULUI, TEREN C	43
FIG. 3-11 INFLUENȚA DISTANȚEI EPICENTRALE, TEREN C ȘI $\mu = 2.0$ ȘI $\mu = 4.0$	43
FIG. 3-12 SUPRAFAȚA GENERATĂ DE $C(T, M)$, TEREN B.....	44
FIG. 3-13 SIMULAREA COEFICIENTULUI DE AMPLIFICARE, TEREN C ȘI $\mu = 3.0$	45
FIG. 3-14 SPECTRE NELINIARE SIMULATE (LINIE PLINĂ) PENTRU CUTREMURELE DIN 1977 ȘI 1986, $M = 4$, TEREN C	47

Listă tabele

TABEL 1-1 SURSE SEISMICE CRUSTALE ÎN CATALOGUL SEISMIC BIGSEES (VĂCĂREANU, PAVEL, ALDEA, ARION & NEAGU, 2015).....	8
TABEL 2-1 COMPONENTA BAZEI DE DATE, CATALOG ROMPLUS ȘI DATE DIN REȚELELE K-NET & KIK-NET	15
TABEL 2-2 TIPURI DE TEREN CONFORM EUROCODE 8 (CEN, 2004).....	17
TABEL 2-3 SCALAREA CU MAGNITUDINEA A SPECTRULUI DE DEPLASARE, PENTRU STAȚIA INCERC	24
TABEL 3-1 COEFICIENȚI FORMĂ FUNCȚIONALĂ C, TEREN B.....	45
TABEL 3-2 COEFICIENȚI FORMĂ FUNCȚIONALĂ C, TEREN C.....	45
TABEL A-1 SETUL 1, TEREN B, RELAȚIA ORIGINALĂ (FĂRĂ TERMEN PĂTRATIC).....	51
TABEL A-2 SETUL 1, TEREN C, RELAȚIA ORIGINALĂ (FĂRĂ TERMEN PĂTRATIC).....	52
TABEL A-3 SETUL 1, TEREN B, CU TERMEN PĂTRATIC	53
TABEL A-4 SETUL 1, TEREN C, CU TERMEN PĂTRATIC	54
TABEL A-5 SETUL 2, TEREN B	56
TABEL A-6 SETUL 2, TEREN C	58
TABEL A-7 SETUL 3, TEREN B	59
TABEL A-8 SETUL 3, TEREN C	60

Introducere

Codul de proiectare seismică în vigoare P100-1/2013 (MDRAP, 2013), împreună cu informațiile din cataloagele istorice de cutremure ce cuprind date pe un interval de aproximativ 1000 de ani, conduc la concluzia, că întreg teritoriul României este expus hazardului seismic. Analiza probabilistică a hazardului seismic și studiile de dezagregare a hazardului seismic (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion & Neagu, 2015) efectuate pe mai multe amplasamente din țară demonstrează că sursa subcrustală Vrancea guvernează hazardul pentru o gamă largă de perioade de vibrație, chiar pentru amplasamente situate în interiorul conturilor zonelor seismice crustale.

În vederea descrierii cât mai fidele a datelor de intrare necesare proiectării bazate pe deplasare este nevoie de efectuarea unui studiu asupra spectrelor de răspuns al deplasărilor relative. Abordarea aleasă constă, într-o primă fază, în construirea unui spectru elastic de deplasare și apoi, în transformarea spectrului elastic în spectre inelastice de deplasare. Pentru prima fază, a fost dezvoltată o lege de atenuare care furnizează ordonatele spectrului elastic a deplasărilor, pentru un scenariu seismic dat. A doua fază constă în amplificarea spectrului elastic cu un coeficient ce depinde de modelul histeretic asociat materialului structurii, ductilitatea și perioada de vibrație a sistemului structural.

În prima parte a lucrării sunt evidențiate caracteristicile cutremurelor crustale și de adâncime intermediară. Apoi sunt descrise câteva din particularitățile sursei seismice de adâncime intermediară Vrancea.

A doua parte este dedicată dezvoltării legii de atenuare pentru ordonatele spectrului de deplasare, ținându-se cont de variabilitatea inter-eveniment și intra-eveniment. După testarea relației conform metodologiilor prezentate în literatura de specialitate, a fost investigată capacitatea de retrodicție a unor evenimente seismice.

În ultima parte este tratată problema construirii spectrelor inelastice de deplasare, folosind metoda coeficientului de amplificare a deplasării elastice a sistemului cu un grad de libertate dinamică. Variabilitatea asociată acestui parametru și a celei asociate legii de atenuare este propagată în spectrul inelastic de deplasare, obținându-se o descriere probabilistică a cerinței de deplasare corespunzătoare unui eveniment seismic dat.

1 Cutremure crustale și de adâncime intermediară

Marea majoritate a cutremurelor se produc în zonele de frontieră ale plăcilor tectonice. Acolo, din cauza tendinței de mișcare relativă, se acumulează energie și plăcile se deformează până când este depășită capacitatea de rezistență a materialului din care este alcătuită placa, după care urmează eliberarea energiei acumulate sub forma unei mișcări bruște.

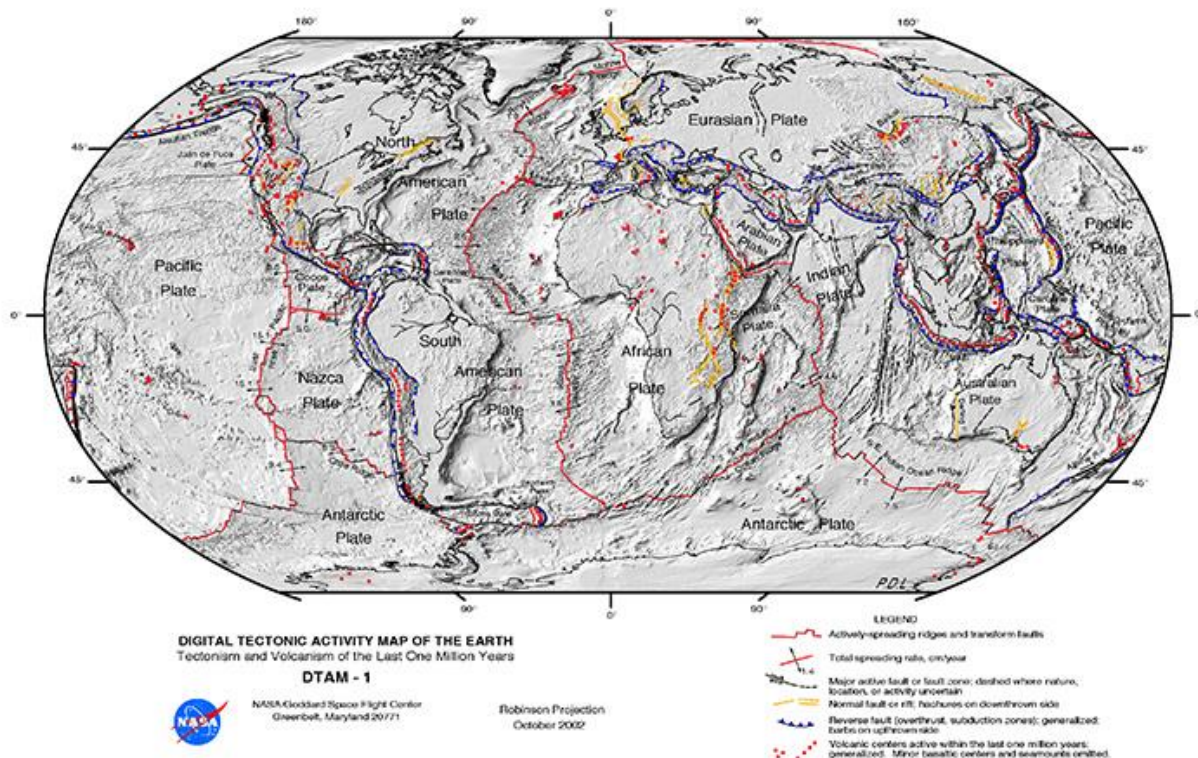


Fig. 1-1 Harta tectonică a Pământului, (NASA, 2002)

Mai reduse ca număr decât seismele ce se produc la interfața plăcilor tectonice sunt seismele care se produc în interiorul conturului plăcilor tectonice, departe de zonele de frontieră, în așa-numitele zone continentale stabile. Deși în marea lor majoritate acestea sunt reduse ca intensitate, unele dintre ele pot atinge magnitudini mari și pot produce efecte devastatoare asupra mediului și construcțiilor. De exemplu, în zona centrală a Statelor Unite există o sursă seismică numită New Madrid ce a generat trei cutremure cu magnitudine peste 7.0 între anii 1811-1812 și care, în momentul de față, figurează în codurile de proiectare cu valori ale accelerației terenului mai mari decât cele din California.

În funcție de adâncimea la care se produc cutremurele acestea se împart în cutremure crustale (cu adâncimea focarului la mai puțin de 60km), cutremure intermediare (subcrustale, cu focare ce se găsesc la 60-300km) și de adâncime (ce se produc la adâncimi de peste 300km). Mecanismul de focar al cutremurelor intermediare și de adâncime nu este pe deplin înțeles fiind un subiect deschis pentru cercetătorii din întreaga lume. De obicei, cutremurele subcrustale, apar în zone de subducție, în placa tectonică care se scufundă în astenosferă și sunt asociate cu activitatea vulcanică. Condițiile de presiune și temperatură existente la aceste adâncimi, în mod normal nu ar trebui să permită eliberarea energiei acumulate din două motive. Primul ar fi că rezistența rocilor crește datorită adâncimii și confinării și eforturile de forfecare ce generează ruperea ar trebui să fie foarte mari. Al doilea este că temperaturile ce ar trebui să se înregistreze la adâncimile unde se produc aceste cutremure ar conduce mai degrabă la o curgere plastică a rocilor decât la ruperea fragilă. Prima teorie care a încercat să explice mecanismul cutremurelor de adâncime susținea că

roca suferă o transformare de fază de la o stare afânată la una mai compactă. În urma transformării se produce o implozie care declanșează seismul. O altă teorie sugerează că apariția cutremurelor intermediare și de adâncime este cauzată de deshidratarea mineralelor cu conținut ridicat de apă. Presiunea din pori crește și micșorează efortul normal, ceea ce conduce la micșorarea rezistenței și a forței de frecare. Prin urmare, capacitatea de rezistență se diminuează și poate apărea cedarea bruscă a rocii (Frohlich, 2006).

Caracteristicile prin care cutremurele subcrustale se diferențiază de cele crustale sunt absența undelor de suprafață (sau limitarea lor ca intensitate și durată), prezența mai pronunțată a undelor de volum, un număr mai mic de replici.

1.1 Cutremure crustale

Așa cum am amintit mai sus, întreg teritoriul României este expus hazardului seismic. Zonele seismogene ce produc cutremure crustale sunt prezentate în figura de mai jos.

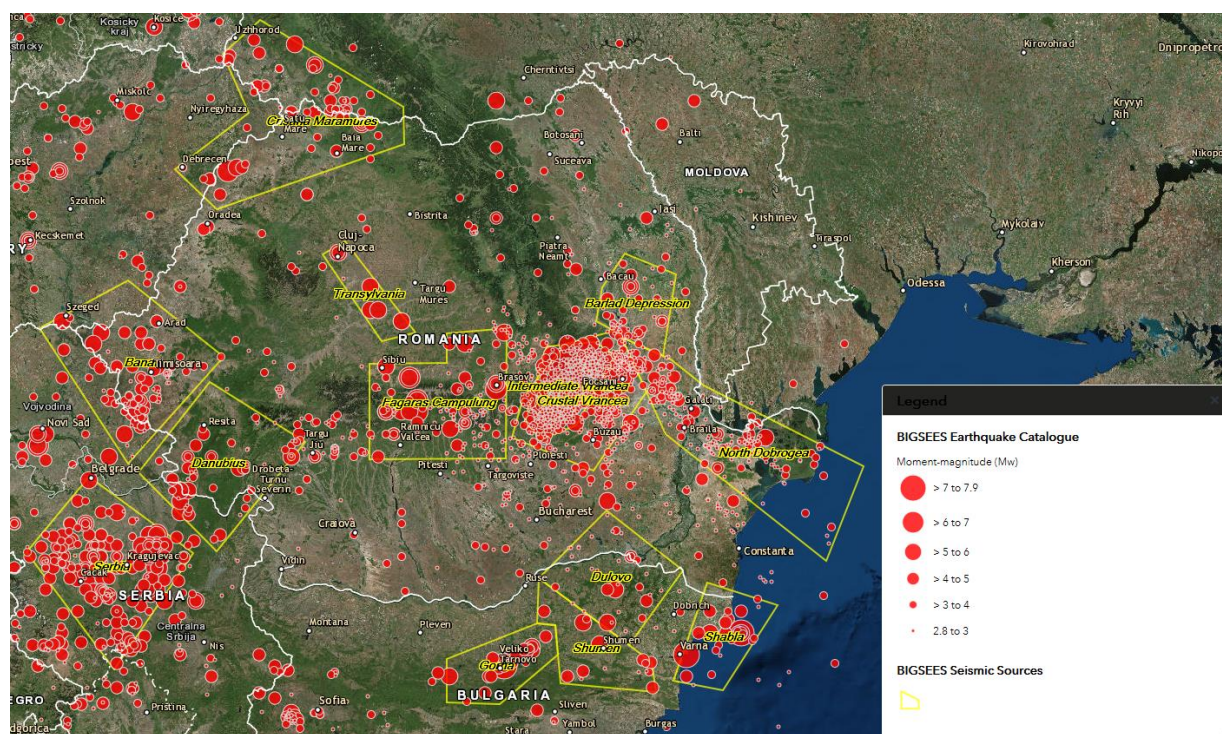


Fig. 1-2 Zonele seismogene ce afectează teritoriul României, (BIGSEES, 2017)

Dintre cele mai importante sunt zonele Făgăraș – Câmpulung, Vrancea crustal, Banat, Crișana – Maramureș și Depresiunea Bârlad.

Catalogul seismic elaborat în cadrul proiectului BIGSEES, ce are ca surse catalogul Romplus, catalogul SHEEC obținut în urma proiectului SHARE și catalogul proiectului DACEA, conține informații despre toate sursele seismice ce afectează teritoriul României. Câteva date despre aceste surse sunt preluate din (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion & Neagu, 2015) și prezentate mai jos.

Sursa seismică	Număr evenimente	Magnitudine maximă
Banat	57	6,4
Depresiunea Bârladului	40	5,8
Crișana	57	6,6
Danubius	54	6,0
Făgăraș	31	6,8
Depresiunea Pre-Dobrogeană	54	5,7

Sursa seismică	Număr evenimente	Magnitudine maximă
Serbia	122	6,6
Transilvania	11	6,2
Vrancea crustal	40	6,2
Dulovo	21	7,1
Shabla	17	7,8
Gorna	46	7,4
Shumen	19	6,7

Tabel 1-1 Surse seismice crustale în catalogul seismic BIGSEES (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion & Neagu, 2015)

O analiză de hazard seismic pentru un amplasament poate fi făcută după trei metode: deterministic, probabilistic sau neodeterministic. Analiza probabilistică a hazardului seismic, fundamentată de Cornell în 1968, are câteva avantaje importante asupra celorlalte două: ține cont de toate sursele seismice identificate, de cutremure având orice magnitudine posibilă, ce au loc la orice distanță de amplasament și de incertitudinile asociate tuturor parametrilor menționați. Unul dintre instrumentele derivate din analiza probabilistică a hazardului seismic este dezagregarea hazardului seismic. Se poate obține în urma unei asemenea analize contribuția diferitelor magnitudini, distanțe sursă-amplasament și abateri standard față de mediană, pentru o valoare de accelerație spectrală dată. În (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion, & Neagu 2015) sunt date câteva exemple de analize de dezagregare pentru câteva municipii din România. În afara cazurilor în care amplasamentul se află la o distanță redusă de o sursă seismică crustală, hazardul este dominat de sursa intermediară Vrancea. Chiar și în cazurile în care amplasamentul se află în interiorul conturului unei zone seismogene crustale, hazardul seismic la perioade mai mari de circa 1s începe să fie controlat tot de sursa seismică intermediară Vrancea (orașele Pitești și Turda).

Teoretic, din cauza magnitudinii maxim credibile mai mici pentru sursele crustale, seismele crustale ar trebui să aibe în compoziție un conținut mai redus de perioade lungi, atunci când sunt comparate cu evenimente subcrustale cu magnitudine apropiată de magnitudinea lor maxim credibilă (de exemplu un cutremur crustal de magnitudine 6.1 produs de zona Vrancea crustal va avea un conținut mai mic de frecvențe joase decât un seism cu $M > 7$ produs de sursa intermediară Vrancea).

Mai jos sunt prezentate comparativ accelerogramele, spectrele de accelerație și de deplasare pentru două cutremure de aceeași magnitudine, $M_w = 5.4$, unul crustal (înregistrat pe 22 noiembrie 2014, cu adâncimea de 40.9km) și altul de adâncime intermediară (109.6km) pentru două amplasamente, INCERC București și Giurgiu. Distanțele epicentrale sunt de 178km pentru seismul crustal, respectiv 145km pentru cel intermediar.

Se poate observa din figurile alăturate că, în ciuda faptului că seismele au aceeași magnitudine, seismului subcrustal îi corespund valori mai mari de accelerație, deci undele seismice sunt atenuate în mod diferit la distanțe epicentrale/hipocentrale medii și mari. Pentru stația INCERC, spectrul

de accelerații al seismului intermediar este cu mult peste cel al cutremurului crustal pentru perioade mai mici de 1-2s.

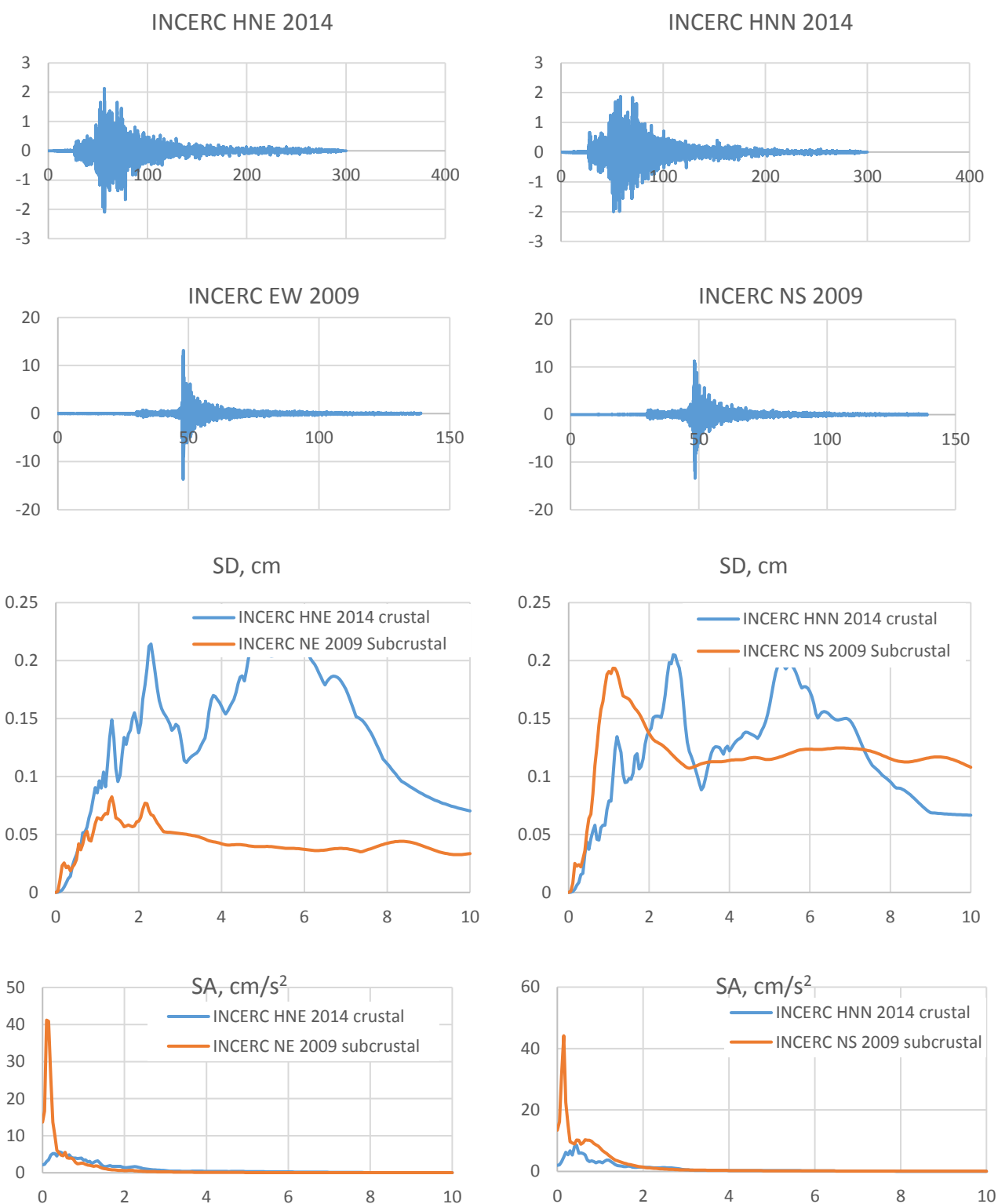


Fig. 1-3 Comparație seism crustal (22.11.2014) vs. seism intermediar (22.11.2009), $M_w = 5.4$, stația INCERC

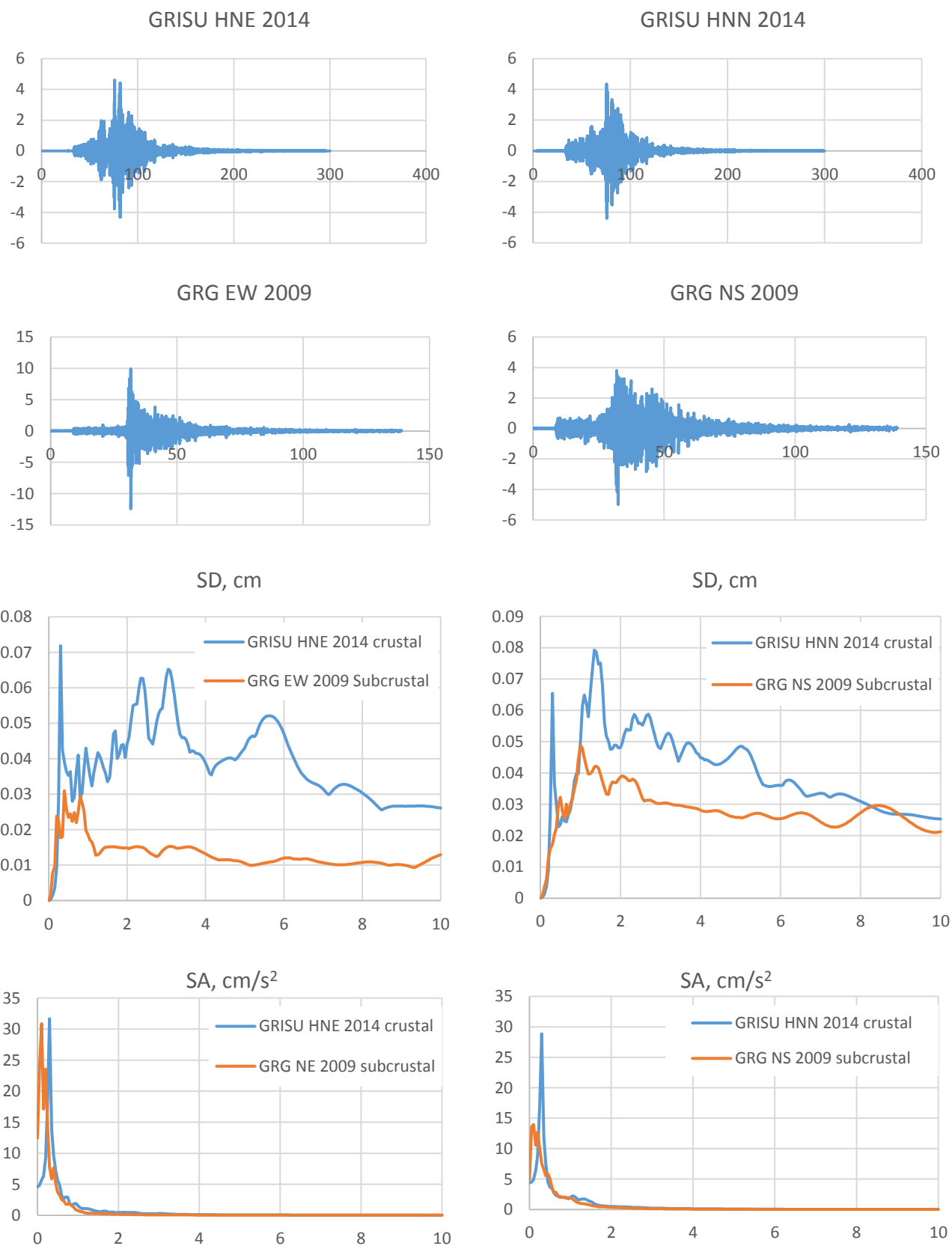


Fig. 1-4 Comparație seism crustal (22.11.2014) vs. seism intermediar (22.11.2009), $M_w = 5.4$, stația Giurgiu

Pentru stația din Giurgiu, spectrele de accelerații au aproximativ aceeași formă și mărimi destul de apropiate. Tot aici se poate constata o amplificare a valorilor de accelerație pentru cutremurul crustal, în timp ce pentru cel de adâncime intermediară valorile respectă tendința de reducere/atenuare firească.

Pentru spectrul deplasărilor, la ambele stații și pentru toate componentele orizontale înregistrate, seismul crustal are ordonatele spectrale situate deasupra celui intermediar pentru aproape toate perioadele. Este posibil ca explicația să fie date de tipurile de unde generate de cele două cutremure. Cutremurul crustal ar trebui să aibă un conținut important (Frohlich, 2006) de unde de suprafață – Rayleigh, Love – care să antreneze diferit stratificația superficială. Astfel s-ar produce amplificări mai mari decât în cazul cutremurului intermediar ce are în compoziție mai degrabă unde de volum (P și S). În cazul stației din Giurgiu vârfului spectrului de deplasări se produc de multe ori la aceleași perioade pentru ambele tipuri de cutremure, dar de cele mai multe ori au valori diferite. Pare să existe o ușoară tendință de deplasare spre dreapta (mărire a perioadei) în cazul cutremurului crustal, probabil un semn de comportare neliniară a straturilor superficiale.

1.2 Cutremure de adâncime intermediară (subcrustale)

Sursa subcrustală Vrancea este cea mai importantă sursă seismică din România și a suscitat în ultimii 30-40 de ani interesul unui număr important de seismologi de renume printre care se numără M. Oncescu, F. Wenzel, A. Ismail-Zadeh, A. Soloviev. Sursa seismică de adâncime intermediară Vrancea produce în medie trei sau patru cutremure importante pe secol, ale căror efecte se simt la distanțe îndepărtate. Din acest motiv această sursă apare încă din prima jumătate a secolului XX în cataloagele occidentale de cutremure.

Zona seismogenă este orientată pe direcția NE-SV, cutremurele intermediare producându-se cu precădere între adâncimile 70-110km și 130-160km. Dincolo de 160km activitatea scade brusc.

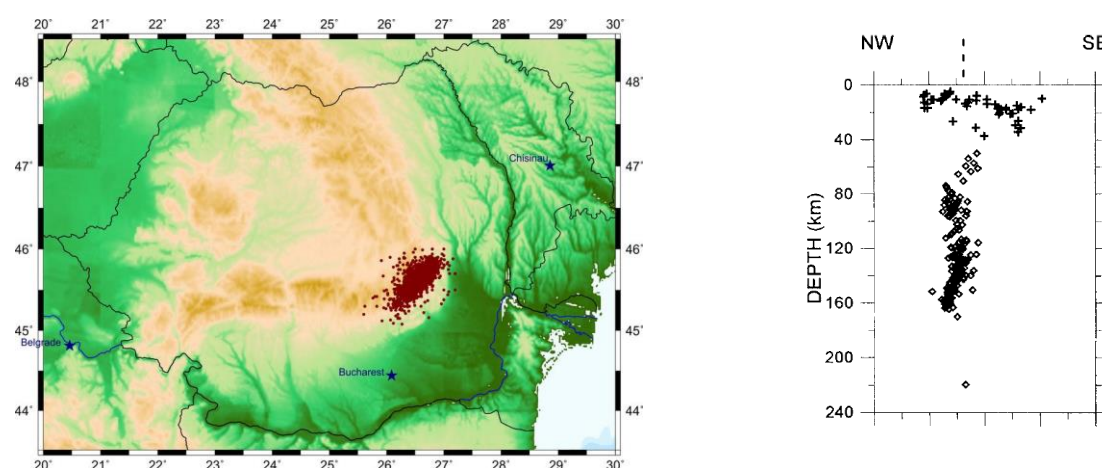


Fig. 1-5 Poziția epicentrelor cutremurelor subcrustale din catalogul ROMPLUS, (INFP, 2017) stânga. Secțiune transversală NW-SE cu poziția pe verticală a focarelor cutremurelor produse în zonă între anii 1982 – 1989, Oncescu și Bonjer citat în (Frohlich, 2006) dreapta.

Cutremurele de adâncime intermediară apar de obicei în zone de subducție unde două plăci tectonice sunt în contact, una alunecând și scufundându-se sub cealaltă. Astfel, cutremurele se pot

clasifica (Sucuoglu & Akkar, 2014) în cutremure de interfață (apar în zonele de contact ale celor două plăci) și intraplacă (apar în placa ce se scufundă la adâncimi mai mari). În zona Vrancea există indicii că subducția activă a încetat acum 10 milioane de ani (Frohlich, 2006). Încă din anii '70 ai secolului trecut, cercetătorii au emis ipoteza conform căreia seismicitatea de adâncime intermediară din zona Vrancea este legată de scufundarea în manta (astenosferă) a unei porțiuni dintr-o placă tectonică. Acesta ar fi ultimul stadiu al fenomenului de subducție. Natura plăcii (oceanică sau continentală) este deocamdată un subiect de dezbatere printre seismologi.

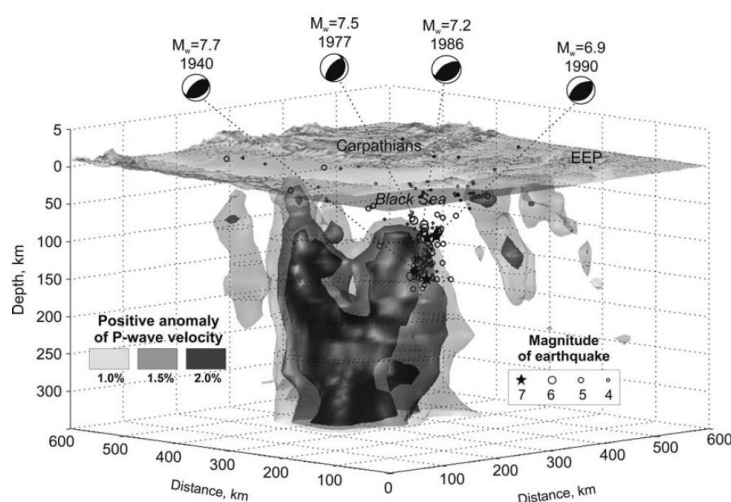


Fig. 1-6 Tomografie seismică – experimentul CALIXTO, citat în (Ismail-Zadeh, Mueller & Schubert, 2005)

Faptul că există o zonă cu activitate seismică redusă, situată la adâncimi de 40-70km, a condus la ideea că fragmentul de placă este deja desprins de crusta continentală. Fragmentul, inițial cvasi-orizental, a ajuns în poziție aproape verticală, este mai rece și mai dens decât mediul ce îl înconjoară și coboară sub acțiunea gravitației. Partea sa inferioară este situată la o adâncime de minim 350km[†]. Interacțiunea dintre forțele gravitaționale, arhimedice, vâscoase și de frecare produc în corpul descendent eforturi de forfecare suficient de mari pentru a declanșa cutremure (Ismail-Zadeh, Mueller & Schubert, 2005).

Epicentrele cutremurelor vrâncene sunt mărginite de un contur relativ redus ca suprafață, de ordinul 80x40km. Există tendința de creștere a adâncimii evenimentului odată cu magnitudinea. Acest fenomen a fost explicat prin creșterea rezistenței celulei de asperitate cu creșterea presiunii litostatice cu adâncimea. Poziția epicentrelor cutremurelor intermediare vrâncene prezintă o mobilitate ridicată de-a lungul direcției NE – SW, ceea ce conduce la localizarea efectelor seismului către București sau Moldova (Lungu, Aldea, Arion & Văcăreanu, 2003).

[†] Este adâncimea limită inferioară a tomografiei seismice efectuate în 1999 în cadrul proiectului CALIXTO (Ismail-Zadeh, Mueller & Schubert, 2005).

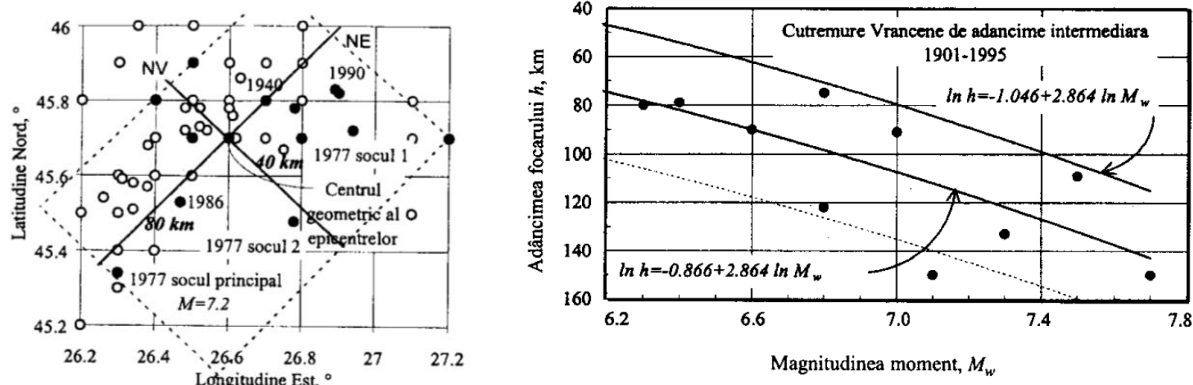


Fig. 1-7 Poziția epicentrelor pentru cutremurele cu $M_w \geq 6.3$ produse în secolul XX, stânga. Variația magnitudinii moment cu adâncimea (Lungu, Aldea, Arion & Văcăreanu, 2003), dreapta.

Relațiile de regresie ce corelează magnitudinea cutremurului cu lungimea suprafeței de rupere și cu aria suprafeței de rupere (Wells & Coppersmith, 1994) pot furniza magnitudinea maxim credibilă a sursei. În (Lungu, Aldea, Arion & Văcăreanu, 2003) sunt citate valorile maxime pentru lungimea suprafeței de rupere – 150-200km – și pentru aria suprafeței de rupere – 8000km². Aceste valori conduc către o valoare a magnitudinii maxim credibile $M_w \approx 8.1$. Conform relațiilor de regresie citate în lucrarea de mai sus, hypocentrul cutremurului maxim credibil ar fi situat între 140 – 170km adâncime.

2 Lege de atenuare pentru ordonatele spectrului de deplasare

Relațiile de atenuare (eng. "ground motion prediction equations" - GMPE) reprezintă cantitativ modul în care un parametru al mișcării seismice descrește odată cu creșterea distanței sursă – amplasament. De obicei ele sunt obținute empiric, pornindu-se de la o formă funcțională care să exprime matematic modul în care parametrul de interes variază funcție de distanță, magnitudine tipul de teren și alți parametri considerați importanți. Utilizând baze de înregistrări reprezentative pentru zona / amplasamentul de interes, și apoi folosind tehnici de regresie, se pot determina coeficienții ce intervin în forma funcțională.

Prima lege de atenuare a fost obținută de Esteva și Rosenbluth și publicată în 1964, în timp ce în 2016 existau mai mult de 400. Marea majoritate a relațiilor de atenuare au ca parametru de interes al mișcării seismice accelerația maximă a terenului (PGA). În ultimul deceniu al secolului XX a fost dezvoltat conceptul de *Performance Based Design* (proiectare bazată pe performanță) prin care, practic, se dorește un control mai strict asupra comportării structurilor, pornind de la ideea că avariile produse de cutremure structurilor sunt cauzate mai degrabă de deplasările relative (drifturi) decât de accelerația terenului. Deși existau ecuații de predicție pentru deplasările maxime ale terenului (PGD) încă din 1974, Orphal & Lahoud pentru California citat în (Douglas, 2016), de abia din 2004 (Faccioli, Paolucci & Rey, 2004) au fost făcute eforturi în direcția găsirii unor relații de atenuare pentru ordonatele spectrului de deplasări relative.

Motivul pentru care s-a considerat oportună obținerea spectrelor de deplasare prin prelucrarea directă a înregistrărilor și nu prin derivarea lor din spectrele de răspuns în accelerații este că spectrele de deplasare variază mai puternic cu magnitudinea decât spectrele de accelerație. Mai

mult, forma și ordonatele spectrelor de deplasare sunt mult mai sensibile la modul în care a fost făcută prelucrarea/corectarea accelerogramelor decât ordonatele spectrului de accelerații.

Scopul acestui capitol este dezvoltarea unei legi de atenuare a spectrului deplasărilor relative aplicabilă pe teritoriul României, teritoriu expus în mare majoritate hazardului seismic generat de sursa subcrustală Vrancea.

2.1 Baza de date. Procesarea înregistrărilor. Tipuri de teren

Pentru a dezvolta modelul de atenuare este nevoie să se creeze o bază de date care să cuprindă înregistrări ale mișcării terenului reprezentative pentru amplasamentul dat. Baza de date folosită în acest scop cuprinde 272 de perechi de înregistrări (544 de componente) provenite de la 16 cutremure de adâncime intermediară. Din baza de date fac parte cutremure de adâncime intermediară, din care 10 produse în zona Vrancea (235 de perechi de înregistrări) și șase cutremure înregistrate în Japonia. Cutremurele din baza de date sunt cuprinse în intervalul de magnitudini $5.2 \leq M_w \leq 7.4$ și s-au produs la adâncimi cuprinse între 66 și 154 km. Din totalul de înregistrări, 169 provin de pe teren tip C (aproximativ 62%), restul provenind de la stații situate pe teren tip B. Înregistrările digitale reprezintă 52% din total și sunt furnizate de cutremure cu $5.2 \leq M_w \leq 7.1$. Prin urmare, majoritatea cutremurelor din baza de date cu $M_w > 7.0$ au fost înregistrate analogic în România.

Din cauza numărului redus de înregistrări disponibile pe teren tare (stâncă sau terenuri stâncoase cu cel mult 5m de material mai slab deasupra și $V_{s,30} > 800\text{m/s}$, tip A conform Eurocode 8) și a înregistrărilor mișcărilor seismice puternice în spatele arcului carpatic acestea nu au fost selectate în baza de date. Astfel, legea de atenuare are valabilitate în zona din fața arcului carpatic: Moldova, Muntenia și Dobrogea pe terenuri de tip B și C.

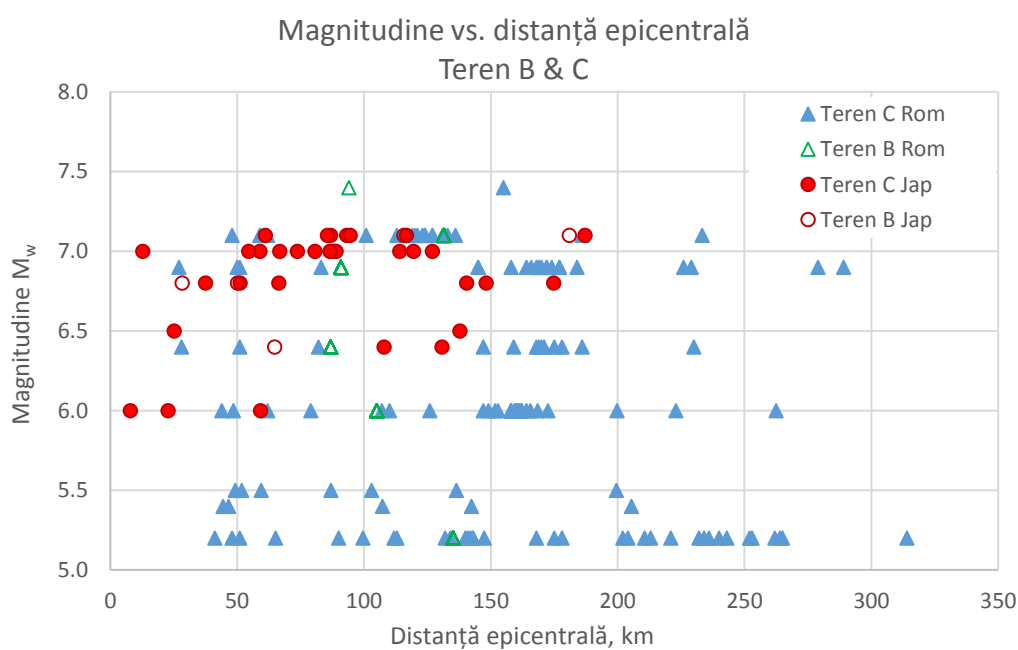


Fig. 2-1 Distribuția în funcție de origine, tipul de teren, magnitudine și distanță a înregistrărilor din baza de date

Decizia de a include înregistrări ce nu provin de pe teritoriul României a fost luată ca urmare a lipsei unor înregistrări naționale de calitate superioară (digitale) pentru cutremure cu $M_w \geq 6.0$. Recomandarea cercetătorilor John Douglas și Julian Bommer, citați în (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion & Neagu, 2015), este să se folosească în vederea obținerii unei legi de atenuare și înregistrări din alte țări mai ales atunci când nu există suficiente înregistrări locale. Mai mult, este de dorit să se extindă bazele de date cu înregistrări “de import” pentru obținerea unor relații de atenuare în cazul[†], foarte probabil de altfel, în care înregistrările locale nu acoperă întreaga gamă de magnitudini și distanțe pentru care se dorește modelul de atenuare.

Au fost incluse cutremure produse în Japonia (Strong Motion Seismograph Networks (K-NET, KiK-net), 2017) cu adâncimi cuprinse între 66 – 122km și magnitudini $6.0 \leq M_w \leq 7.1$. Din păcate, baza de date ale celor două rețele, nu cuprinde înregistrări pentru evenimente seismice cu $M_w > 7.1$ și pentru adâncimi între 60 – 200km.

Data	Ora locală	Latitudine (N)	Longitudine (E)	Adâncime (km)	M_w	Număr componente orizontale	Obs
1977/03/04	19:21:54	45.77	26.76	94	7.4	4	RO
1986/08/30	21:28:37	45.52	26.49	131.4	7.1	70	RO
1990/05/30	10:40:06	45.83	26.89	90.9	6.9	92	RO
1990/05/31	00:17:48	45.85	26.91	86.9	6.4	66	RO
2004/10/27	20:34:36	45.84	26.63	105.4	6.0	92	RO
2005/05/14	01:53:21	45.64	26.53	148.5	5.5	14	RO
2005/06/18	15:16:42	45.72	26.66	153.7	5.2	14	RO
2009/04/25	17:18:48	45.68	26.62	109.6	5.4	10	RO
2013/10/06	01:37:21	45.67	26.58	135.1	5.2	108	RO
2001/12/02	22:02:00	39.40	141.26	122	6.4	6	JAP
2003/05/26	18:24:00	38.81	141.68	71	7.0	24	JAP
2005/07/23	16:35:00	36.58	140.14	73	6.0	6	JAP
2008/07/24	00:26:00	39.73	141.63	108	6.8	16	JAP
2011/04/07	23:32:00	38.20	141.92	66	7.1	18	JAP
2013/02/02	23:17:00	42.70	142.23	102	6.5	4	JAP

Tabel 2-1 Componența bazei de date, catalog ROMPLUS și date din rețelele K-NET & Kik-net

În (Faccioli et al., 2007), (Cauzzi & Faccioli, 2008) se atrage atenția asupra sensibilității spectrelor de deplasare la calitatea înregistrării (digital vs. analog) și modul în care se face prelucrarea accelerogramelor. Înregistrările analogice obținute în timpul mișcărilor seismice sunt afectate de diverse tipuri de erori (din cauza instrumentului și a digitizării printre altele) care afectează calitatea înregistrării mai ales în domeniul frecvențelor înalte (> 20 Hz) și joase (< 0.5 Hz). Erorile din domeniul frecvențelor joase afectează istoria în timp a vitezelor și deplasărilor, în timp ce erorile din domeniul frecvențelor înalte afectează mai ales valoarea de vârf a accelerației terenului.

[†] De exemplu, se dorește elaborarea unui model de atenuare pentru evenimente seismice considerate posibile din analiza de hazard, situate în apropierea liniei superioare, dar care ori nu s-au produs încă ori s-a produs și nu există înregistrări.

Pentru a limita efectul acestor erori se folosesc diverse corecții și filtrări. Prin filtrare se elimină erorile, dar împreună cu acestea se elimină și informația folositoare prezentă în domeniul de frecvențe vizat de filtrare (Borcia, 2008).

Înregistrările analogice au fost obținute în formă deja procesată, accelerogramele fiind preluate fără a se interveni asupra lor. Metodologia urmărită fiind descrisă în (Borcia, 2008). Procedura de filtrare nu este aplicată uniform, filtrul este de tip Ormsby iar pragurile de tăiere fiind 0.15-0.25Hz pentru frecvențele joase și 25-28Hz pentru frecvențele înalte. Înregistrările digitale au fost prelucrate prin aplicarea unui filtru Butterworth de ordinul patru cu pragul inferior la 0.05Hz, respectiv superior la 50Hz.

Codurile de proiectare seismică țin cont de natura terenului de pe amplasament prin parametrii măsurabili ai caracteristicilor terenului. Efectele topografice și ale stratificației subterane sunt considerate doar prin atribuirea unei categorii de teren. În Statele Unite, Europa și Japonia parametrul ce decide apartenența unui teren la o anumită categorie este viteza medie a undelor de forfecare în primii 30 de metri de la suprafața liberă, $v_{s,30}$. În cazul în care nu este disponibil acest parametru se poate folosi numărul de lovituri din testul de penetrare standard, N_{SPT} . Viteza medie a undelor de forfecare se calculează cu următoarea ecuație:

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}} \quad \text{Ec. 2-1}$$

unde h_i și v_i sunt grosimea și viteza undelor de forfecare în stratul i din totalul de N strate din primii 30m de la suprafața terenului.

Normativul românesc de proiectare seismică P100-1/2013, (MDRAP, 2013) folosește încadrarea propusă de Lungu în 1997, citat în (Lungu, Văcăreanu, Aldea & Arion, 2000). S-au evaluat perioadele de colț T_C și T_D conform relațiilor de mai jos pentru amplasamentele unde există înregistrări ale cutremurelor moderate sau puternice.

$$T_C = 2\pi \frac{EPV}{EPA},$$

$$T_D = 2\pi \frac{EPD}{EPV} \quad \text{Ec. 2-2}$$

unde EPA, EPV, EPD reprezintă valorile mediate pe o fereastră mobilă de 0.4s ale ordonatelor spectrelor de accelerație, viteză și deplasare (Lungu et al., 1996).

Normativul P100-1/2013 recomandă pentru construcțiile importante (clasele de importanță I și II) realizarea unor studii pentru caracterizarea condițiilor de teren de pe amplasament: profilul vitezelor undelor de forfecare v_s și compresiune v_p pentru straturile până la roca de bază sau minim pe primii 30m, stratificația terenului (grosime, densitate, tip), valoarea medie ponderată a v_s pe stratificația considerată; apoi terenul este încadrat în tipologia de teren conform Eurocode 8.

Tip teren	Stratificație	$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (lovituri/30cm)	c_u (kPa)
A	Stâncă sau terenuri stâncoase, cu maxim 5m material mai slab la suprafață.	> 800	-	-
B	Depozite de nisip îndesat, pietriș sau argilă vârtoasă, cu grosime de cel puțin câțiva metri, cu caracteristici mecanice ce cresc gradual cu adâncimea.	360 - 800	> 50	> 250
C	Depozite adânci de îndesare medie, pietriș sau argile vârtoase cu grosimi de mai multe zeci sau sute de metri.	180 - 360	15 - 50	70 - 250
D	Depozite de pământuri necoezive afânate sau de îndesare medie (cu sau fără straturi coezive) sau pământuri coezive moi sau tari.	< 180	< 15	< 70
E	Profil de sol constând într-un strat aluvionar superficial cu valori v_s de clasă C sau D, cu grosimea între 5m și 20m, situat peste un material mai rigid, cu $v_s > 800$ m/s.			

Tabel 2-2 Tipuri de teren conform Eurocode 8 (CEN, 2004)

În acest studiu, pentru încadrarea în tipuri de teren s-a folosit terminologia Eurocode 8 (CEN, 2004). Aceasta permite încadrarea în funcție de viteza undelor de forfecare ca medie ponderată a vitezelor în straturile din primii 30m. Are avantajul că este o metodă consacrată (utilizată în țările cu tradiție în proiectarea la acțiunea seismică), recomandată de codul național de proiectare seismică, și se poate aplica relativ ușor. În cadrul proiectului BIGSEES a fost creată o bază de date ce conține stratificații, vitezele undelor de compresie, etc. Majoritatea sondajelor au fost efectuate în anii '70 ai secolului trecut iar informațiile legate de vitezele undelor de forfecare nu mai sunt disponibile (Neagu, Arion, Aldea, Văcăreanu & Pavel, 2017). Există un număr mic de foraje cu adâncimi cuprinse între 13m-153m, localizate în București pentru care există date complete.

În (Allen & Wald, 2007) este propusă o metodologie prin care se pot obține informații privitoare la viteza undelor de forfecare folosind date referitoare la panta topografică. Acestea din urmă au fost preluate în timpul unei misiuni a navei spațiale Endeavour în 2000. Cercetătorii americani au găsit o corelație între panta topografică și date înregistrate de $v_{s,30}$ în mai multe amplasamente din Statele Unite, Taiwan, Italia, Puerto Rico, Noua Zeelandă și Japonia. Concluzia studiului este că datele $v_{s,30}$ provenite din studiul topografiei pantelor pot fi folosite pentru descrierea la nivel regional a condițiilor de teren.

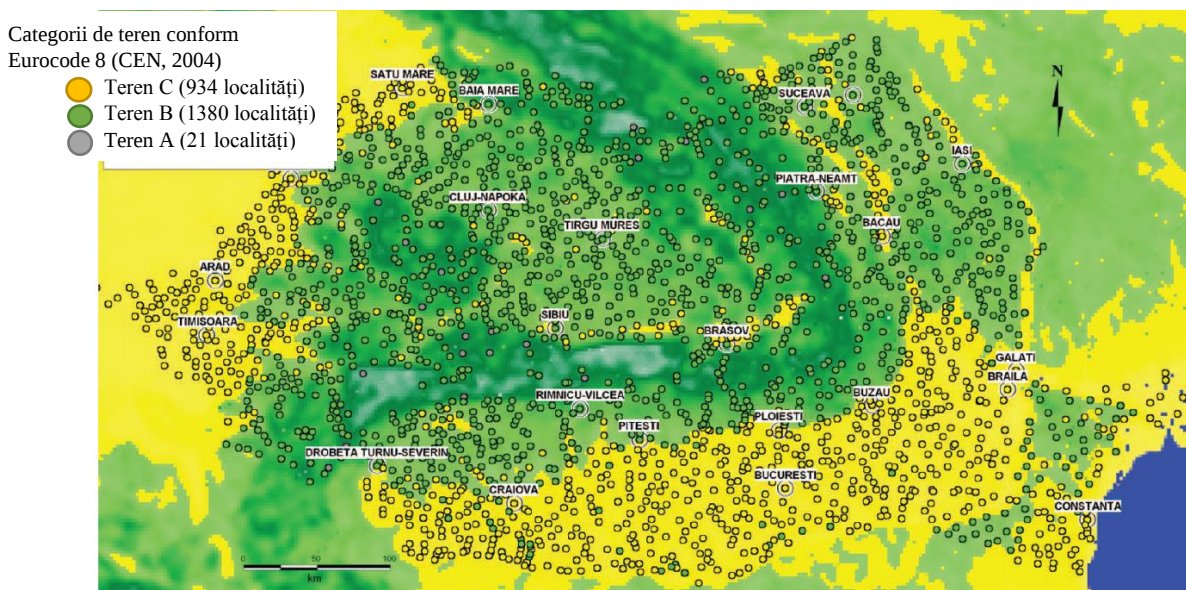


Fig. 2-2 Repartizarea categoriilor de teren pe teritoriul României și împrejurimi, adaptat după (Trendafiloski, Wyss, Rosset, & Marmureanu, 2009), bazat pe date USGS (Allen & Wald, 2007)

Studii realizate Neagu și Aldea, citate în (Neagu, Arion, Aldea, Văcăreanu & Pavel, 2017), folosind date provenind de la 19 foraje din zona Bucureștiului au arătat o bună corelație între valorile obținute prin metodologia (Allen & Wald, 2007) și măsurătorile din teren. Diferențele dintre cele două seturi de date sunt în medie de 12% (metoda pantei subestimând ușor valoarea vitezei undelor de forfecare), cu diferențe de maxim 28%. Cu toate aceste diferențe, încadrarea în tipul de teren este aceeași pentru ambele metode, pentru amplasamentele cercetate.

În acest studiu au fost utilizate pentru încadrarea în tipuri de teren conform Eurocode 8 valorile de viteze de forfecare pe primii 30m, pentru amplasamentele unde au fost înregistrate accelerogramele, furnizate de studiul (Allen & Wald, 2007), disponibile pe site-ul United States Geological Survey, (USGS, 2017). Terenurile din Japonia au, în general, foraje și valori pentru $v_{s,30}$ (Strong Motion Seismograph Networks (K-NET, KiK-net), 2017). Unele site-uri însă, nu au foraje până la 30m adâncime, în aceste situații folosindu-se metodologiile descrise în (Boore, 2004) și folosind fișierele cu bazele de date disponibile în (Boore D. , 2017).

2.2 Legea de atenuare

Modelul de atenuare pentru ordonatele spectrului de deplasare relativă a fost obținut prin regresie în două etape, folosind metodologia descrisă în (Joyner & Boore, 1993). Regresia în două etape este utilizată pentru a decupla determinarea scalării magnitudinii de determinarea scalării distanței. Metoda este folosită pe larg în determinarea coeficienților legilor de atenuare, împreună cu algoritmul datorat lui Abrahamson & Youngs (1992). Împreună cu regresia în două etape, Joyner și Boore au introdus în același articol o metodă de regresie într-o singură etapă, coeficienții ce controlează dependența de magnitudine și dependența de distanță fiind determinați simultan. Ambele metode se bazează pe maximizarea verosimilității setului de observații.

Regresia în două etape constă mai întâi în determinarea coeficienților ce exprimă dependența de distanță și a unui vector de deviații (pentru fiecare înregistrare în parte). În a doua etapă sunt

determinați coeficienții ce exprimă dependența magnitudinii prin maximizarea verosimilității setului de observații.

Forma funcțională a legii de atenuare, adaptată după (Joyner & Boore, 1993) este:

$$\lg(SD) = a + b(M_W - 6) - \lg \sqrt{D_{epi}^2 + h^2} + c \sqrt{D_{epi}^2 + h^2} + \varepsilon_r + \varepsilon_e \quad \text{Ec. 2-3}$$

unde SD (în cm) este ordonata spectrului elastic al deplasărilor relative (media geometrică a două componente orizontale perpendiculare) pentru 5% amortizare, M_W este magnitudinea moment a cutremurului, D_{epi} (în km) este distanța epicentrală, a, b, c și h sunt coeficienți ce se determină prin regresie, ε_r este o variabilă aleatoare independentă normal repartizată ce ia valori pentru fiecare înregistrare, ε_e este o variabilă aleatoare independentă normal repartizată ce ia valori pentru fiecare cutremur iar lg semnifică logaritm în baza 10. Variabila aleatoare ε_r are media 0 și dispersia σ_r^2 , reprezentând variabilitatea între stațiile seismice (intra-eveniment), în timp ce variabila aleatoare ε_e are media 0 și dispersia σ_e^2 , reprezentând variabilitatea între evenimentele seismice (inter-eveniment). Abaterea standard totală este:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_e^2} \quad \text{Ec. 2-4}$$

Forma funcțională originală (Joyner & Boore, 1993) folosește distanța Joyner-Boore (distanța cea mai scurtă de la stația seismică la proiecția verticală a suprafeței de rupere) în locul D_{epi} folosită în acest studiu. Întrucât valorile pentru distanța Joyner-Boore nu sunt disponibile pentru cutremurele din zona subcrustală Vrancea, s-a ales distanța epicentrală ca variabilă predictor.

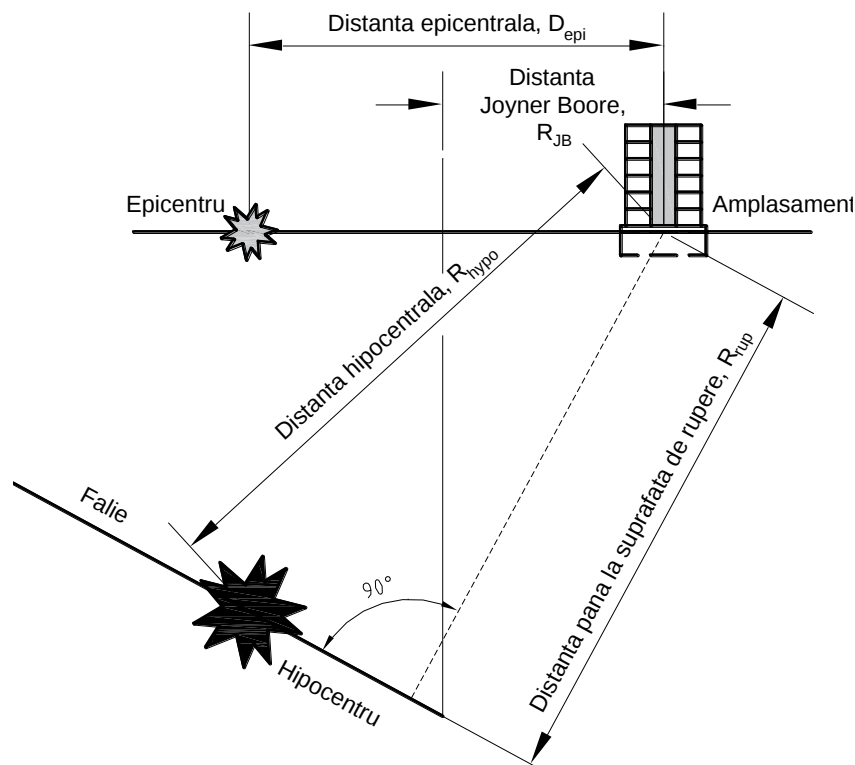


Fig. 2-3 Tipuri de distanțe utilizate în expresiile legilor de atenuare

Relațiile de atenuare obținute de Văcăreanu et al 2015, (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion & Neagu, 2015) folosesc ca metrică distanța hipocentrală (focală). Pentru studiul de față, distanța epicentrală s-a dovedit că este în mai bună corelație decât distanța hipocentrală (focală) cu valorile deplasărilor spectrale înregistrate. În plus, din punct de vedere formal, semnificația distanței epicentrale este mai aproape de distanța Joyner-Boore decât distanța focală. Mai jos sunt prezentate în paralel pentru cutremurele moderate – mari înregistrate în România corelațiile deplasărilor spectrale cu D_{epi} și R_{hypo} pentru $T=1,0s$.

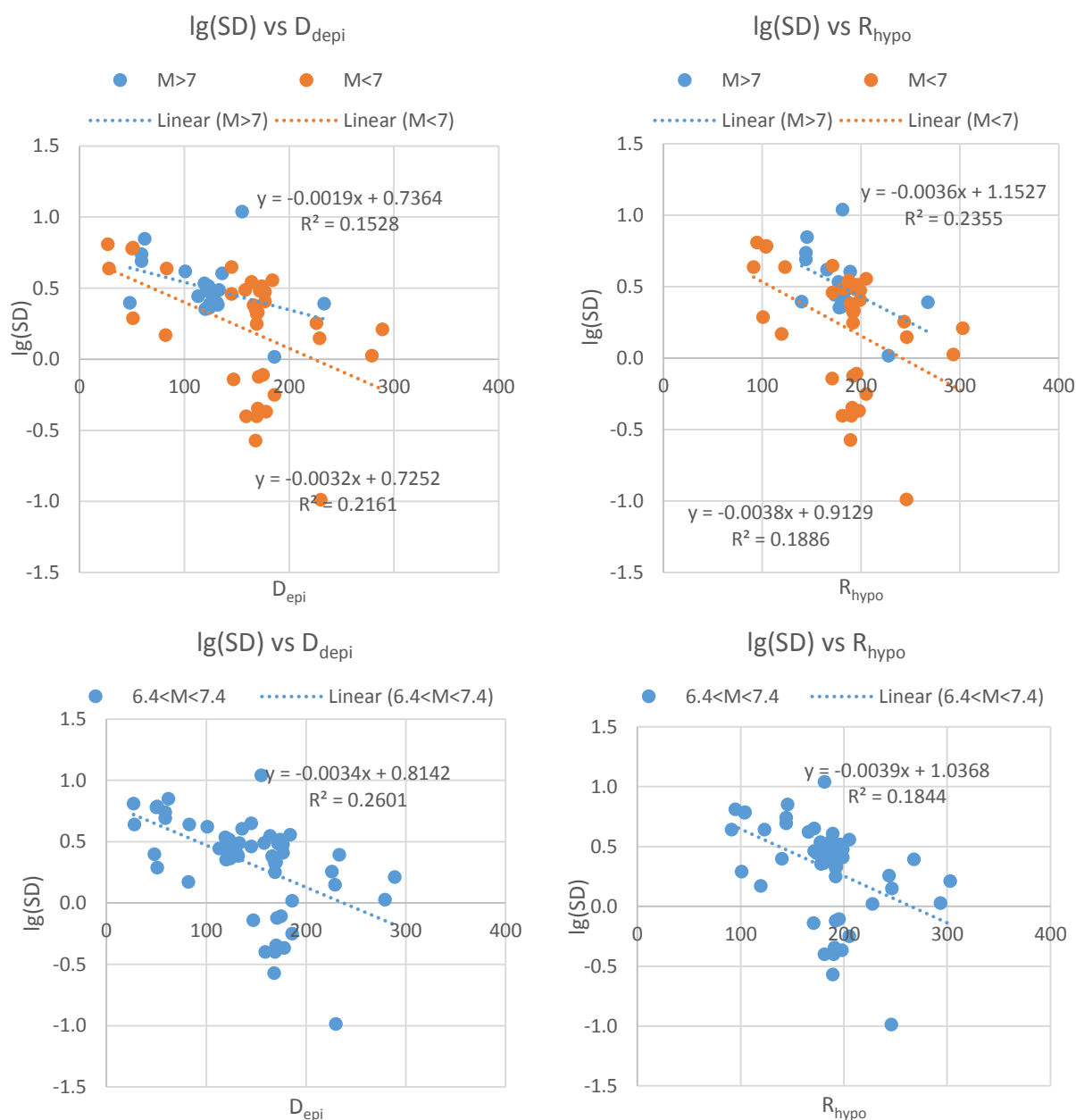


Fig. 2-4 Variația logaritmului deplasării spectrale cu distanța epicentrală și cu cea hipocentrală pentru $T = 1.0s$, teren tip C pentru cutremurele vrâncene din 1977, 1986, 1990. Sus pentru prag de magnitudine $M_w = 7.0$, jos pentru întreaga gamă de magnitudini

Se observă că pentru cutremurele mari distanța hipocentrală corelează mai bine cu valoarea logaritmului ordonatei spectrale, în timp ce pentru cutremurele cu $M_w < 7.0$ și pentru întreg setul analizat (evenimentele din 1977, 1986, 1990) distanța epicentrală este corelată mai bine.

Magnitudinea moment a fost selectată pentru a exprima mărimea cutremurelor, cele mai recente relații de atenuare dezvoltate în țări ca Statele Unite, Noua Zeelandă folosind-o ca predictor. În forma funcțională din acest studiu atenuarea cu distanța a amplitudinii este independentă de magnitudine.

Primii doi termeni ai relației de atenuare țin cont de variația cvasiliniară a logaritmului amplitudinii cu magnitudinea. Al treilea termen corespunde atenuării geometrice a undelor seismice, ce descresc proporțional cu inversul distanței. Al patrulea termen corespunde atenuării inelastice, datorată mediilor traversate de undele seismice.

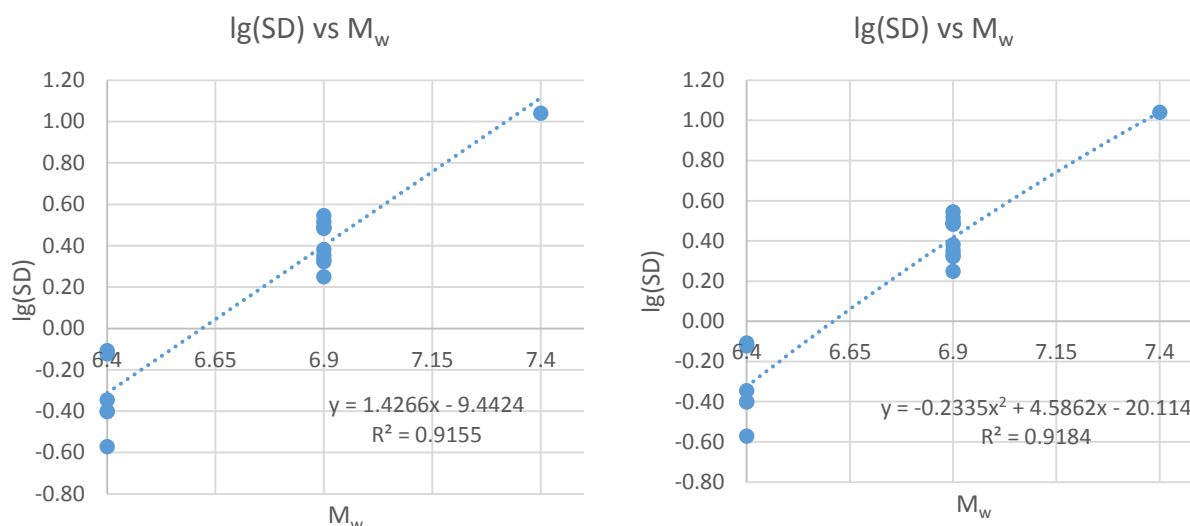


Fig. 2-5 Variația logaritmului deplasării spectrale cu magnitudinea moment pentru $T = 1.0s$, $150km < d_{epi} < 175km$, teren tip C pentru cutremurele vrâncene din 1977, 1986, 1990. Stânga formă liniară, dreapta variație pătratică.

Din figura de mai sus se observă corelația bună pentru ambele tipuri de variație a magnitudinii cu deplasările spectrale. O corelație ușor mai bună se observă pentru o expresie pătratică a variației $\log(SD)$, ce ar include un termen suplimentar în forma funcțională.

În acest studiu, ordonatele spectrului deplasărilor relative sunt exprimate ca media geometrică a două componente orizontale, perpendiculare. Se preferă efectuarea regresiei față de media geometrică fiindcă se consideră reprezentativă din punct de vedere statistic pentru orice direcție aleatoare. Majoritatea modelelor de atenuare folosesc ca parametru așteptat media geometrică în locul valorii maxime. Logaritmul mediei geometrice (rezultatul practic al relației de atenuare) poate fi privită ca media aritmetică a logaritmilor celor două componente:

$$GM(SD_1, SD_2) = \sqrt{SD_1 \times SD_2} = (SD_1 \times SD_2)^{1/2}$$

$$\lg[(SD_1 \times SD_2)^{1/2}] = \frac{1}{2} \lg(SD_1 \times SD_2) = \frac{\lg(SD_1) + \lg(SD_2)}{2}$$

Ec. 2-5

O excepție este modelul (Akkar & Bommer, 2007) în care regresiiile s-au efectuat atât pentru valorile maxime dintre cele două componente ale vitezei terenului (PGV) cât și pentru media lor geometrică (care nu a redus semnificativ variabilitatea aleatorie a reziduurilor).

Variabilitatea între stațiile seismice (intra-eveniment) exprimată prin dispersia σ_r^2 se calculează, după (Boore, Joyner & Fumal, 1997), adaptare:

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{nr.inreg} \sum_{j=1}^{nr.inreg} \frac{(\lg Y_{1j} - \lg Y_{2j})^2}{4} \quad \text{Ec. 2-6}$$

unde indicii 1 și 2 reprezintă numărul componentelor accelerogramei j. În varianta originală, logaritmiile din partea dreapta a ecuației de mai sus erau naturali și legea de atenuare era exprimată în logaritmi naturali.

Coeficienții relației de atenuare au fost determinați separat pentru terenuri de tip B și terenuri de tip C, din cauza valorilor mult mai mici ale ordonatelor spectrale și a formei spectrelor deplasare pe teren de tip B. Au fost întâmpinate probleme de convergență, în special pentru terenurile de tip B, pentru unele perioade coeficienții fiind determinați din regresie într-o singură etapă.

În vederea îmbunătățirii răspunsului pentru cutremure cu magnitudine mare (>7.1) s-a explorat oportunitatea adăugării unui termen pătratic relației de atenuare de bază, ajugându-se la următoarea formă:

$$\lg(SD) = a + b(M_w - 6) + d(M_w - 6)^2 - \lg \sqrt{D_{epi}^2 + h^2} + c \sqrt{D_{epi}^2 + h^2} + \varepsilon_r + \varepsilon_e \quad \text{Ec. 2-7}$$

care a condus într-adevăr la îmbunătățirea predicțiilor pentru cutremurul din 4 martie 1977 și a micșorat într-o anumită măsură valorile reziduurilor.

Din cauza faptului că toate accelerogramele cutremurelor moderate și majore înregistrate în România sunt analogice, valorile calculate ale spectrelor de deplasare pot fi considerate valide până la perioade de maximum 4s. S-au depus eforturi în direcția predicției valorilor spectrale până la perioade de 8s. Înregistrările naționale de după 2004 sunt digitale și de calitate înaltă, dar au fost produse de cutremure cu magnitudine $M_w \leq 6.0$. Acesta a fost unul dintre motivele pentru care au fost adăugate în baza de date cutremure ce au avut loc în Japonia, de magnitudine apropiată evenimentelor majore din România, produse la adâncimi intermediare. Înregistrările provenite din Japonia sunt înregistrări digitale de calitate ce pot fi considerate de încredere până la perioade de peste 10s.

Pentru a investiga dependența de baza de date a modelului de atenuare, regresia a fost efectuată pe trei seturi de date, unul ce conține numai înregistrări naționale ale cutremurelor din 1977, 1986 și 1990, al doilea set de date a fost constituit doar din înregistrări digitale (naționale, cu $5.2 \leq M_w \leq 7.4$ și japoneze, din rețelele Kik-Net și K-NET, cu $6.0 \leq M_w \leq 7.1$) iar coeficienții au fost determinați până la perioade de 8s și, în final, unul ce conține cutremurele din întreaga baza de date cu coeficienții de regresie calculați în intervalul 0.1 – 4.0s.

Se atrage din nou atenția asupra faptului că, din cauza numărului redus de înregistrări disponibile pe teren tare (stâncă sau terenuri stâncoase, tip A conform Eurocode 8) și a lipsei înregistrărilor mișcărilor seismice puternice în spatele arcului carpatic acestea nu au fost selectate în baza de date. Legea de atenuare are valabilitate în zona din fața arcului carpatic: Moldova, Muntenia și Dobrogea pe terenuri de tip B și C.

2.2.1 Setul de înregistrări naționale moderate și puternice

Primul set de date analizat este reprezentat de înregistrări ale cutremurelor din 4 martie 1977 ($M_w = 7.4$), 31 august 1986 ($M_w = 7.1$), 30 mai 1990 ($M_w = 6.9$) și 31 mai 1990 ($M_w = 6.4$). Acestea se remarcă prin cerințele mari de deplasare impuse structurilor înalte ($T > 1.0s$) situate pe terenuri de tip C, caracteristică observată și la cutremurele istorice (cutremurul din 1940 care a afectat grav structurile înalte din București, și, probabil, la cutremurul devastator din 1802 ce a provocat colapsul Turnului Colței și a majorității clopotnițelor bisericilor din București).

Datorită faptului că setul de accelerograme provenit de la aceste cutremure fusese deja procesat (Borcia, 2008), nu s-a mai intervenit asupra lor. Înregistrările au fost apoi sortate în funcție de tipul de teren și s-a trecut la calculul spectrelor elastice de deplasare pentru o fracțiune de amortizare de 5% din cea critică. Calculul a fost efectuat cu Seismosignal (Seismosoft, 2016) în intervalul de perioade 0.025 – 4.000s, cu un increment de 0.025s. S-au calculat media geometrică și dispersia intra-eveniment pentru fiecare perioadă și fiecare înregistrare din set.

Pentru a ilustra diferența între categoriile de teren și apoi între magnitudini, mai jos sunt prezentate câteva grafice.

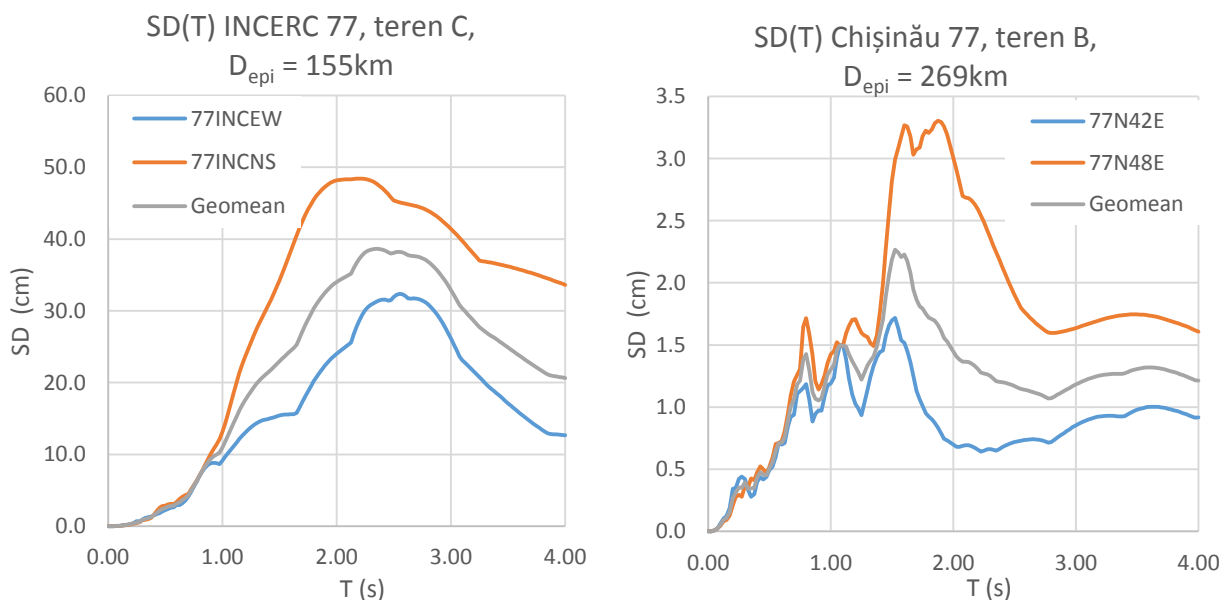


Fig. 2-6 Spectre de deplasare pentru seismul din 4.03.1977 pentru două amplasamente: INCERC și Chișinău.

Se poate observa diferența între valorile maxime ale deplasărilor (48.5cm la INCERC, față de 3.3cm la Chișinău) și între formele spectrelor, deși valorile maxime ale deplasărilor sunt cantonate în același interval de perioade: 1.5 – 2.0s.

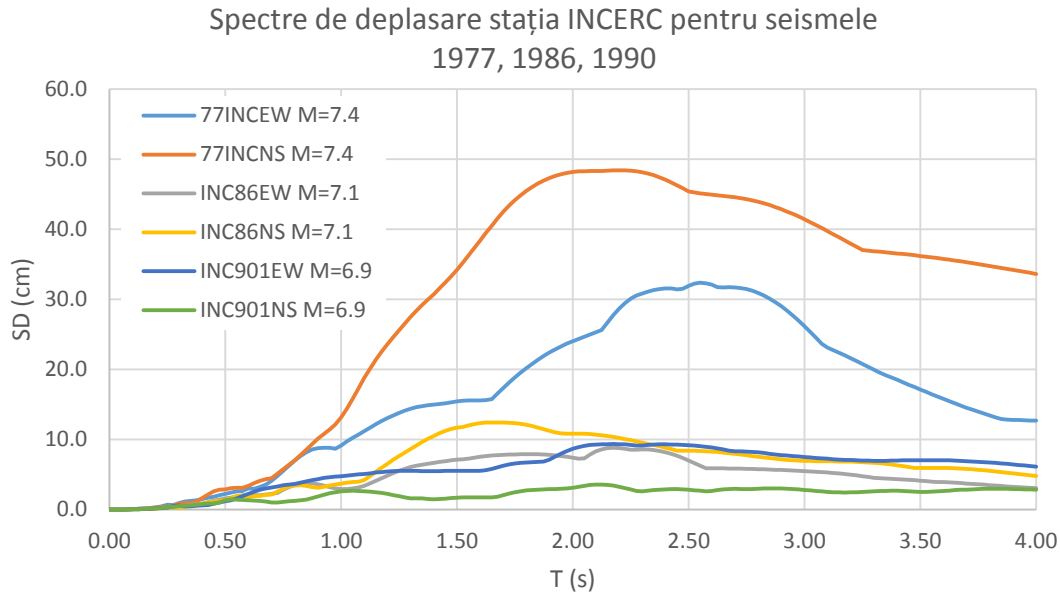


Fig. 2-7 Spectre de deplasare pentru seismele din 4.03.1977, 31.08.1986, 30.05.1990 înregistrate la stația INCERC

Se evidențiază creșterea importantă a cerinței de deplasare cu creșterea magnitudinii moment. Sintetizând într-un tabel valorile maxime spectrale pentru înregistrările de la stația INCERC pentru cutremurele menționate mai sus, împreună cu informații referitoare la magnitudine, valoarea maximă a accelerației terenului (PGA) obținem:

Eveniment	M_w	PGA, cm/s^2		SD _{max} , cm	
		EW	NS	EW	NS
04.03.1977	7.4	188	207	32.4	48.4
31.08.1986	7.1	109	96	8.8	12.4
30.05.1990	6.9	99	66	9.3	3.4

Tabel 2-3 Scalarea cu magnitudinea a spectrului de deplasare, pentru stația INCERC

Din tabelul de mai sus se observă că, pentru o creștere a magnitudinii de la 7.1 la 7.4, PGA crește de aproximativ două ori, în timp ce valorile maxime ale spectrului de deplasare cresc de circa patru ori, în timp ce pentru o creștere de magnitudine de la 6.9 la 7.1, PGA crește cu 25% iar deplasările se dublează (s-a considerat media geometrică a celor două componente). Pornind de la definiția magnitudinii moment, se poate estima raportul dintre energiile eliberate de două cutremure.

$$M_{w1} = \frac{2}{3} \lg M_{01} - 10.7$$

$$M_{w2} = \frac{2}{3} \lg M_{02} - 10.7$$

Ec. 2-8

$$M_{w2} - M_{w1} = \frac{2}{3} (\lg M_{02} - \lg M_{01}) = \frac{2}{3} \lg \frac{M_{02}}{M_{01}} \Rightarrow \frac{M_{02}}{M_{01}} = 10^{\frac{3}{2}(M_{w2} - M_{w1})}$$

unde M_{w1} și M_{w2} sunt valorile magnitudinilor moment ale celor două cutremure iar M_{01} și M_{02} sunt momentele seismice ale celor două evenimente. Momentul seismic poate fi considerat ca o măsură

a energiei eliberate de cutremur. Aplicând ecuația de mai sus celor trei cutremure, se poate spune că seismul din 1977 a fost de aproximativ 2.8 ori mai energic decât cel din 1986, care la rândul lui a fost de aproximativ două ori mai energic decât cel din 1990. Se constată o bună corelație între raportul energiilor eliberate de cele trei cutremure și raportul între deplasările spectrale maxime, pentru stația INCERC.

După calculul mediilor geometrice și ale dispersiei intra-eveniment s-a efectuat regresia în două etape după procedura descrisă în (Joyner & Boore, 1993), coeficienții relației de atenuare fiind obținuți printr-un algoritm de maximizarea verosimilității. Coeficienții au fost determinați pentru perioade cuprinse între 0.10s – 4.00s, cu increment de 0.1s și sunt prezentați în Anexă

Mai jos sunt date câteva simulări ale unor mișcări seismice înregistrate ce se regăsesc în baza de date.

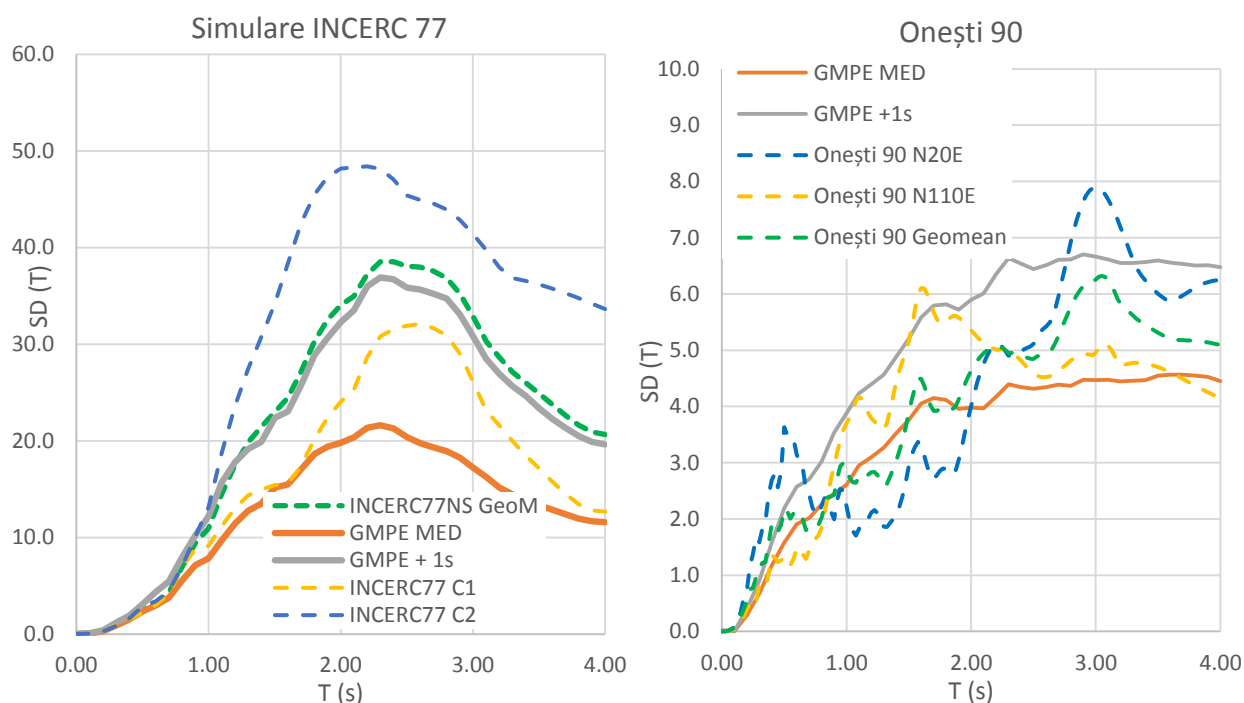


Fig. 2-8 Spectre de deplasare simulat pentru 4.03.1977, 30.05.1990 înregistrate la stația INCERC, respectiv Onești, lege fără termen pătratic

Folosind relația de atenuare (valori mediane), a fost analizată variația spectrelor de deplasare cu mărimea, tipul de teren și distanța epicentrală. Se constată o îngustare a zonei de amplificări mari a spectrului de deplasare cu creșterea mărимinii seismului, în special pentru teren C. Cutremurele de mărимine mai mică tind să aibă zone cvasi-plat pe un interval extins de perioade, fapt confirmat de spectrele de deplasare calculate pentru seismele din 1986 și 1990. Se remarcă valori foarte mari a amplificării relative între valorile spectrale așteptate pe teren C, respectiv B. Acestea se reduc la valori întâlnite în literatură, (Cauzzi & Faccioli, 2008), pentru mărимinuni moderate ale seismului ($M_w \approx 7.0$).

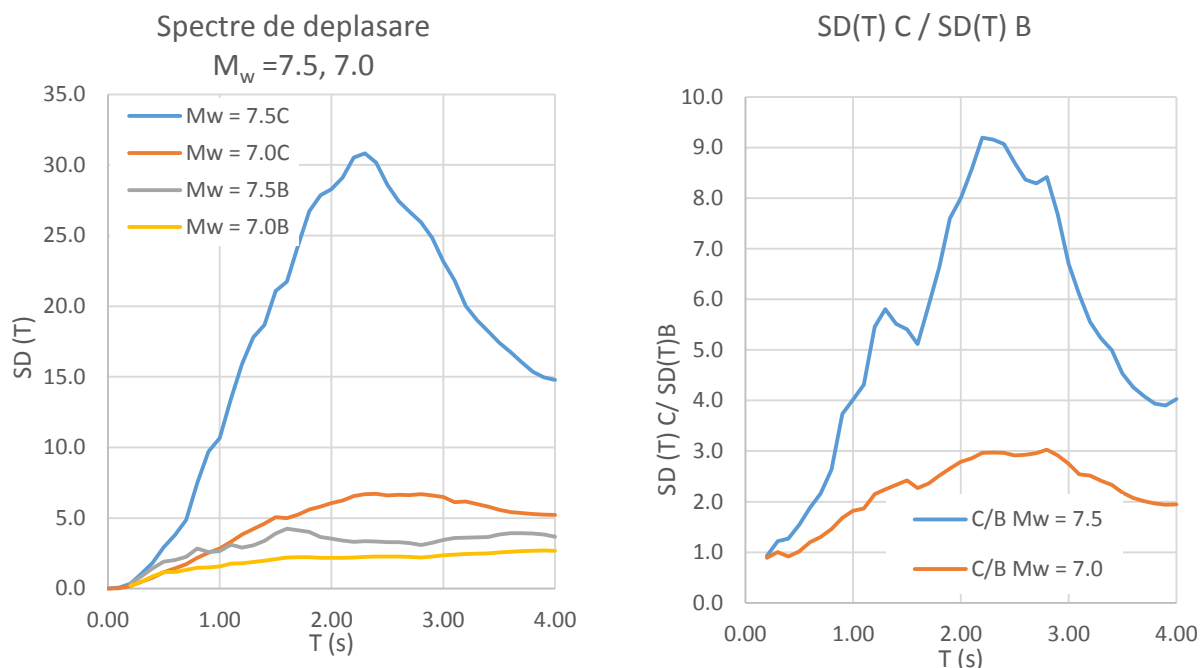


Fig. 2-9 Variația cerinței de deplasare cu magnitudinea și tipul de teren și raportul între cerințele de deplasare pe teren C, respectiv B

Variația cu distanța epicentrală este analizată în figurile următoare. Pentru teren C, vârful pronunțat se află în vecinătatea perioadei de 2.20s și are tendința ușoară de migrație către perioade mai mari odată cu creșterea distanței epicentrale. Terenul de tip B se remarcă prin valori mult mai mici ale deplasărilor spectrale, cu un vârf pronunțat în jurul perioadei de 1.80s urmat de o zonă relativ plată.

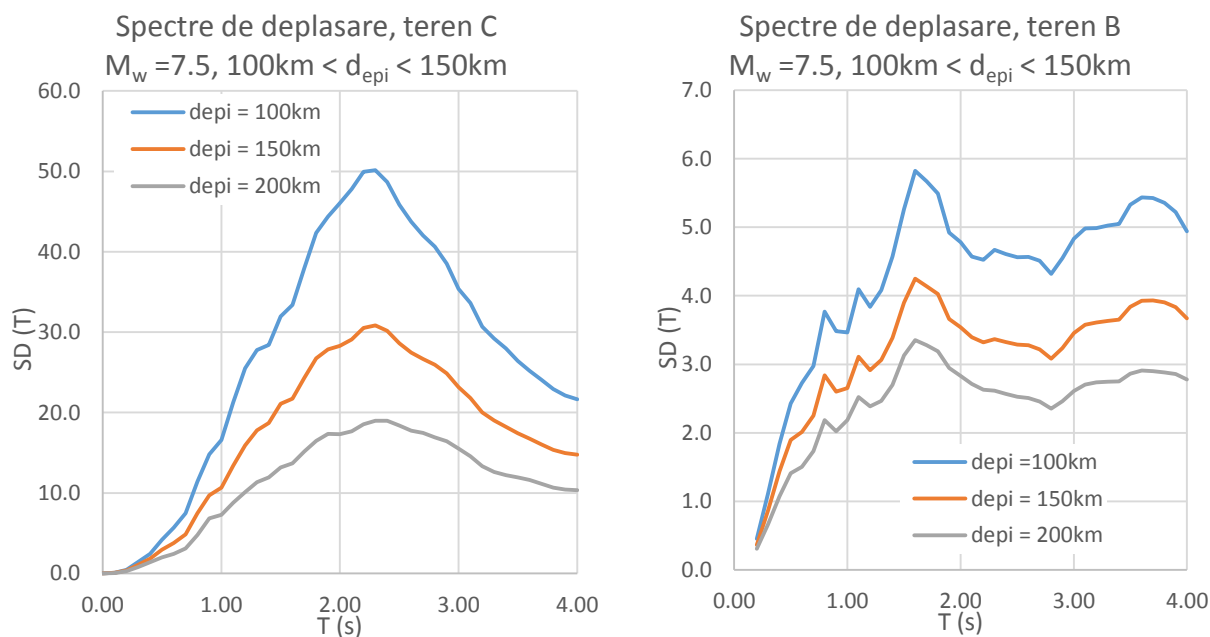


Fig. 2-10 Spectre de deplasare generate pentru mai multe distanțe epicentrale și teren C, respectiv B

În dorința de a apropia mai mult rezultatele legii de atenuare de datele culese în timpul cutremurelor puternice ($M_w \geq 7.1$), s-a experimentat introducerea unui termen pătratic în relația de atenuare.

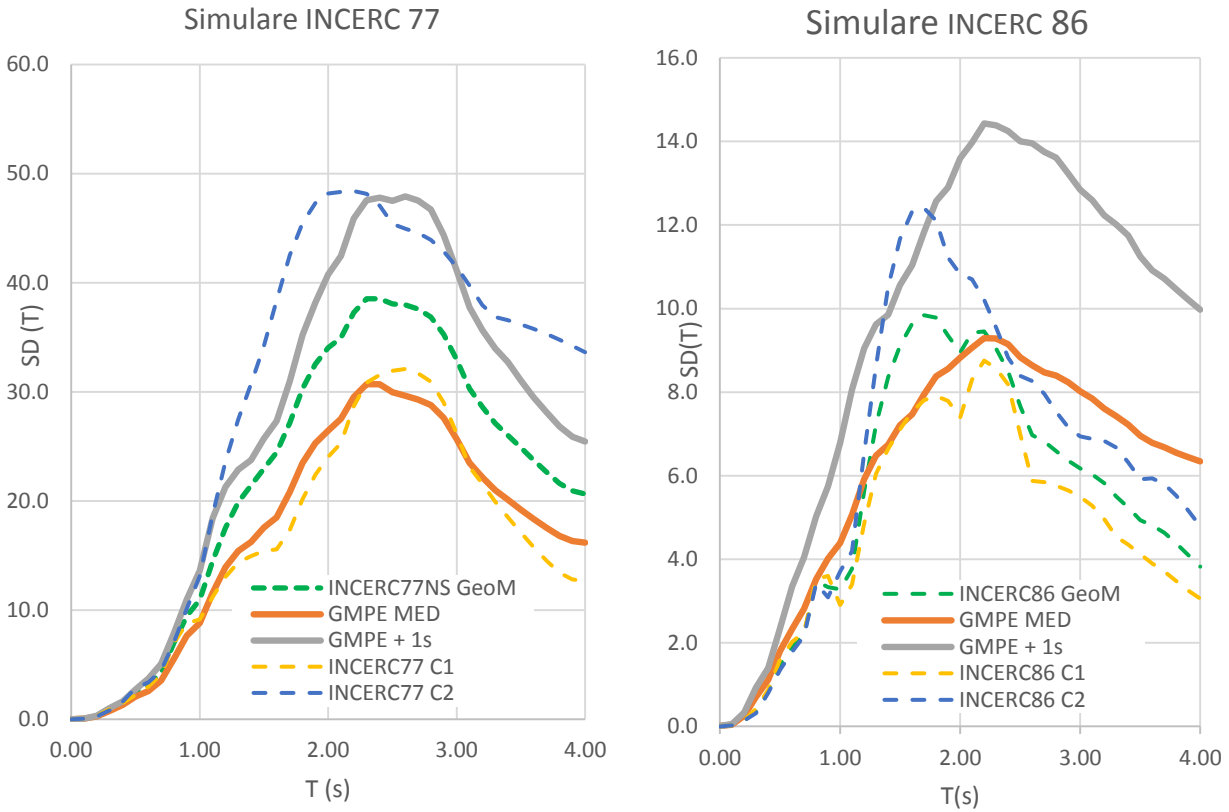


Fig. 2-11 Spectre de deplasare simulat pentru 4.03.1977, 31.08.1986 înregistrate la stația INCERC, lege cu termen pătratic

Se observă că, în general, valoarea mediană $\pm 1\sigma$ înfășoară cele două componente ale fiecărei înregistrări.

Din cauza termenului pătratic, legea de atenuare atinge un punct de extrem. Valoarea numerică a acestuia se obține prin derivarea expresiei relației de atenuare în raport cu magnitudinea, egalarea cu zero și rezolvarea ecuației (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion & Neagu, 2015):

$$\frac{\partial(\lg(SD(T)))}{\partial M_w} = \frac{\partial}{\partial M_w} (b(M_w - 6) + d(M_w - 6)^2) = b + 2d(M_w - 6) = 0$$

Ec. 2-9

$$M_w^{sat} = 6 - \frac{b}{2d}$$

unde M_w^{sat} este magnitudinea punctului de extrem. Evident, M_w^{sat} trebuie calculată la fiecare perioadă unde este evaluat $SD(T)$.

Dacă coeficientul $d < 0$, M_w^{sat} este un punct de maxim și legea va furniza valori neacoperitoare pentru $SD(T)$ dacă $M_w > M_w^{sat}$. Relația trebuie plafonată la o magnitudine limită superioară în cazul în care M_w^{sat} se găsește în domeniul ei de valabilitate.

Dacă coeficientul $d > 0$, M_w^{sat} este un punct de minim și legea va furniza valori neacoperitoare pentru $SD(T)$ dacă $M_w < M_w^{\text{sat}}$. Relația trebuie plafonată la o magnitudine limită inferioară în cazul în care M_w^{sat} se găsește în domeniul ei de valabilitate.

Pentru teren de tip B, $d < 0$ pentru toată gama de perioade, deci trebuie fixată o magnitudine limită superioară. Din păcate, M_w^{sat} se găsește în intervalul de magnitudini al setului de date analizat. Deci, legea de atenuare cu termen pătratic, pentru teren B, este:

$$\lg(SD) = a + b(M_w - 6) + d(M_w - 6)^2 - \lg \sqrt{D_{\text{epi}}^2 + h^2} + c \sqrt{D_{\text{epi}}^2 + h^2} + \varepsilon_r + \varepsilon_e, \quad \text{Ec. 2-10}$$

$M_w = 7.00$ pentru $M_w > 7.00$, $0.0 \leq T \leq 4.0s$

Pentru teren de tip C, $d < 0$ pentru $T \leq 0.8s$ și M_w^{sat} este cel puțin 7.60, iar pentru $T > 0.8s$ $d > 0$ și M_w^{sat} este cel mult 6.40. Deci, legea de atenuare ce include termen pătratic, pentru teren C, este:

$$\lg(SD) = a + b(M_w - 6) + d(M_w - 6)^2 - \lg \sqrt{D_{\text{epi}}^2 + h^2} + c \sqrt{D_{\text{epi}}^2 + h^2} + \varepsilon_r + \varepsilon_e, \quad \text{Ec. 2-11}$$

$M_w = 7.60$ pentru $M_w > 7.60$, $T \leq 0.80s$,
 $M_w = 6.40$ pentru $M_w < 6.40$, $T > 0.80s$

2.2.2 Setul de înregistrări digitale

Acest set cuprinde numai înregistrări digitale, de înaltă calitate, ce provin de la cutremure cu magnitudini situate în intervalul $5.2 \leq M_w \leq 7.1$, produse la adâncimi 66 – 135km în România și Japonia. După filtrarea înregistrărilor conform procedurii descrise mai sus, s-a trecut la calculul spectrelor de deplasare până la perioade de 8.0s, folosind programele Seismosignal (Seismosoft, 2016) și ViewWave (Kashima, 2016). Scopul pentru care investigația a fost împinsă la perioade atât de mari a fost de a “cartografia” zona de perioade de după 4s, unde se opresc informațiile de încredere provenite de la cutremurele mari și moderate înregistrate analogic. Există informații că ar exista vârfuri spectrale mai mari decât cele prezente în spectrul de deplasări la 2.0s pentru cutremurele mari și amplasamente din Câmpia Română. Atât considerente de natură seismologică (modelul Brune), cât și de natura geotehnică conduc spre concluzia că asemenea vârfuri ar exista în jurul unei perioade de 5-6s. Din păcate, acest studiu a putut pune în evidență acest lucru doar într-o mică măsură.

Până la 4.00s incrementul a fost de 0.10s, apoi a fost mărit la 0.20s pentru perioade de până la 6.0s, urmând ca până la 8.00s coeficienții de regresie să fie determinați la un pas de 0.40s.

Au fost întâmpinate probleme de convergență pentru teren de tip C, în intervalul de perioade 0.20-0.60s și apoi între 4.40 și 8.00s. Pentru al doilea interval a funcționat totuși algoritmul de regresie într-o singură etapă, valorile coeficienților intabulați fiind astfel calculate.

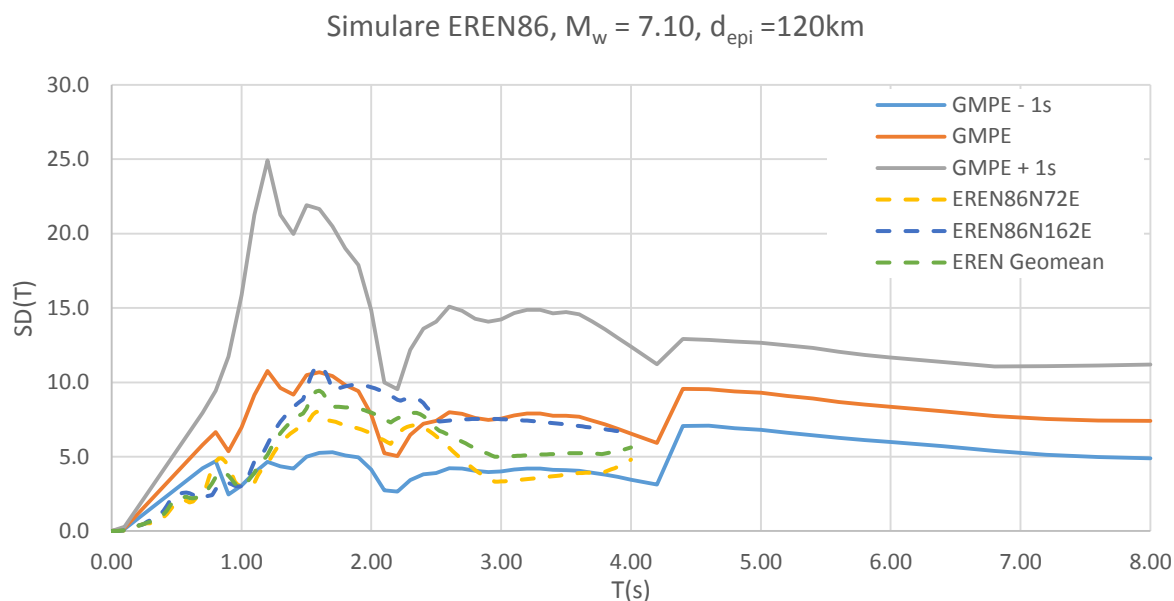


Fig. 2-12 Simulare EREN 86

Sunt puse în evidență vârfuri și paliere după 4.00s, probabil că seismele din baza de date nu au fost suficient de puternice să excite straturile de sedimente ce au perioadele fundamentale între 4.0 și 8.0s. Valorile spectrale sunt mai mici decât cele corespunzătoare primului vârf, ce se găsește în jurul valorii de 1.20s pentru teren C (în locul valorii de circa 2.00-2.30s pentru primul set de înregistrări). Cu toate acestea modelul reușește să prezică rezonabil spectrul unei înregistrări ce nu a fost inclusă în setul de date pe care s-a făcut regresia.

2.2.3 Setul ce cuprinde toată baza de date

Setul cuprinde toate înregistrările din baza de date, 272 perechi de componente orizontale perpendiculare. Din nou apar probleme cu convergența în intervalul 0.30-0.70s pentru teren C. Este posibil ca problemele numerice să se fi propagat odată cu introducerea grupului de înregistrări digitale (care și ele sufereau de această problemă în aceeași gamă de perioade). Odată cu creșterea numărului de înregistrări (în special cele ale cutremurelor de magnitudine mică, $M_w = 5.2 - 6.0$, a crescut variabilitatea. Accelerograma cutremurului din 4.03.1977, care impune cele mai mari cerințe de deplasare, pierde din ponderea pe care o avea în primul set (ce conținea 116 perechi de componente), fapt ce se reflectă în forma și valorile spectrale generate de acest model.

Mai jos este efectuată o simulare a spectrelor de deplasare mediane corespunzătoare unui seism având $M_w = 7.50$, produs la o distanță epicentrală de 150km, fiind analizate toate cele trei seturi de coeficienți de regresie, atât pentru teren C cât și pentru teren B. Pentru teren C se observă similitudinea dintre formele și valorile setului unu și trei până la 1.50s, după care evoluează separat, având ambele vârfurile la aproximativ 2.30s. Setul doi, conținând doar cutremure mici și moderate are o formă spectrală cu totul diferită, cu vârfuri între 1.20 și 1.50s. Dependența rezultatelor de baza de date este mai evidentă în cazul terenului de tip B, unde, deși formele spectrului sunt asemănătoare și își ating maximul toate între 1.30s și 1.50s, palierele ce urmează maximului sunt la niveluri complet diferite.

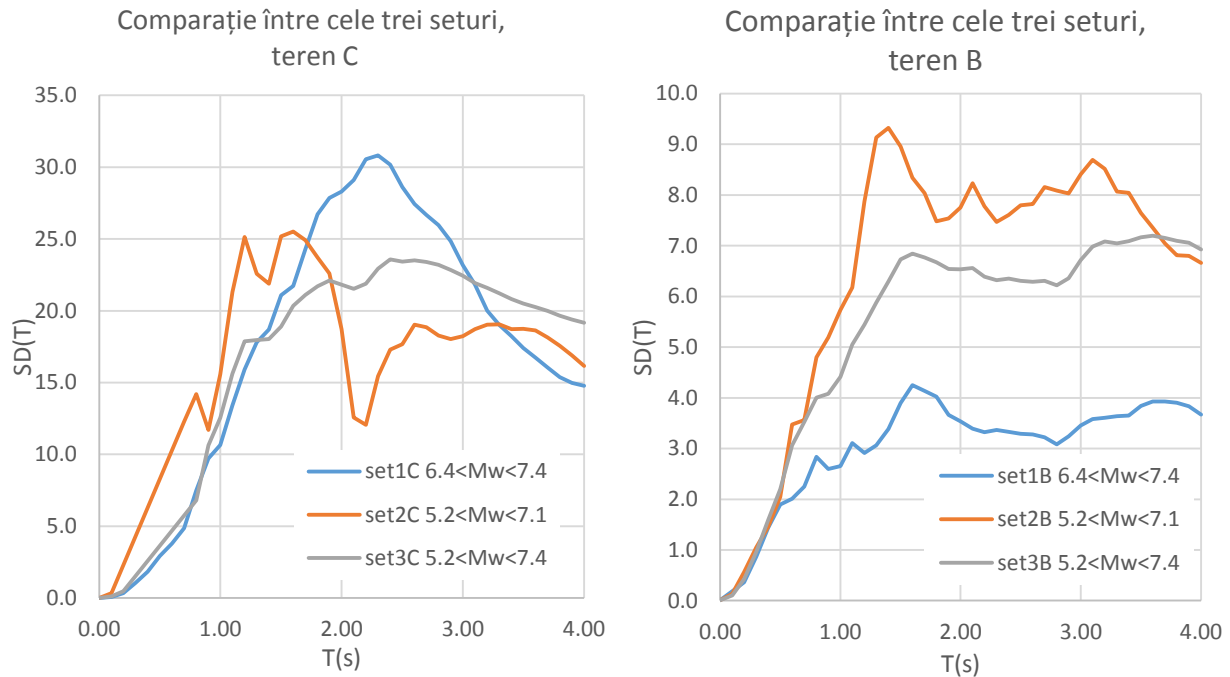


Fig. 2-13 Simularea unui seism cu $M_w = 7.50$, $d_{epi} = 150\text{km}$, valori mediane, pentru cele trei seturi

În urma examinării figurii de mai sus se pot trage următoarele concluzii:

- Pentru explicarea/simularea unor seisme foarte puternice $M_w \geq 7.40$, legea de atenuare cu coeficienții rezultați din regresia primului set se apropie mai mult de datele observate pentru teren C;
- Pentru terenuri de tip B, coeficienții relației de atenuare corespunzători setului complet par a fi un compromis rezonabil în raport cu valorile corespunzătoare celorlalte două grupuri de înregistrări.

2.3 Testarea legii de atenuare

După obținerea coeficienților de regresie trebuie verificat dacă datele furnizate de legea de atenuare sunt de încredere și dacă modelul de atenuare poate fi folosit utilizând un alt set de date decât cel folosit pentru regresie pentru a genera informații folositoare. Un rol important în testarea modelelor este jucat de reziduuri, cantități ce rezultă din diferențele între valorile înregistrate și valorile prezise de legea de atenuare. Valorile pozitive ale reziduurilor indică subestimarea amplitudinilor mișcării seismice, cele negative indicând supraestimarea. Reziduurile normalizate sunt definite (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion & Neagu, 2015) ca:

$$\varepsilon = \frac{Y_{es} - \mu_{es}}{\sigma} \quad \text{Ec. 2-12}$$

ε fiind reziduul normalizat, Y_{es} este logaritmul în baza 10 (sau natural) a amplitudinii mișcării înregistrate în timpul cutremurului e la stația s , μ_{es} este logaritmul valorii mediane furnizate de legea de atenuare, iar σ este abaterea standard a relației de atenuare. Mai jos sunt prezentate

distribuțiile reziduurilor normalizate și distribuția reziduurilor normalizate efective față de cele produse de o repartiție normală standard, pentru trei perioade: 0.10s, 0.70s și 1.40s.

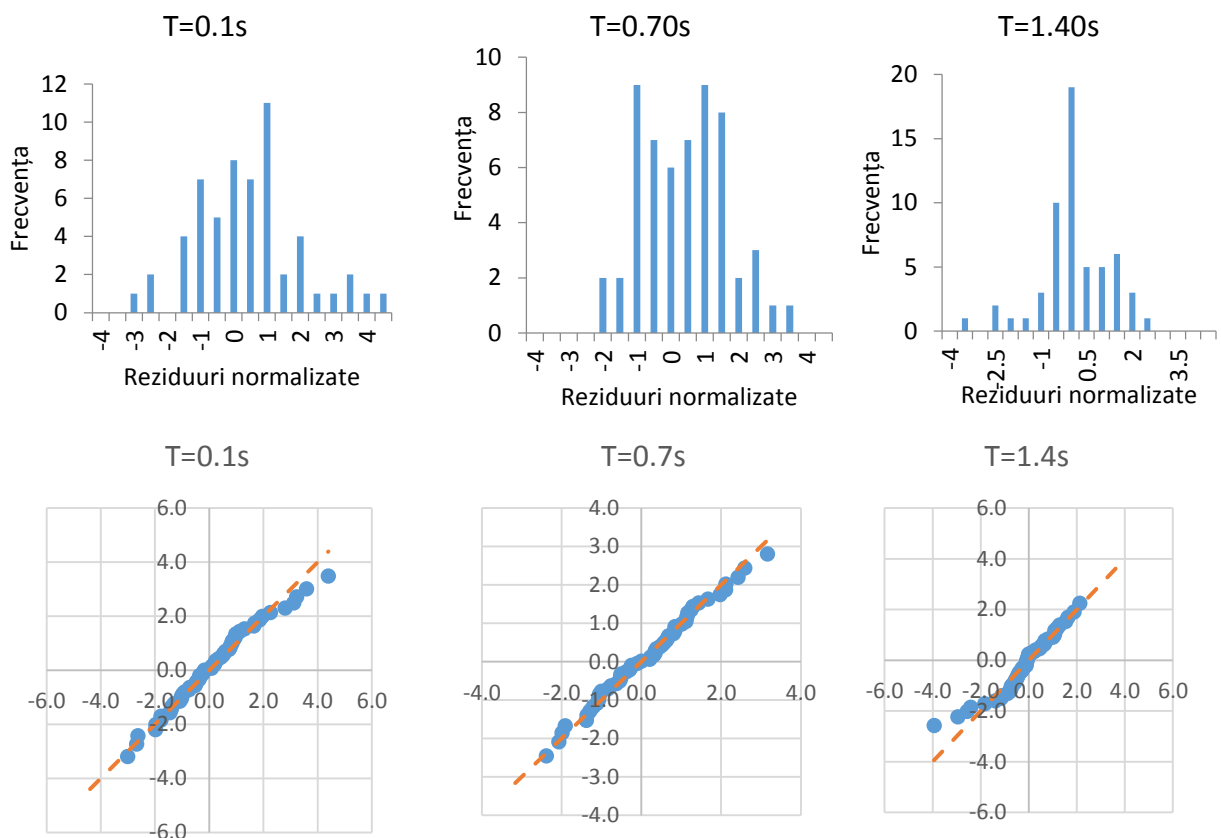


Fig. 2-14 Distribuție reziduuri normalizate sus, QQ plot jos

Cu cât reziduurile normalizate se apropie de dreapta punctată ce trece prin origine, cu atât distribuția normală standard descrie mai bine repartiția reziduurilor. Se observă o distribuție apropiată de cea normală, atât din histograme cât și din alinierea reziduurilor la dreapta ce trece prin origine.

Cu valorile reziduurilor se pot calcula câțiva parametri statistici cu ajutorul cărora se poate evalua calitatea relației de atenuare. Aceștia au fost propuși în (Scherbaum, Delavaud & Riggelsen, 2009) și sunt: mediana reziduurilor normalizate (MEDNR), media reziduurilor normalizate (MEANNR) și abaterea standard a reziduurilor normalizate (STDNR). În funcție de acești indicatori și a unor valori limită, relațiile de atenuare sunt încadrate în patru categorii de încredere, notate de la A (cele mai bune) la D (cele nerecomandabil de aplicat). Cei trei indicatori statistici sunt calculați pentru fiecare perioadă, pentru fiecare set de date, fiind raportați în tabelele ce cuprind coeficienții de regresie. La baza tabelului sunt date valorile medii și mediane ale acestor trei indicatori pentru întreaga gamă de perioade unde au fost calculați coeficienții de regresie.

Reziduurile inter-eveniment se calculează (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion & Neagu, 2015) cu următoarea relație:

$$\delta B_e = \frac{1}{N_s} \sum_{s=1}^{N_s} (Y_{es} - \mu_{es})$$

Ec. 2-13

unde N_s reprezintă numărul de stații, iar Y_{es} și μ_{es} au fost definiți mai sus. Reziduurile intra-eveniment se calculează cu:

$$\delta W_{es} = Y_{es} - (\mu_{es} + \delta B_e)$$

Ec. 2-14

Evaluarea acestor parametrii permite verificarea distribuției reziduurilor inter-eveniment cu mărimea și a distribuției reziduurilor intra-eveniment cu distanța. Mai jos sunt prezentate pentru două perioade 0.80s și 1.60s pentru întreg setul de date și teren C.

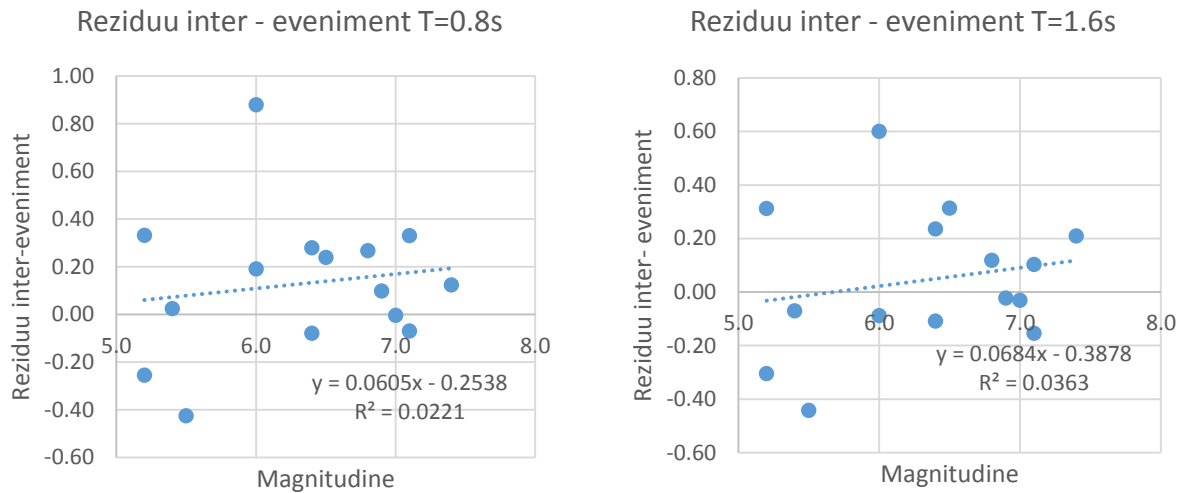


Fig. 2-15 Dependența de mărime a reziduurilor inter – eveniment, tot setul de date

Se constată o corelație slabă între mărimea moment și valoarea reziduurilor inter-eveniment pentru ambele perioade. Față de datele prezentate în literatură, de exemplu în (Văcăreanu, Pavel, Aldea, Arion, & Neagu 2015), rezultatele arătate mai sus pot fi considerate satisfăcătoare.

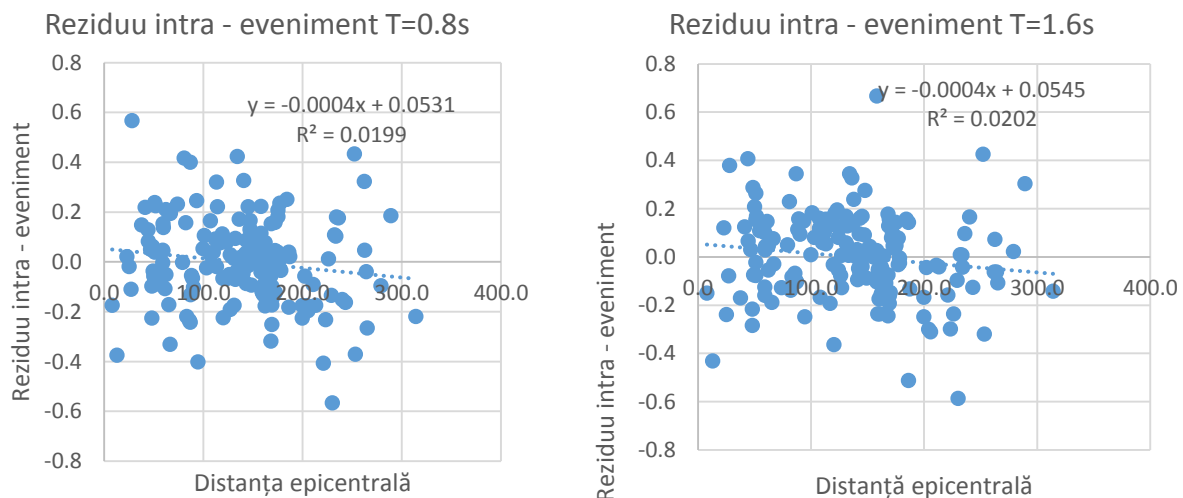


Fig. 2-16 Dependența de distanță a reziduurilor intra – eveniment, tot setul de date

Din figurile de mai sus se poate observa o corelație foarte redusă între reziduuri și distanță. Figurile de mai sus sunt reprezentative pentru întreaga gamă de perioade acoperită de legea de atenuare. Corelații mai slabe (deci modele de atenuare mai bune) se obțin pe seturi de date mai reduse și mai omogene (de exemplu grupul de înregistrări ale cutremurelor din 1977, 1986, 1990).

3 Spectre neliniare de deplasare

Încă din anii '60 ai secolului trecut, cercetătorii au realizat că deplasările impuse în timpul cutremurului pentru structurile ce se comportă inelastic sunt mai mari (pentru anumite intervale de perioade de vibrație) decât cele corespunzătoare sistemelor cu comportare elastică. Pentru perioade de vibrație mai mari decât o anumită valoare (ce ține cont de conținutul de frecvențe al mișcării seismice), răspunsul celor două sisteme, cu comportare inelastică, respectiv elastică, sunt aproximativ egale. Această constatare a fost reținută de comunitatea științifică ca “regula deplasărilor egale”. Unul din primele articole care tratează acest subiect, (Veletsos, Newmark & Chelapati, 1965), a trasat practic modul în care sunt evaluate, conform codurilor de proiectare, deplasările structurilor cu comportare inelastică solitate de mișcări seismice puternice.

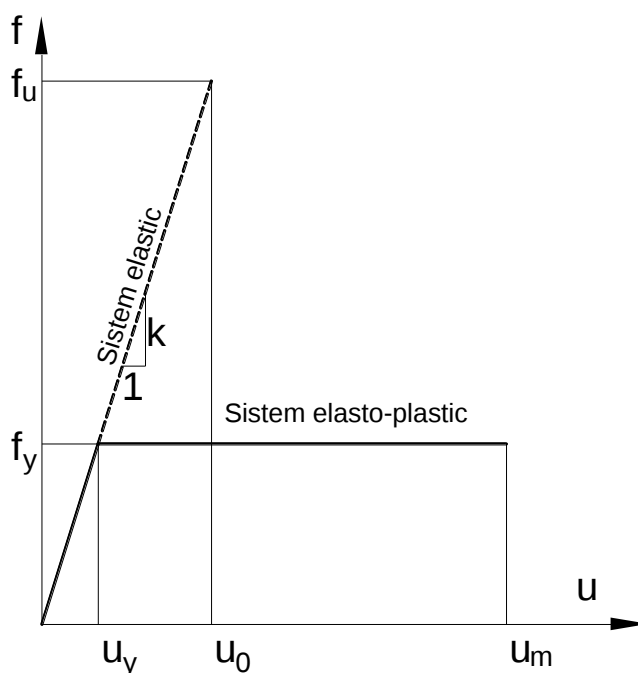


Fig. 3-1 Sistem elasto-plastic și sistemul elastic asociat, după (Chopra, 2012)

În (Chopra, 2012) este descrisă pe larg comportarea sistemelor inelastice cu un grad de libertate dinamică (1GLD) solitate de cutremur. Fiind date două sisteme cu aceeași rigiditate elastică, unul cu comportare elasto-plastică și unul asociat, cu comportare ideal elastică, deplasările maxime înregistrate în timpul unui cutremur puternic vor fi u_m pentru sistemul elasto-plastic, respectiv u_0 pentru sistemul elastic. În sistemul elasto-plastic, curgerea are loc la valoarea de forță f_y , numită în continuare forță de curgere. f_0 este forța capabilă minimă necesară sistemului asociat să rămână în stadiul elastic de comportare. Între aceste forțe există următoarea relație, datorată faptului că sistemele au aceeași rigiditate elastică:

$$f_y = k u_y$$

$$f_0 = k u_0$$

Ec. 3-1

unde k este rigiditatea sistemului elastic asociat.

Se notează cu μ și se numește ductilitate de deplasare raportul între deplasarea maximă a sistemului elasto-plastic și cea de curgere, u_y .

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad \text{Ec. 3-2}$$

Se mai pot defini forța de curgere normalizată, $\bar{f}_y$ și factorul de reducere a rezistenței de curgere, R_y :

$$\begin{aligned} \bar{f}_y &= \frac{f_y}{f_0} = \frac{u_y}{u_0} = \frac{1}{R_y} \\ R_y &= \frac{f_0}{f_y} = \frac{u_0}{u_y} = \frac{1}{\bar{f}_y} \end{aligned} \quad \text{Ec. 3-3}$$

Aceștia sunt legați de ductilitatea de deplasare (Chopra, 2012), prin relația:

$$\frac{u_m}{u_0} = \mu \bar{f}_y = \frac{\mu}{R_y} \quad \text{Ec. 3-4}$$

Ecuatia de mișcare ce guvernează răspunsul sistemului inelastic este:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = -m\ddot{u}_g(t) \quad \text{Ec. 3-5}$$

unde $f_s(u)$ este legea constitutivă forță-deplasare a sistemului. Făcând următoarele notații:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{c}{2m\omega_n}, \quad \bar{f}_s(u) = \frac{f_s(u)}{f_y} \quad \text{Ec. 3-6}$$

se obține (Chopra, 2012):

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 \bar{f}_s(u) = -\ddot{u}_g(t) \quad \text{Ec. 3-7}$$

Ecuția de mai sus reflectă legătura profundă între răspunsul sistemului $u(t)$ pe de-o parte, și frecvența circulară $\omega_n = 2\pi/T_n$, amortizarea ξ , legea constitutivă $f_s(u)$ și deplasarea la curgere u_y , pe de altă parte. Practic, acești parametri guvernează răspunsul sistemului neliniar cu 1GLD. Din acest motiv, devine foarte importantă determinarea precisă a perioadelor proprii de vibrație ale structurilor, atât în faza de proiectare cât și în exploatare. Rezolvând prin metode numerice ecuația de mai sus, se poate obține modul de variație în timp a deplasărilor, vitezelor, accelerațiilor și a altor parametri de răspuns ai sistemului neliniar.

Rezolvând ecuația pentru mai multe valori de perioade proprii de vibrație se pot obține spectre neliniare de accelerații, viteze și deplasări. Acestea se pot exprima în funcție de unul din parametri descriși mai sus (R_y , μ sau $\bar{f}_y$).

Codurile de proiectare seismică, (CEN, 2004), (MDRAP, 2013), folosesc în general pentru obținerea deplasărilor inelastice metode centrate pe majorarea deplasărilor sistemului elastic cu un

coeficient supraunitar ce depinde de perioada structurii – “metoda coeficientului”. Unele coduri de evaluare seismică (ATC-40, 1996) folosesc conceptul de amortizare histeretică echivalentă pentru a micșora cerința de deplasare impusă structurii. Cerințele de deplasare și ductilitate ale structurii reale, cu comportare neliniară, se pot evalua folosind o structură echivalentă (Priestley, Calvi & Kowalsky, 2007), cu comportare liniară și amortizare crescută (datorată incursiunilor în domeniul postelastice în zonele plastice).

Studii extinse asupra spectrelor inelastice și cerințelor de deplasare au fost conduse în (Miranda & Ruiz-Garcia, 2007), (Goda & Atkinson, 2009) și (Michel, Lestuzzi & Lacave, 2014).

În (Craifăleanu, 2005) este efectuat un studiu extensiv asupra spectrelor de răspuns elastic și inelastic folosind o bază de date ce cuprinde înregistrări ale seismelor din 1977, 1986 și 1990. Este evaluată influența unei multitudini de factori asupra răspunsului sistemului cu un grad de libertate dinamică.

Studii asupra cerințelor de deplasare pentru cutremurele de adâncime intermediară din Vrancea au fost făcute în vederea calibrării coeficienților de amplificare a deplasărilor elastice adoptați în codul P100-1/2013. În (Gutunoi & Zamfirescu, 2013) se propune o expresie a coeficientului, funcție de factorul de comportare q , perioada proprie a structurii și perioada de colț. Baza de date este alcătuită din 40 de accelerograme artificiale și coeficienții sunt calculați utilizând modele biliniare și modelul Takeda .

În (Crăciun, Văcăreanu & Pavel, 2016) este propusă o relație pentru calculul coeficientului, funcție de factorul de comportare, perioada proprie de vibrație și perioada de colț. Baza de date este alcătuită din înregistrări ale cutremurelor din 1986 și 1990, iar modelul histeretic este Takeda modificat.

Scopul acestui studiu este de a evalua cerințele de deplasare ale sistemelor inelastice cu 1GLD prin metoda coeficientului, exprimate în funcție de ductilitatea de deplasare a sistemului, μ . Folosind o bază de date cu înregistrări seismice puternice, se pot obține coeficienții de amplificare a deplasărilor elastice, corespunzătoare unui material/model histeretic dat. Studiul este concentrat pe structurile noi din beton armat, modelul histeretic utilizat fiind modelul Takeda modificat, cu degradare de rigiditate.

În procedura de calcul a proiectării bazate pe deplasare, prin folosirea spectrelor de deplasare exprimate în termeni de ductilitate unul dintre pașii intermediari este eliminat, rezultând un mod de calcul ușor simplificat. Avantajul cel mai mare este că nu mai este nevoie să se apeleze la conceptul, contestat de unii cercetători (printre care Anil Chopra), de amortizare histeretică echivalentă.

Prin combinarea legii de atenuare prezentată în Capitolul 2 cu rezultatele acestui studiu, se pot crea spectre de deplasare inelastice, pentru un scenariu seismic dat.

3.1 Baza de date

Baza de date pentru acest studiu a fost construită pornind de la înregistrările folosite pentru obținerea modelului de atenuare pentru spectrul de deplasare. A fost impusă o valoare minimă

pentru valoarea PGA pentru acest nou set de înregistrări deoarece unele caracteristici ale înregistrărilor mișcărilor mai slabe ale terenului diferă semnificativ de înregistrările mișcărilor puternice. În literatură sunt studii care folosesc valori diferite pentru acest prag. Limita variază între 40cm/s^2 (Miranda & Ruiz Garcia, 2003) și $50\text{-}100\text{cm/s}^2$, valorile referindu-se uneori la valoarea minimă a unei componente, uneori la valoarea medie a celor două componente. Pentru acest studiu valoarea PGA limită a fost selectată la 75cm/s^2 , corespunzătoare valorii mediei geometrice a celor două componente orizontale, conform recomandărilor de bună practică din (Goda & Atkinson, 2009).

Baza de date include 107 perechi de componente orizontale (214 înregistrări) provenite de la cutremure cu $6.0 \leq M_w \leq 7.40$ de adâncime intermediară produse în România și Japonia. Au fost incluse și două înregistrări ale unui cutremur cu magnitudinea 5.2 (6.10.2013), ce satisfac limita de PGA impusă. După selecția în funcție de PGA, înregistrările au fost grupate în funcție de tipul de teren pe care se găsește amplasamentul, conform clasificării Eurocode 8. Mai jos sunt prezentate câteva caracteristici ale noului set de date. Din totalul de 214 înregistrări, 140 provin de pe teren de tip C, restul de 74 de pe teren de tip B.

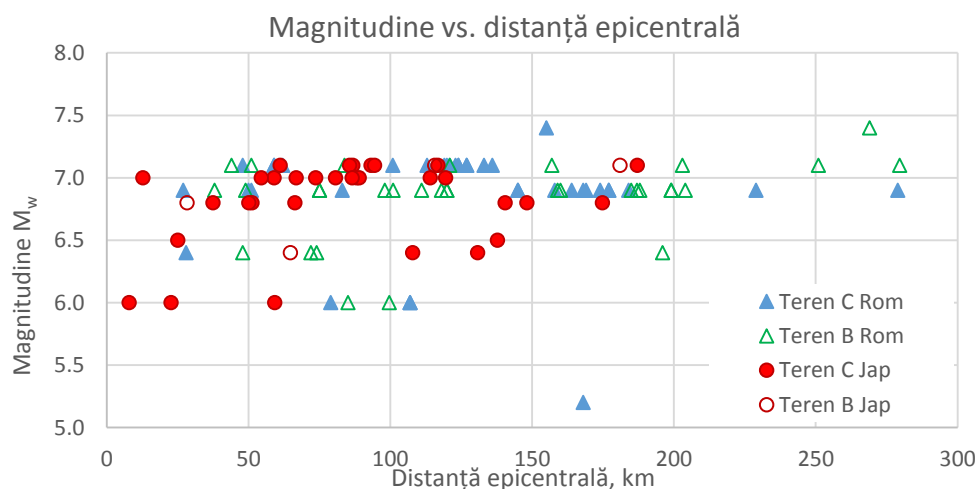


Fig. 3-2 Distribuția în funcție de origine, tipul de teren, magnitudine și distanță a înregistrărilor din baza de date

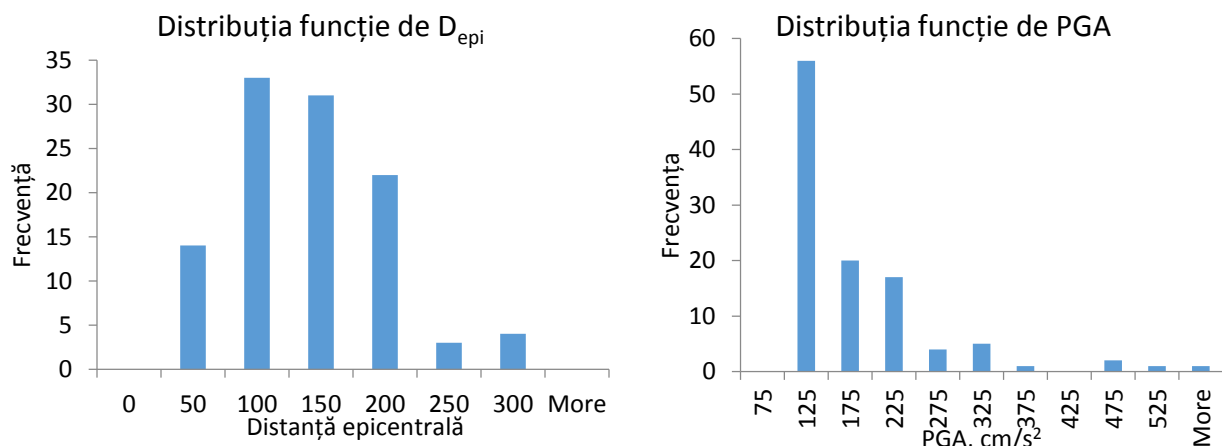


Fig. 3-3 Distribuția în funcție de distanța epicentrală și PGA a înregistrărilor din baza de date

3.2 Model hysteretic

Modelul hysteretic folosit în obținerea coeficienților de amplificare este modelul Takeda modificat, ce face parte din familia modelelor “orientate către vârf” (eng. peak oriented model) din care mai face parte și modelul Clough. Modelele hysteretice din această familie au ca trăsătură caracteristică principală faptul că, la reîncărcare traseul urmat la reîncărcare este dat de punctul de deplasare maximă din ciclul anterior. Modelul Takeda modificat are ca avantaje față de modelul Clough schimbarea rigidității după atingerea fisurării și a curgerii și degradarea rigidității la descărcare; poate reproduce cu suficientă precizie comportarea elementelor de beton armat sub încărcări ciclice.

Modelele hysteretice se pot încadra în funcție de suprafața buclelor în două categorii: “fat” și “thin”. În (Craifăleanu, 2005) este prezentat un procedeu de delimitare între cele două tipuri de bucle hysteretice. Se definește indicele:

$$E_h = \frac{dW}{2\pi F_y D_m} \quad \text{Ec. 3-8}$$

dW fiind energia hysteretică disipată într-un ciclu, F_y forța de curgere iar D_m deplasarea maximă. Dacă indicele E_h este mai mic decât 0.2, bucla este „thin”, în caz contrar fiind „fat”.

În programul USDP, pentru definirea modelului Takeda modificat cu degradare de rigiditate este nevoie de următorii parametri:

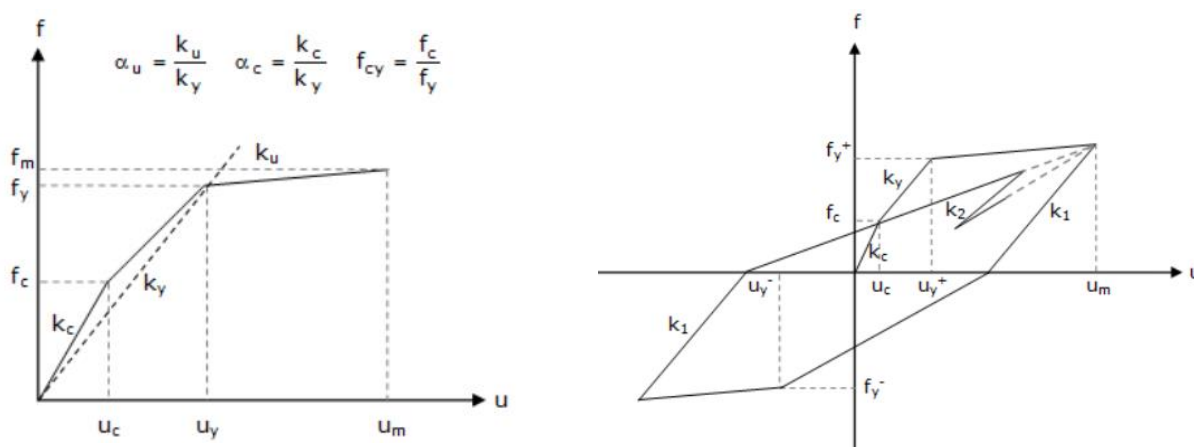


Fig. 3-4 Modelul Takeda modificat cu degradare de rigiditate, (Utility Software for Data Processing, 2016)

α_u – controlează rigiditatea de după curgere, α_c – definește rigiditatea de după fisurare, f_{cy} – reprezintă raportul între forța la care apare fisurarea și forța de curgere.

Rigiditatea la descărcare, k_1 este definită ca:

$$k_1 = \left(\frac{u_y}{u_m} \right)^{\beta_0} \cdot \left(\frac{f_c + f_y}{u_c + u_y} \right) \quad \text{Ec. 3-9}$$

unde f_c și u_c sunt forța, respectiv deplasarea la fisurare, f_y și u_y sunt forța, respectiv deplasarea la curgere, u_m deplasarea maximă iar β_0 este factorul degradării de rigiditate la descărcare.

La reîncărcare, rigiditatea k_2 este:

$$k_2 = k_1 \cdot \beta_1 \quad \text{Ec. 3-10}$$

β_1 este factorul degradării de rigiditate la reîncărcare.

Valorile numerice ale parametrilor folosiți în analizele dinamice neliniare au fost:

$$\alpha_u = 0.02^\dagger, \alpha_c = 1.00, f_{cy} = 0.0001;$$

$\beta_0 = 0.3$, $\beta_1 = 0.6$ (recomandate în (Priestley, Calvi & Kowalsky, 2007) pentru grinzi de beton armat bine conformat – model cu bucle “fat”).

Amortizarea vâscoasă a fost considerată 5% din cea critică și este proporțională cu masa.

3.3 Rezultate

Analizele dinamice neliniare efectuate pe sistemele 1GLD au fost efectuate cu programul USDP (Akkar, Utility Software for Data Processing, 2016). A fost calculat coeficientul de amplificare:

$$c(T) = \frac{SD_{inel}(T)}{SD_{el}(T)} \quad \text{Ec. 3-11}$$

pentru cele 232 de înregistrări pentru perioade cuprinse între 0.05s și 4.00s cu un increment de 0.05s, pentru șase valori de ductilitate de deplasare: 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 și 6.0.

3.3.1 Valorile coeficientului de amplificare

Pentru întreaga gamă de înregistrări, perioade și ductilități de deplasare au fost calculați coeficienții $c(T)$ cu ajutorul USDP. Repartiția valorilor obținute a fost considerată lognormală, studiile din literatură aducând argumente în acest sens (Goda & Atkinson, 2009). S-au determinat valorile medii, mediane, fractilii inferioari și superiori corespunzători $\pm 1\sigma$. Mai jos sunt prezentate valorile mediane pentru toate tipurile de teren (B, C).

[†] Valoarea a fost aleasă în urma efectuării unor analize secționale pentru grinzi, stâlpi și pereți, armați cu oțel BST500C. În literatură sunt întâlnite uzual valori între 0.00 și 0.05.

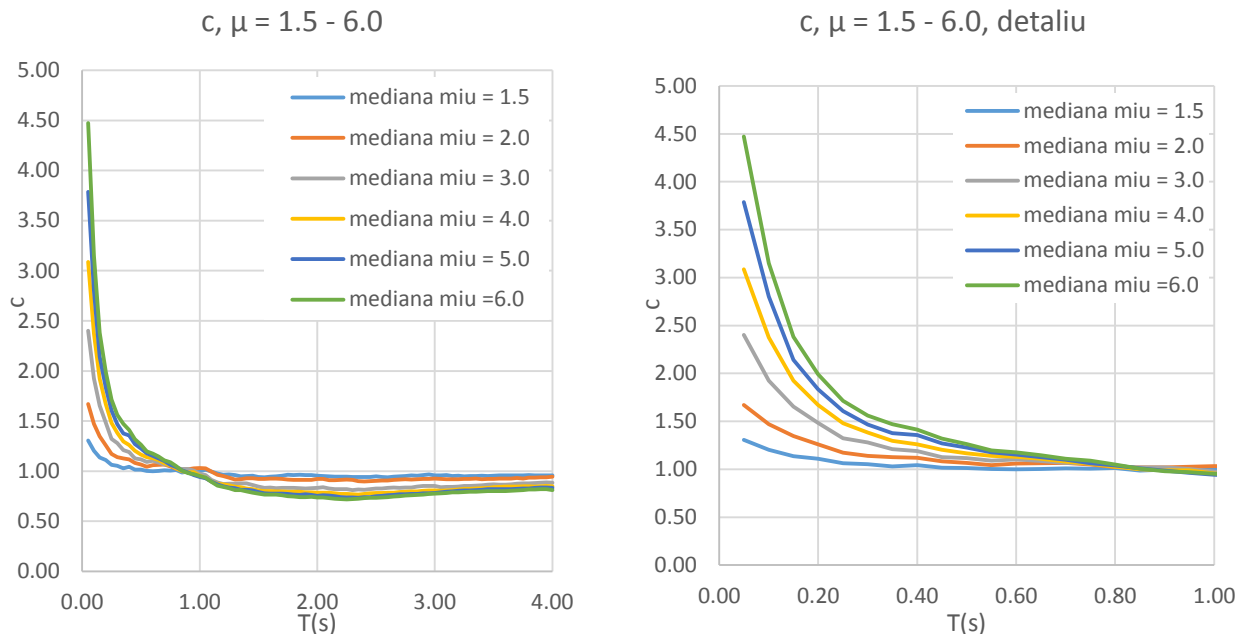


Fig. 3-5 Coeficienți de amplificare, valori mediane, teren B și C (stânga), detaliu (dreapta)

Din figurile de mai sus se observă că regula deplasărilor egale se aplică începând cu perioade de 0.80s – 0.90s, considerând valorile mediane și date de pe ambele tipuri de teren. Cum era de așteptat, valorile mai mari ale coeficientului sunt asociate ductilităților înalte.

Mai jos sunt prezentate valorile mediane c pentru fiecare tip de teren. Se disting perioade diferite pentru care începe să se aplice regula deplasărilor egale pentru valorile mediane. Pentru teren B, această perioadă este situată între 0.60s – 0.70s, iar pentru teren de tip C este aproximativ 1.00s

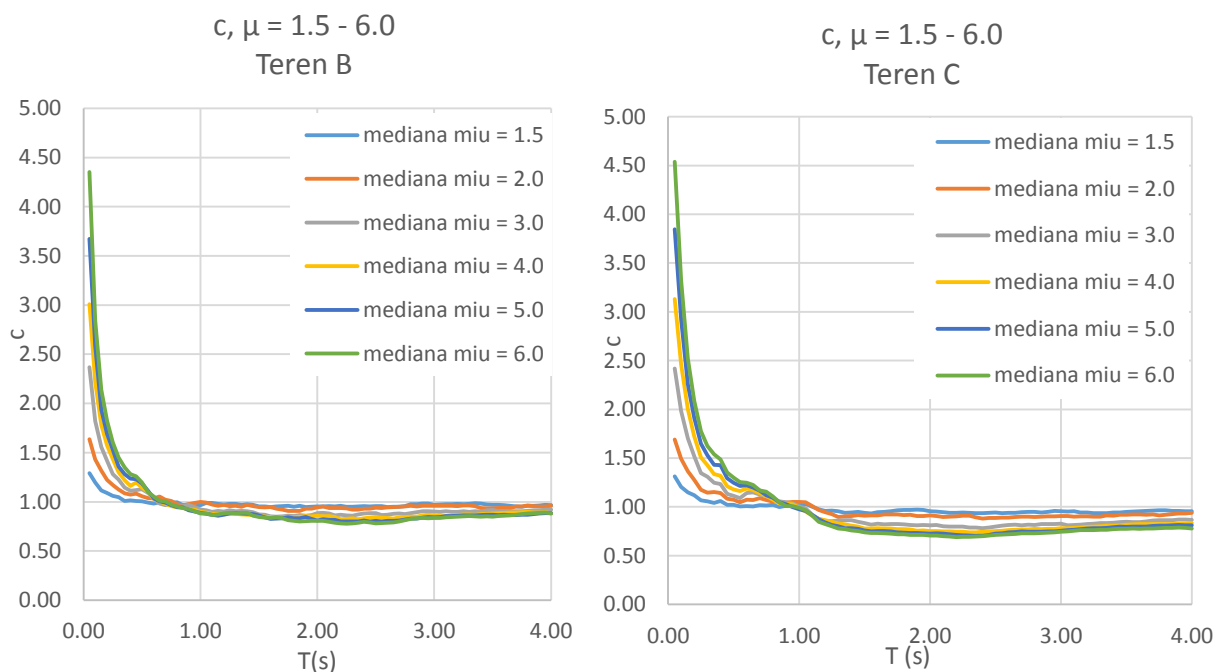


Fig. 3-6 Coeficienți de amplificare, valori mediane, teren B (stânga) și C (dreapta)

Pentru ductilitate de deplasare $\mu = 3$ și teren de tip B și C sunt arătate mai jos valorile mediane și fractilii 15.9% și 84.1%, reprezentative pentru întreaga gamă de ductilități de deplasare.

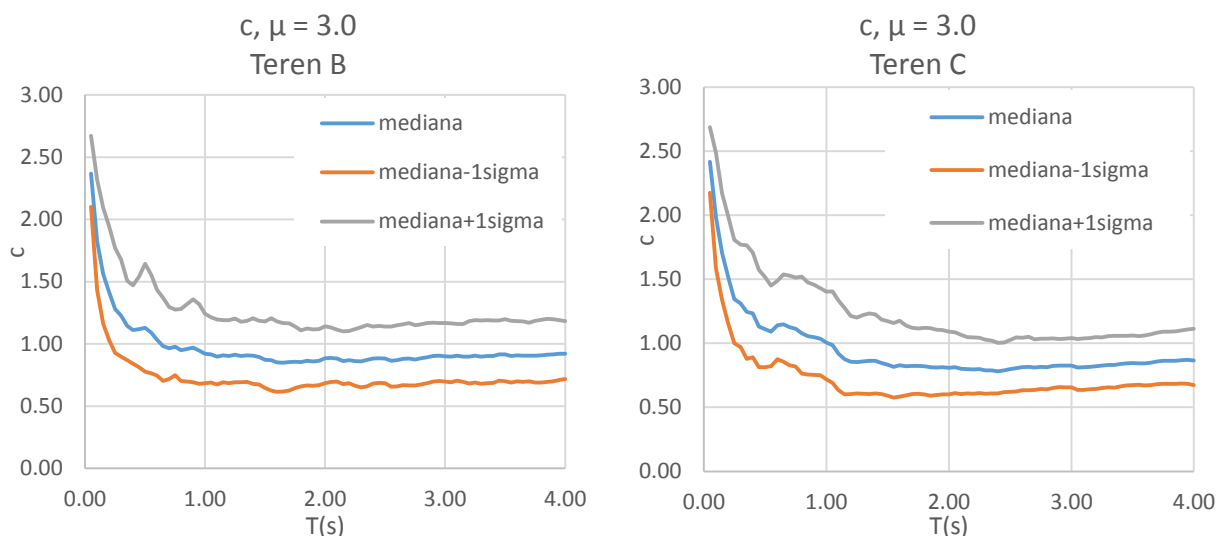


Fig. 3-7 Coeficienți de amplificare, valori mediane $\pm 1\sigma$, teren B (stânga) și C (dreapta)

Din figurile de mai sus se poate constata o variabilitate mai pronunțată pentru perioade până în 0.80s pentru teren B și 1.10s pentru teren C. De asemenea se observă că regula deplasărilor egale este valabilă doar pentru valorile mediane (cel puțin pentru modelul Takeda modificat), valorile corespunzătoare unor fractili superiori (ex 84%) este posibil să nu ajungă pentru nicio valoare de perioadă la coeficienți egali cu 1.00.

Pentru $\mu = 3$ și teren de tip C, variația abaterii standard cu perioada, este prezentată mai jos.

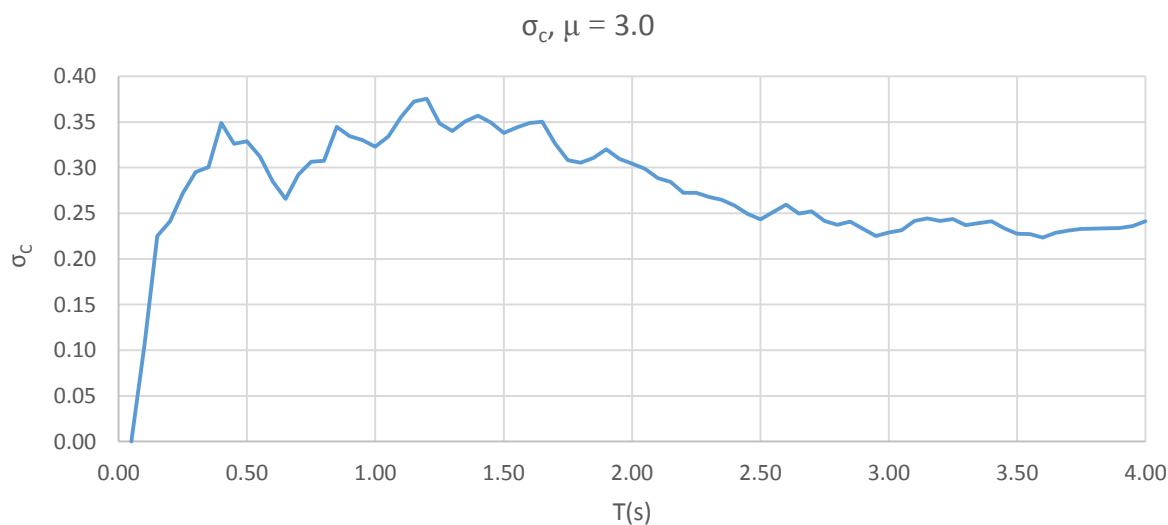


Fig. 3-8 Variația σ_c cu perioada, $\mu = 3$. Teren C

Pentru un interval larg de perioade valoarea σ_c rămâne cvasi-constantă, atingând totuși maxime locale în intervalul 0.30s – 1.50s.

3.3.2 Influența condițiilor de teren

Tipul de teren influențează răspunsul în deplasări al sistemului structural. Pentru a evidenția diferențele de cerință de deplasare pentru structuri situate pe terenuri B și C, s-a calculat raportul dintre valorile mediane ale $c(T)$ pentru terenuri B, respectiv C, și valorile mediane corespunzătoare pentru terenuri B și C (Miranda & Ruiz Garcia, 2003).

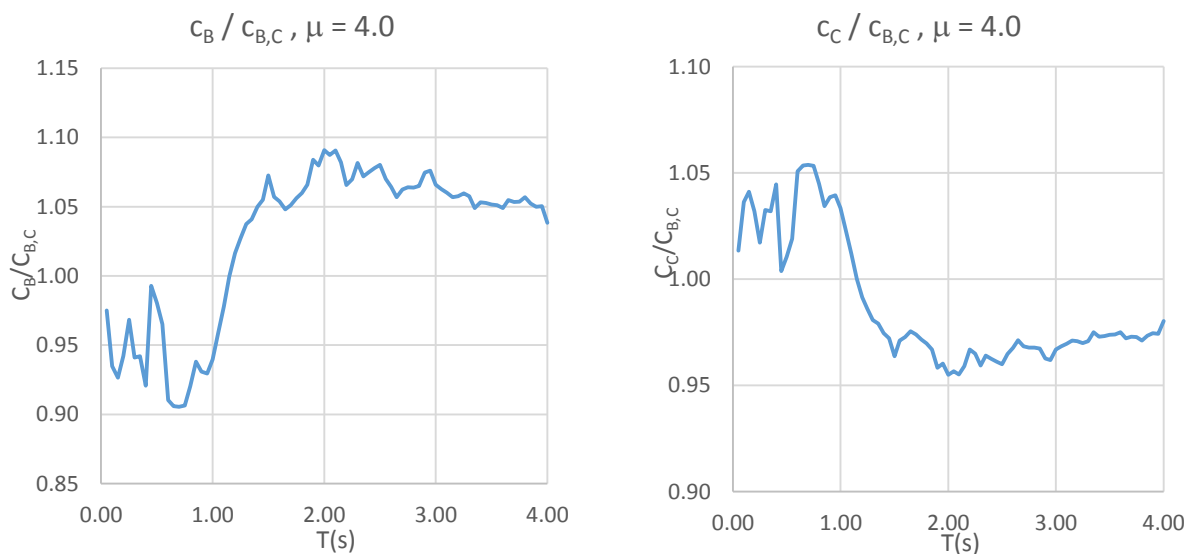


Fig. 3-9 Influența condițiilor de teren, $\mu = 4$. Teren B, stânga; teren C în dreapta

Neconsiderarea condițiilor de teren este acoperitoare pentru terenurile de tip B până la perioade de circa 1.20s, după care este descoperitoare. Pentru terenurile de tip C, situația se inversează. Diferențele se accentuează cu creșterea ductilității de deplasare, nedepășind totuși 10%. Valorile sunt comparabile cu cele prezentate în (Miranda & Ruiz Garcia, 2003) care raportează diferențe de 10-15% pentru teren tip B și de maxim 20% pentru teren de tip C. În baza de date din studiul de mai sus erau un număr egal de înregistrări pe terenuri A, B și C.

3.3.3 Influența magnitudinii

În (Crăciun, Văcăreanu & Pavel, 2016) este evidențiată creșterea valorii $c(T)$ cu creșterea magnitudinii cutremurului, în special pentru perioade sub 0.40s. În acest studiu influența magnitudinii a fost investigată pentru teren C, ce conține cel mai mare număr de înregistrări. Înregistrările au fost ordonate în trei seturi, în funcție de magnitudine. În continuare sunt prezentate rezultatele pentru două ductilități de deplasare, $\mu = 3$ și $\mu = 6$.

Tendința de creștere a coeficientului este prezentă într-adevăr pentru sisteme cu incursiuni importante în domeniul postelastice (orientativ $\mu \geq 4$), pentru $\mu = 3$ fiind înregistrată doar pe domenii limitate de perioade.

Pentru toate cele șase valori de ductilitate pentru care s-au efectuat calcule s-a identificat o zonă centrată în jurul perioadei de 1.10s unde efectul creșterii magnitudinii este mai pregnant, cutremurele cu magnitudine peste 7.00 producând amplificări cu peste 30% mai mari decât cele cu $6.5 \leq M_w \leq 7.00$.

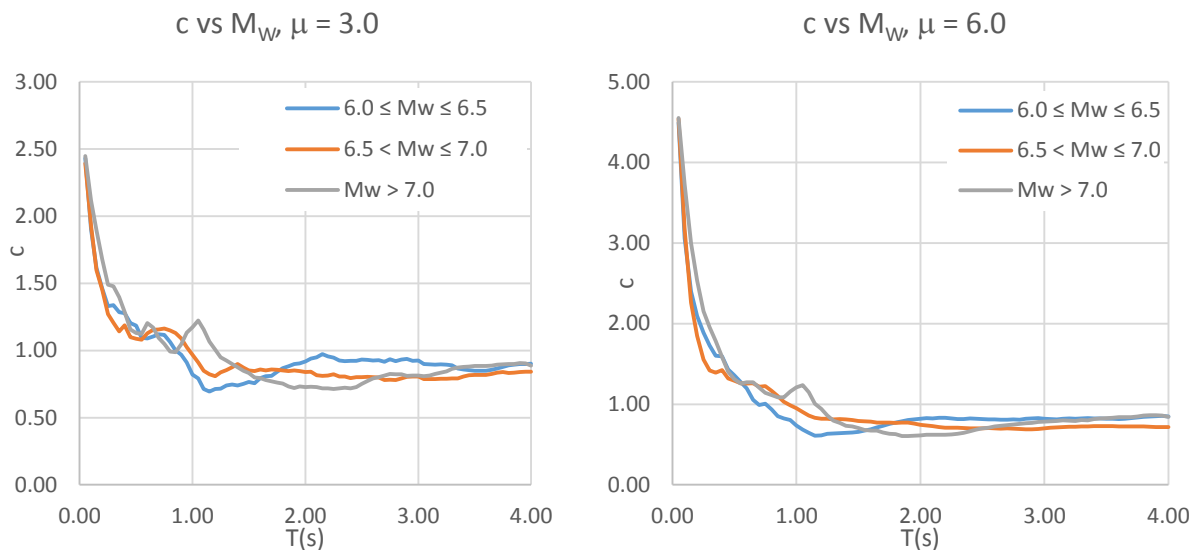


Fig. 3-10 Influența magnitudinii cutremurului, teren C

3.3.4 Influența distanței epicentrale

Punerea în evidență a efectului distanței asupra coeficientului $c(T)$ s-a făcut prin trierea în funcție de distanța epicentrală a înregistrărilor ce provin de pe terenuri C. Acestea au fost grupate în trei seturi. Primul cuprinde cutremure produse la mai puțin de 70km, următorul set conține înregistrări efectuate la 70 – 140km, iar ultimul, înregistrări de la cutremure produse la 140 – 210km de amplasament.

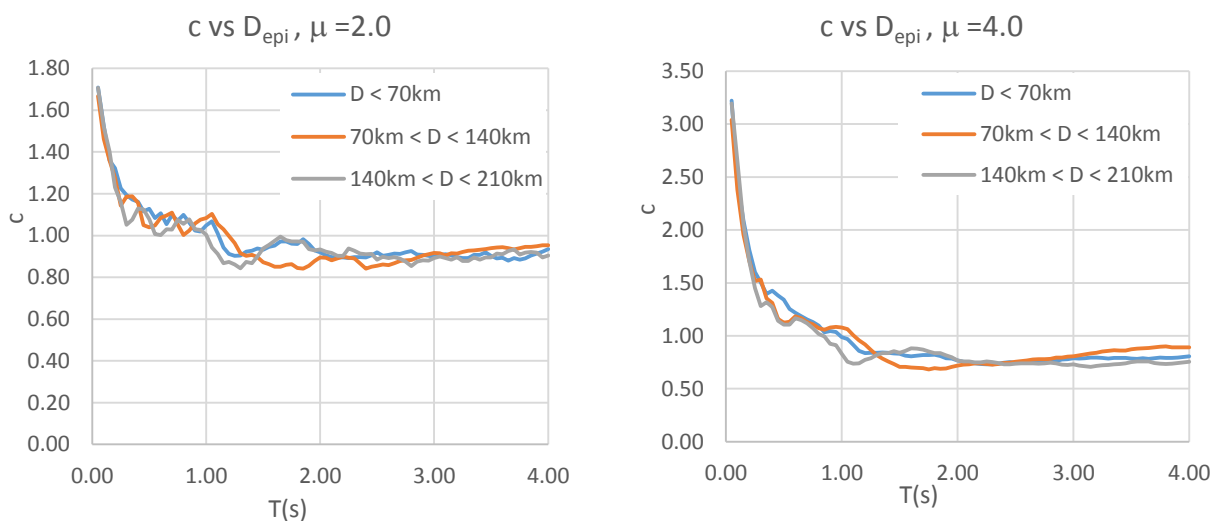


Fig. 3-11 Influența distanței epicentrale, teren C și $\mu = 2.0$ și $\mu = 4.0$

Analizând figurile de mai sus se poate concluziona că distanța epicentrală nu afectează semnificativ valorile coeficientului de amplificare a deplasărilor. La aceeași concluzie au ajuns și (Miranda & Ruiz Garcia, 2003), dar atrag atenția că este posibil ca înregistrări pe amplasamente apropiate de falie (eng. near fault records) să influențeze variația coeficientului în raport cu înregistrările făcute la distanțe uzuale. Singurele influențe sunt pentru sistemele cu ductilitate

redușă, $\mu \leq 2$, în timp ce pentru sistemele mai ductile efectul distanței epicentrale se reduce și mai mult cu creșterea ductilității.

Examinând influența tuturor factorilor enumerați mai sus, se poate trage concluzia, că la nivel global, cea mai mare influență o au condițiile de teren. Acestea influențează forma variației coeficientului și valorile de perioadă la care acesta se poate considera unitar.

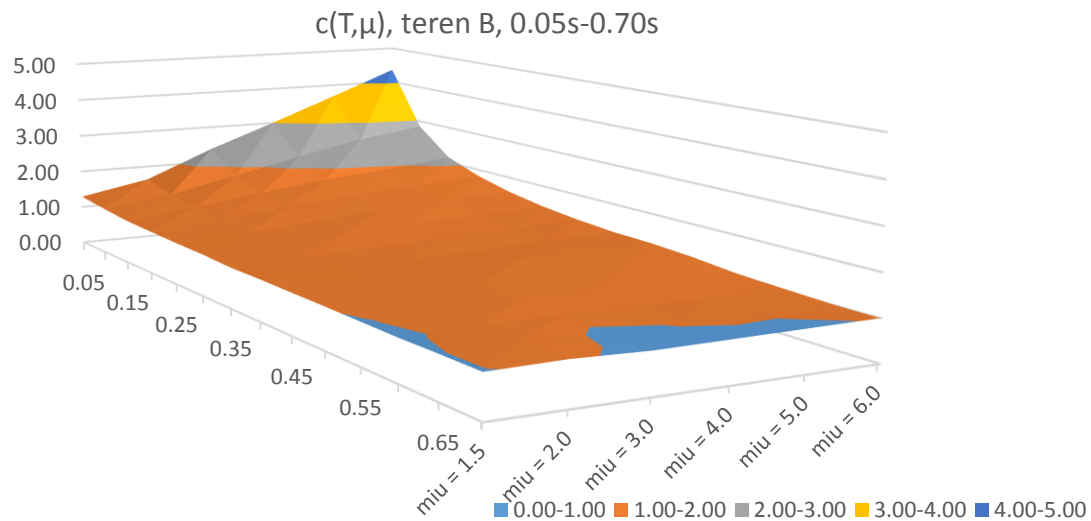


Fig. 3-12 Suprafața generată de $c(T, \mu)$, teren B

O imagine globală pentru tot spectrul studiat de perioade și ductilități poate fi oferit de imaginea de mai sus. Valorile coeficientului generează o suprafață în spațiul c, T, μ , valorile obținute prin calcul jucând rol de curbe generatoare.

3.3.5 Formă funcțională pentru valorile mediane

Pentru a ușura utilizarea datelor referitoare la coeficientul de amplificare a fost găsită o formă funcțională care să furnizeze valorile mediane ale acestuia. Funcția are următoarea formă:

$$c(T) = a_1 \sqrt{T} + \frac{a_2}{T} + a_3 \ln(T), \quad T \leq T_1$$

Ec. 3-12

$$c(T) = 1.00, \quad T > T_1$$

unde a_1, a_2, a_3 sunt coeficienți obținuți prin regresie, pentru fiecare categorie de teren și fiecare nivel de ductilitate de deplasare, iar T_1 este perioada după care coeficientul de amplificare median devine unitar (este determinat în funcție de categoria de teren). În urma analizelor s-au obținut următoarele valori pentru coeficienții a_1, a_2, a_3 și T_1 :

Teren B	a_1	a_2	a_3	T_1 (s)
$\mu = 1.5$	1.028	-0.001	-0.421	0.70
$\mu = 2.0$	1.015	-0.003	-0.489	
$\mu = 3.0$	0.913	0.029	-0.532	
$\mu = 4.0$	0.842	0.056	-0.576	
$\mu = 5.0$	0.791	0.093	-0.560	
$\mu = 6.0$	0.743	0.131	-0.531	

Tabel 3-1 Coeficienți formă funcțională c, teren B

Teren C	a_1	a_2	a_3	T_1 (s)
$\mu = 1.5$	1.033	-0.013	-0.444	1.00
$\mu = 2.0$	1.047	-0.003	-0.506	
$\mu = 3.0$	1.002	0.023	-0.587	
$\mu = 4.0$	0.948	0.051	-0.654	
$\mu = 5.0$	0.903	0.081	-0.699	
$\mu = 6.0$	0.864	0.113	-0.723	

Tabel 3-2 Coeficienți formă funcțională c, teren C

Aceștia au un coeficient de corelație peste 0.99 cu datele originale și furnizează valori ale coeficientului într-un ecart de $\pm 5\%$ față de valorile obținute prin calculul neliniar.

Fixând valoarea abaterii standard σ_c la valoarea medie pe tot intervalul de perioade considerat, se poate obține valoarea coeficientului $c(T)$, folosind doar forma funcțională și tabelele de mai sus. Pentru teren tip C și ductilitate de deplasare 3 este figurată mai jos o comparație între valorile calculate și valorile obținute prin forma funcțională.

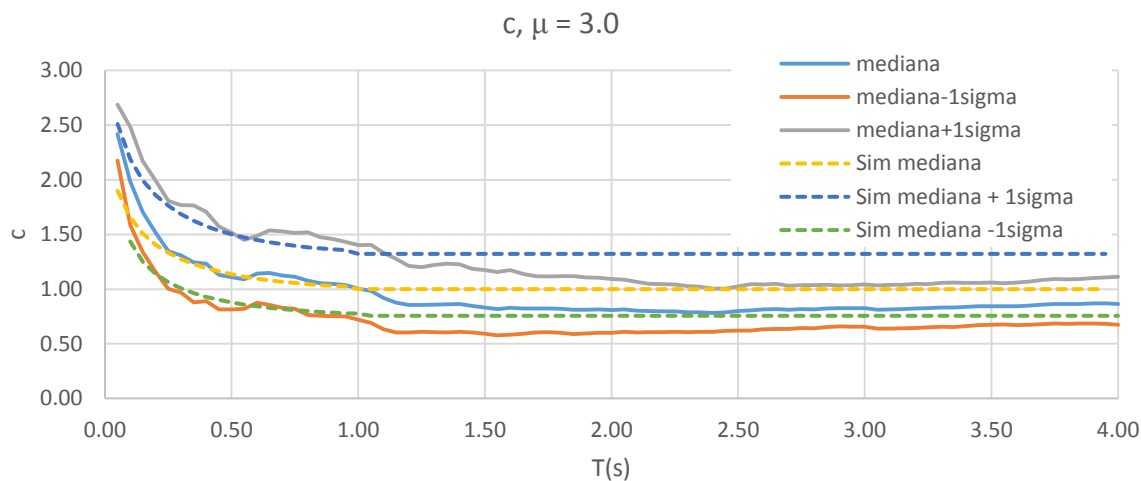


Fig. 3-13 Simularea coeficientului de amplificare, teren C și $\mu = 3.0$

Se constată o bună concordanță pentru valorile mediane, valorile corespunzătoare fractilului superior fiind ușor sub valorile observate. Această situație apare din cauza abordării simplificate a abaterii standard. S-a preferat o expresie simplă pentru σ_c , ceea ce conduce la subestimări ale

fractilului superior. Pentru precizie mai mare se poate dezvolta o expresie mai exactă a σ_c , dar probabil efortul nu se justifică.

3.3.6 Spectre inelastice de deplasare pentru un scenariu seismic dat

Având determinat modelul de atenuare, acesta se poate folosi împreună cu coeficienții de amplificare în vederea obținerii de spectre inelastice de deplasare. La rândul lor, acestea pot fi utilizate ca date de intrare pentru proiectarea bazată pe deplasare.

Procedura de construcție a spectrului inelastic este simplă:

- În urma dezagregării hazardului seismic, rezultă un număr de evenimente, perechi (M_w , d_{epi}) ce generează valorile cele mai mari ale amplitudinii seismice pe amplasamentul considerat;
- Utilizând modelul de atenuare prezentat mai sus, se generează spectrul elastic de deplasare, $SD_{el}(T)$, cu variabilitatea asociată;
- Se determină coeficientul de amplificare, $c(T)$, funcție de materialul din care este alcătuită structura, modelul histeretic, condițiile de teren etc., împreună cu variabilitatea asociată;
- Considerând că cele două variabile de mai sus, $SD_{el}(T)$ și $c(T)$ sunt variabile independente (valorile lor numerice nu sunt corelate), cunoscând repartițiile fiecărei variabile (ambele lognormale), se poate obține spectrul inelastic de deplasare ca:

$$SD_{inel}(T) = SD_{el}(T) \cdot c(T) \quad \text{Ec. 3-13}$$

- Conform (Lungu & Ghiocel, 1982), produsul a două variabile independente lognormal repartizate, este de asemenea lognormal repartizat cu media și abaterea standard:

$$\begin{aligned} m_{\ln SD_{inel}(T)} &= m_{\ln SD_{el}(T)} + m_{\ln c(T)} \\ \sigma_{\ln SD_{inel}(T)}^2 &= \sigma_{\ln SD_{el}(T)}^2 + \sigma_{\ln c(T)}^2 \end{aligned} \quad \text{Ec. 3-14}$$

Ținând cont că modelul de atenuare este exprimat în logaritmi în baza 10 iar pentru derivarea coeficientului de amplificare au fost folosiți logaritmi naturali, se poate face conversia $\lg \rightarrow \ln$ a legii de atenuare. Apoi urmărind ecuațiile de mai sus se poate obține $SD_{inel}(T)$.

Analizând corelația dintre valorile numerice $SD_{el}(T)$ și $c(T)$ pentru mai multe perioade (și un set limitat de date – corespunzătoare cutremurelor 1977, 1986, 1990) s-a ajuns la concluzia că există o slabă corelație (<0.15), pentru unele perioade, sau nu sunt corelate, pentru alte perioade. Atunci expresia de calcul a $SD_{inel}(T)$ ar trebui modificată în:

$$SD_{inel}(T) \approx SD_{el}(T) \cdot c(T) \quad \text{Ec. 3-15}$$

Mai jos sunt prezentate câteva rezultate obținute pentru două evenimente, INCERC1977 și EREN1986. S-au folosit modelul de atenuare cu termen pătratic și coeficienții de amplificare rezultați din calculul neliniar.

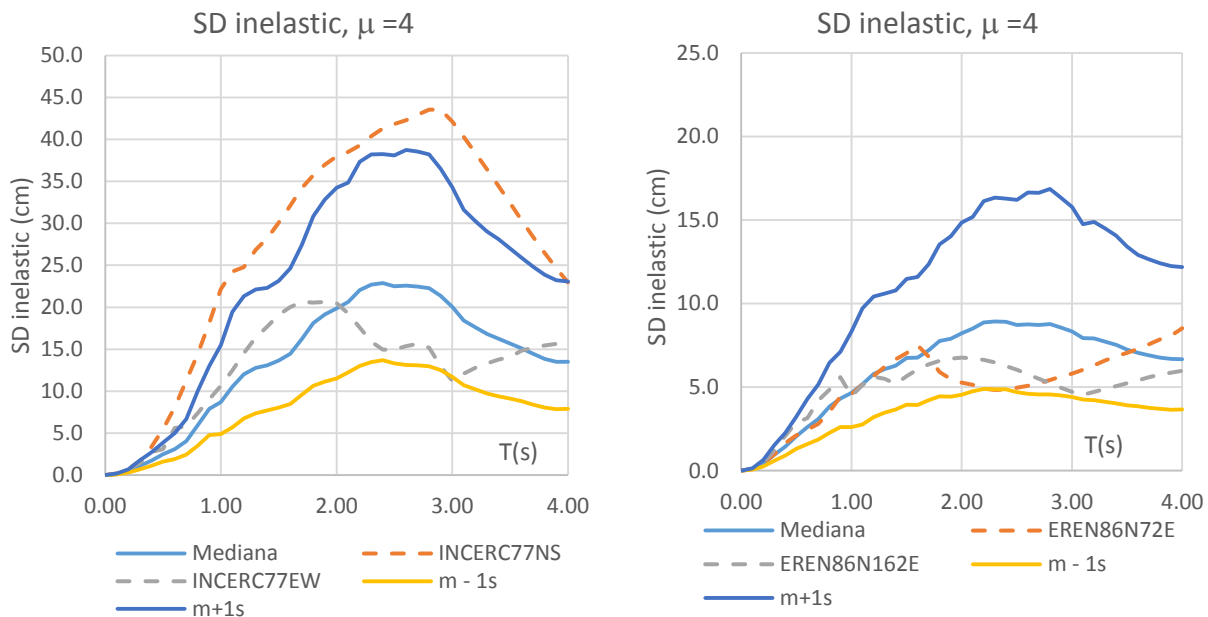


Fig. 3-14 Spectre neliniare simulate (linie plină) pentru cutremurele din 1977 și 1986, $\mu = 4$, teren C

Se poate observa apropierea între spectrele inelastice generate și cele calculate pe baza înregistrărilor de la cele două evenimente. Pentru cutremurul din 1977 se constată că spectrul inelastic calculat este relativ apropiat de cel generat (median +1 σ) pe intervale destul de mari de perioade. Pentru cutremurul din 1986, valoarea mediană generată este foarte apropiată de valorile corespunzătoare celor două componente.

Concluzii

A fost obținut un model de atenuare pentru spectrul deplasărilor relative, corespunzător unei amortizări de 5%, pentru cutremure de magnitudine $5.2 \leq M_w \leq 7.4$ și adâncime intermediară, reprezentative pentru sursa subcrustală Vrancea. Modelul de atenuare este aplicabil amplasamentelor situate pe teren B și C, în fața arcului carpatic (Moldova, Muntenia, Dobrogea). Legea de atenuare a fost testată conform datelor disponibile în literatura de specialitate. Modelul de atenuare a fost obținut pe trei seturi de date, rezultatele cele mai bune obținându-se pentru teren de tip C pe setul de înregistrări naționale de magnitudine moderată-mare și pe cel ce cuprinde întreaga baza de date. Cea mai bună apropiere între setul de date înregistrate și cel prezis de modelul de atenuare este dată de legea de atenuare ce cuprinde un termen pătratic, cu coeficienți determinați pentru primul set de date (seisme din anii 1977, 1986, 1990). În general, spectrele observate ale celor două componente orizontale perpendiculare ale mișcării, sunt mărginite de valorile mediane $\pm$ o abatere standard pentru terenurile de tip C. În cazul terenului de tip B trebuie considerat un număr mai mare de abateri standard (de ordinul 2.0-2.5) pentru a înfășura valorile spectrelor de deplasare ale perechilor de componente orizontale.

S-a identificat o dependență a modelului de atenuare de baza de date, extinderea bazei de date conducând la mărirea variabilității. Deoarece înregistrarea INCERC77 produce valorile spectrale cele mai mari, includerea unui număr important de cutremure moderate și mici (setul complet de înregistrări) conduce la o reducere a valorilor maxime ale spectrului de deplasare și la o capacitate mai redusă de a simula evenimentele seismice foarte puternice.

A fost efectuat un studiu asupra cerinței de deplasare a sistemelor inelastice cu un grad de libertate dinamică, cu caracteristici reprezentative pentru structurile noi din beton armat. S-a analizat influența condițiilor de teren, a magnitudinii cutremurului și a distanței epicentrale asupra coeficientului de amplificare a deplasărilor elastice. Dintre acestea, condițiile de teren au cel mai mare efect asupra modului de variație a coeficientului cu perioada. O influență locală pronunțată o are magnitudinea, pentru toate valorile de ductilitate de deplasare analizate, în jurul perioadei de 1.10s (pentru teren tip C). S-au calculat valorile mediane și principalii indicatorii statistici pentru coeficientul de amplificare. S-a încercat găsirea unei forme funcționale și a unor coeficienți care să se apropie cât mai mult de valorile efective ale coeficientului de amplificare.

Utilizând modelul de atenuare din prima parte a lucrării împreună cu studiul referitor la cerințele de deplasare ale sistemelor neliniare se pot obține spectre inelastice de deplasare pentru un scenariu seismic dat (magnitudine, distanță epicentrală fixate). Variabilitatea modelului de atenuare și a cerinței inelastice de deplasare sunt cuprinse în modelul de estimare a spectrului inelastic de deplasare. Spectrele inelastice de deplasare pot fi un element cheie în proiectarea bazată pe deplasare, (Chopra & Goel, 2001), iar abordarea de mai sus furnizează informație utilă în această privință.

Mulțumiri

National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED) pentru accesul la baza de înregistrări din rețelele japoneze K-NET și KiK-net.

Domnului dr.Florin Pavel pentru accesul la un mare număr de înregistrări și la software-ul USDP care, deși se putea descărca liber, nu mai este disponibil online, și, fără de care ultima parte a lucrării ar fi fost aproape imposibil de efectuat.

Anexă

Coeficienți de regresie pentru setul de cutremure 1977 - 1990

T [s]	a	b	c	h	σ_r^2	σ_e^2	σ^2	MEANNR	MEDNR	STDNR
0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00	0.00
0.10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.20	9.45E-01	5.05E-01	5.62E-04	85.17	8.94E-03	1.18E-02	2.07E-02	0.06	0.16	1.69
0.30	1.72E+00	5.07E-01	-1.07E-03	144.82	7.13E-03	9.33E-03	1.65E-02	0.09	0.24	1.73
0.40	2.42E+00	4.51E-01	-2.20E-03	197.99	8.04E-03	8.59E-03	1.66E-02	0.24	0.05	2.00
0.50	2.73E+00	4.34E-01	-2.59E-03	217.73	1.03E-02	1.01E-02	2.05E-02	0.39	0.65	2.16
0.60	2.03E+00	4.59E-01	-8.34E-04	105.74	1.01E-02	6.77E-03	1.69E-02	0.03	0.25	2.53
0.70	2.02E+00	4.66E-01	-5.42E-04	105.80	1.08E-02	5.35E-03	1.61E-02	0.04	0.07	2.52
0.80	1.96E+00	5.62E-01	-4.99E-04	102.04	1.07E-02	5.41E-03	1.61E-02	0.08	0.21	2.49
0.90	1.97E+00	4.75E-01	-1.77E-04	83.60	1.50E-02	1.00E-02	2.50E-02	0.03	0.10	1.99
1.00	1.84E+00	4.62E-01	5.82E-04	59.58	1.81E-02	1.16E-02	2.97E-02	0.06	0.19	1.81
1.10	1.91E+00	4.86E-01	3.88E-04	65.36	1.66E-02	8.15E-03	2.47E-02	0.03	0.07	1.89
1.20	1.95E+00	4.24E-01	5.40E-04	57.12	1.52E-02	7.83E-03	2.31E-02	0.03	0.04	1.92
1.30	2.01E+00	4.23E-01	3.41E-04	62.20	1.36E-02	7.38E-03	2.10E-02	0.03	0.15	2.04
1.40	1.99E+00	4.69E-01	2.76E-04	58.84	1.40E-02	6.09E-03	2.01E-02	0.03	0.22	2.03
1.50	1.92E+00	5.40E-01	3.90E-04	52.78	1.23E-02	7.57E-03	1.99E-02	0.07	0.17	2.03
1.60	1.94E+00	5.70E-01	2.39E-04	52.86	1.13E-02	8.20E-03	1.95E-02	0.08	0.10	2.02
1.70	1.96E+00	5.42E-01	2.99E-04	49.75	1.18E-02	9.16E-03	2.10E-02	0.08	0.18	1.91
1.80	1.99E+00	5.14E-01	2.80E-04	52.68	1.18E-02	1.08E-02	2.26E-02	0.10	0.10	1.82
1.90	2.03E+00	4.49E-01	4.08E-04	54.02	1.26E-02	1.31E-02	2.57E-02	0.11	0.10	1.72
2.00	2.06E+00	4.24E-01	3.39E-04	54.78	1.48E-02	1.44E-02	2.91E-02	0.10	0.23	1.60
2.10	2.11E+00	3.84E-01	3.18E-04	57.76	1.51E-02	1.74E-02	3.25E-02	0.12	0.10	1.53
2.20	2.15E+00	3.55E-01	2.55E-04	55.13	1.46E-02	1.88E-02	3.34E-02	0.13	0.06	1.50
2.30	2.20E+00	3.49E-01	6.29E-05	56.10	1.39E-02	1.82E-02	3.21E-02	0.13	0.02	1.49
2.40	2.23E+00	3.35E-01	-1.72E-05	60.57	1.28E-02	1.87E-02	3.15E-02	0.14	0.09	1.48
2.50	2.26E+00	3.24E-01	-1.02E-04	64.08	1.18E-02	1.85E-02	3.03E-02	0.14	0.15	1.49
2.60	2.27E+00	3.21E-01	-1.56E-04	64.85	1.13E-02	1.96E-02	3.09E-02	0.16	0.28	1.46
2.70	2.27E+00	3.14E-01	-1.55E-04	62.21	1.14E-02	2.02E-02	3.16E-02	0.16	0.28	1.43
2.80	2.29E+00	2.89E-01	-1.31E-04	61.24	1.09E-02	2.17E-02	3.26E-02	0.18	0.32	1.41
2.90	2.29E+00	3.09E-01	-1.86E-04	62.25	1.05E-02	2.04E-02	3.09E-02	0.17	0.32	1.43
3.00	2.31E+00	3.31E-01	-3.15E-04	70.13	1.02E-02	1.99E-02	3.01E-02	0.16	0.17	1.44
3.10	2.32E+00	3.42E-01	-3.57E-04	73.92	1.02E-02	1.87E-02	2.89E-02	0.15	0.10	1.47
3.20	2.34E+00	3.36E-01	-3.52E-04	76.97	1.03E-02	1.80E-02	2.83E-02	0.14	0.01	1.51
3.30	2.36E+00	3.33E-01	-4.27E-04	80.35	1.05E-02	1.74E-02	2.79E-02	0.13	0.05	1.57

3.40	2.37E+00	3.33E-01	-4.56E-04	81.44	1.09E-02	1.70E-02	2.79E-02	0.12	0.01	1.61
3.50	2.41E+00	3.52E-01	-6.34E-04	87.19	1.10E-02	1.52E-02	2.62E-02	0.09	0.04	1.66
3.60	2.45E+00	3.52E-01	-7.80E-04	94.13	1.10E-02	1.37E-02	2.48E-02	0.07	0.20	1.70
3.70	2.50E+00	3.41E-01	-8.87E-04	99.97	1.11E-02	1.31E-02	2.42E-02	0.05	0.14	1.72
3.80	2.54E+00	3.25E-01	-9.48E-04	105.06	1.13E-02	1.28E-02	2.42E-02	0.03	0.16	1.73
3.90	2.55E+00	3.05E-01	-8.64E-04	105.30	1.18E-02	1.31E-02	2.49E-02	0.02	0.29	1.71
4.00	2.54E+00	2.74E-01	-6.72E-04	102.90	1.17E-02	1.49E-02	2.66E-02	0.05	0.26	1.67
							medie	0.10	0.16	1.72
							mediana	0.09	0.15	1.70

Tabel A-1 Setul 1, Teren B, relația originală (fără termen pătratic)

T [s]	a	b	c	h	σ_r^2	σ_e^2	σ^2	MEANNR	MEDNR	STDNR
0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00	0.00
0.10	2.04E-01	5.86E-01	-1.89E-04	103.88	5.58E-03	1.11E-02	1.66E-02	0.14	0.10	1.58
0.20	1.05E+00	5.43E-01	-3.94E-04	102.82	5.12E-03	1.21E-02	1.73E-02	0.19	0.03	1.69
0.30	1.45E+00	6.76E-01	-9.06E-04	112.61	3.59E-03	1.21E-02	1.57E-02	0.18	0.01	1.74
0.40	1.57E+00	7.37E-01	-7.56E-04	112.63	7.17E-03	3.83E-03	1.10E-02	0.30	0.18	1.90
0.50	2.10E+00	7.98E-01	-2.47E-03	142.49	8.77E-03	5.67E-03	1.44E-02	0.31	0.36	1.61
0.60	2.21E+00	8.51E-01	-2.93E-03	137.18	1.22E-02	1.52E-02	2.74E-02	0.24	0.34	1.29
0.70	2.12E+00	9.04E-01	-2.65E-03	118.35	1.20E-02	1.38E-02	2.57E-02	0.17	0.31	1.25
0.80	2.10E+00	1.08E+00	-2.79E-03	126.15	1.44E-02	9.45E-03	2.39E-02	0.14	0.16	1.25
0.90	1.57E+00	1.17E+00	-8.27E-04	55.58	1.19E-02	1.22E-02	2.41E-02	0.02	0.04	1.27
1.00	1.71E+00	1.15E+00	-1.18E-03	62.46	1.16E-02	2.50E-02	3.66E-02	0.07	0.20	1.14
1.10	1.82E+00	1.22E+00	-1.74E-03	76.03	1.16E-02	3.19E-02	4.35E-02	0.14	0.02	1.09
1.20	1.98E+00	1.23E+00	-2.22E-03	89.12	1.45E-02	2.25E-02	3.71E-02	0.13	0.09	1.06
1.30	2.10E+00	1.25E+00	-2.49E-03	107.31	1.70E-02	1.41E-02	3.11E-02	0.11	0.02	1.10
1.40	2.31E+00	1.22E+00	-2.85E-03	128.98	1.84E-02	9.89E-03	2.83E-02	0.17	0.12	1.14
1.50	2.59E+00	1.24E+00	-3.63E-03	155.56	1.87E-02	1.01E-02	2.88E-02	0.28	0.24	1.16
1.60	2.33E+00	1.28E+00	-3.06E-03	131.89	1.91E-02	1.08E-02	2.98E-02	0.16	0.07	1.19
1.70	2.25E+00	1.33E+00	-2.98E-03	122.53	1.83E-02	1.39E-02	3.21E-02	0.17	0.08	1.18
1.80	2.25E+00	1.36E+00	-3.03E-03	118.88	1.74E-02	1.86E-02	3.60E-02	0.22	0.23	1.15
1.90	2.16E+00	1.36E+00	-2.69E-03	106.19	1.70E-02	2.24E-02	3.94E-02	0.23	0.20	1.11
2.00	2.22E+00	1.34E+00	-2.83E-03	103.36	1.73E-02	2.78E-02	4.52E-02	0.25	0.25	1.05
2.10	2.23E+00	1.34E+00	-2.83E-03	100.13	1.54E-02	3.16E-02	4.70E-02	0.26	0.24	1.03
2.20	2.28E+00	1.34E+00	-2.93E-03	104.51	1.44E-02	3.70E-02	5.14E-02	0.29	0.29	1.00
2.30	2.24E+00	1.33E+00	-2.69E-03	98.81	1.36E-02	4.04E-02	5.40E-02	0.31	0.29	1.00
2.40	2.17E+00	1.31E+00	-2.34E-03	90.38	1.34E-02	4.26E-02	5.60E-02	0.31	0.25	1.01
2.50	2.12E+00	1.27E+00	-2.00E-03	81.68	1.50E-02	4.51E-02	6.01E-02	0.30	0.27	0.99
2.60	2.15E+00	1.23E+00	-1.92E-03	80.76	1.59E-02	5.00E-02	6.58E-02	0.31	0.29	0.98

2.70	2.15E+00	1.21E+00	-1.79E-03	80.66	1.60E-02	5.18E-02	6.78E-02	0.31	0.30	0.98
2.80	2.23E+00	1.18E+00	-1.95E-03	88.15	1.57E-02	5.36E-02	6.93E-02	0.32	0.28	0.99
2.90	2.22E+00	1.15E+00	-1.79E-03	86.74	1.56E-02	5.11E-02	6.66E-02	0.32	0.30	1.02
3.00	2.24E+00	1.11E+00	-1.70E-03	88.92	1.65E-02	4.76E-02	6.40E-02	0.31	0.30	1.04
3.10	2.20E+00	1.10E+00	-1.64E-03	83.46	1.74E-02	4.22E-02	5.96E-02	0.28	0.21	1.11
3.20	2.32E+00	1.02E+00	-1.79E-03	90.86	1.75E-02	4.45E-02	6.20E-02	0.29	0.26	1.06
3.30	2.33E+00	1.00E+00	-1.78E-03	89.79	1.73E-02	4.47E-02	6.20E-02	0.28	0.22	1.07
3.40	2.29E+00	9.95E-01	-1.63E-03	84.87	1.75E-02	4.43E-02	6.17E-02	0.27	0.19	1.08
3.50	2.21E+00	9.89E-01	-1.33E-03	77.94	1.80E-02	4.13E-02	5.93E-02	0.26	0.21	1.10
3.60	2.18E+00	9.79E-01	-1.17E-03	75.45	1.80E-02	3.88E-02	5.68E-02	0.25	0.26	1.13
3.70	2.20E+00	9.55E-01	-1.19E-03	77.27	1.76E-02	3.82E-02	5.57E-02	0.25	0.26	1.15
3.80	2.24E+00	9.29E-01	-1.25E-03	81.50	1.70E-02	3.78E-02	5.48E-02	0.25	0.30	1.17
3.90	2.27E+00	9.11E-01	-1.30E-03	86.76	1.64E-02	3.71E-02	5.35E-02	0.26	0.34	1.19
4.00	2.29E+00	9.04E-01	-1.30E-03	90.69	1.58E-02	3.70E-02	5.28E-02	0.27	0.38	1.21
							medie	0.23	0.21	1.15
							mediana	0.25	0.24	1.11

Tabel A-2 Setul 1, Teren C, relația originală (fără termen pătratic)

T [s]	a	b	c	d	h	σ_r^2	σ_e^2	σ^2	MEANNR	MEDNR	STDNR
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.20	9.41E-01	5.15E-01	5.39E-04	-0.01	85.21	8.94E-03	1.18E-02	2.07E-02	0.09	0.19	1.69
0.30	1.48E+00	1.14E+00	-1.07E-03	-0.37	144.91	7.13E-03	1.18E-02	1.89E-02	0.12	0.39	1.56
0.40	1.82E+00	1.80E+00	-2.20E-03	-0.82	198.15	8.04E-03	1.42E-03	9.46E-03	0.96	1.17	2.53
0.50	1.96E+00	2.00E+00	-2.59E-03	-0.96	218.04	1.03E-02	1.08E-03	1.14E-02	1.50	1.36	2.77
0.60	1.55E+00	1.72E+00	-8.33E-04	-0.78	105.81	1.01E-02	1.16E-03	1.13E-02	0.31	0.07	3.02
0.70	1.77E+00	1.11E+00	-5.42E-04	-0.40	105.86	1.08E-02	3.19E-03	1.40E-02	0.21	0.33	2.68
0.80	1.79E+00	1.00E+00	-4.99E-04	-0.27	102.11	1.07E-02	4.10E-03	1.48E-02	0.18	0.25	2.58
0.90	1.48E+00	1.80E+00	-1.76E-04	-0.82	83.66	1.50E-02	3.19E-03	1.81E-02	0.17	0.13	2.26
1.00	1.37E+00	1.79E+00	5.82E-04	-0.82	59.62	1.81E-02	4.64E-03	2.27E-02	0.11	0.00	1.99
1.10	1.50E+00	1.64E+00	3.88E-04	-0.72	65.40	1.66E-02	2.99E-03	1.96E-02	0.13	0.41	2.06
1.20	1.42E+00	1.91E+00	5.40E-04	-0.93	57.16	1.52E-02	1.06E-03	1.63E-02	0.15	0.01	2.21
1.30	1.49E+00	1.86E+00	3.42E-04	-0.90	62.24	1.36E-02	9.49E-04	1.46E-02	0.16	0.11	2.37
1.40	1.61E+00	1.54E+00	2.77E-04	-0.67	58.88	1.40E-02	1.87E-03	1.59E-02	0.13	0.07	2.23
1.50	1.71E+00	1.14E+00	3.91E-04	-0.37	52.81	1.23E-02	5.57E-03	1.79E-02	0.08	0.11	2.11
1.60	1.70E+00	1.23E+00	2.39E-04	-0.40	52.89	1.13E-02	5.91E-03	1.72E-02	0.08	0.02	2.10
1.70	1.53E+00	1.73E+00	2.99E-04	-0.73	49.78	1.18E-02	3.61E-03	1.55E-02	0.09	0.20	2.13
1.80	1.49E+00	1.93E+00	2.81E-04	-0.86	52.71	1.18E-02	3.21E-03	1.50E-02	0.10	0.28	2.11
1.90	1.47E+00	2.00E+00	4.07E-04	-0.93	54.05	1.26E-02	3.94E-03	1.65E-02	0.09	0.48	2.00

2.00	1.43E+00	2.20E+00	3.39E-04	-1.08	54.81	1.48E-02	3.01E-03	1.78E-02	0.11	0.24	1.89
2.10	1.42E+00	2.32E+00	3.19E-04	-1.17	57.79	1.51E-02	3.54E-03	1.87E-02	0.11	0.19	1.83
2.20	1.43E+00	2.36E+00	2.56E-04	-1.21	55.16	1.46E-02	3.74E-03	1.84E-02	0.10	0.13	1.81
2.30	1.47E+00	2.37E+00	6.32E-05	-1.22	56.14	1.39E-02	3.09E-03	1.70E-02	0.11	0.22	1.83
2.40	1.47E+00	2.45E+00	-1.68E-05	-1.26	60.61	1.28E-02	2.36E-03	1.51E-02	0.12	0.28	1.89
2.50	1.50E+00	2.44E+00	-1.02E-04	-1.27	64.12	1.18E-02	1.96E-03	1.38E-02	0.13	0.13	1.95
2.60	1.48E+00	2.53E+00	-1.56E-04	-1.32	64.90	1.13E-02	1.63E-03	1.29E-02	0.14	0.04	1.97
2.70	1.46E+00	2.57E+00	-1.55E-04	-1.34	62.25	1.14E-02	1.63E-03	1.31E-02	0.14	0.02	1.93
2.80	1.46E+00	2.57E+00	-1.30E-04	-1.35	61.28	1.09E-02	2.05E-03	1.30E-02	0.12	0.05	1.92
2.90	1.50E+00	2.48E+00	-1.86E-04	-1.29	62.29	1.05E-02	2.32E-03	1.29E-02	0.12	0.20	1.91
3.00	1.55E+00	2.45E+00	-3.15E-04	-1.26	70.18	1.02E-02	2.37E-03	1.26E-02	0.13	0.07	1.93
3.10	1.58E+00	2.40E+00	-3.57E-04	-1.22	73.97	1.02E-02	2.24E-03	1.24E-02	0.15	0.03	1.96
3.20	1.61E+00	2.34E+00	-3.51E-04	-1.20	77.02	1.03E-02	2.31E-03	1.26E-02	0.15	0.14	2.01
3.30	1.66E+00	2.26E+00	-4.26E-04	-1.15	80.41	1.05E-02	2.71E-03	1.32E-02	0.15	0.16	2.05
3.40	1.68E+00	2.23E+00	-4.56E-04	-1.13	81.49	1.09E-02	2.86E-03	1.37E-02	0.15	0.12	2.08
3.50	1.75E+00	2.13E+00	-6.34E-04	-1.06	87.25	1.10E-02	2.72E-03	1.37E-02	0.17	0.10	2.10
3.60	1.83E+00	2.05E+00	-7.79E-04	-1.02	94.20	1.10E-02	2.50E-03	1.35E-02	0.20	0.00	2.13
3.70	1.88E+00	2.00E+00	-8.86E-04	-1.00	100.04	1.11E-02	2.36E-03	1.35E-02	0.23	0.03	2.14
3.80	1.91E+00	2.01E+00	-9.47E-04	-1.02	105.14	1.13E-02	2.00E-03	1.33E-02	0.26	0.02	2.17
3.90	1.86E+00	2.13E+00	-8.63E-04	-1.11	105.37	1.18E-02	1.19E-03	1.29E-02	0.32	0.06	2.20
4.00	1.78E+00	2.31E+00	-6.72E-04	-1.24	102.97	1.17E-02	6.44E-04	1.23E-02	0.36	0.02	2.25
								medie	0.20	0.20	2.06
								mediana	0.14	0.12	2.07

Tabel A-3 Setul 1, Teren B, cu termen pătratic

T [s]	a	b	c	d	h	σ_r^2	σ_e^2	σ^2	MEANNR	MEDNR	STDNR
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	7.00E-02	9.68E-01	-1.89E-04	-0.223	103.88	5.58E-03	1.02E-02	1.57E-02	0.04	0.01	1.59
0.20	8.31E-01	1.16E+00	-3.94E-04	-0.356	102.82	5.12E-03	1.01E-02	1.52E-02	0.04	0.10	1.75
0.30	1.24E+00	1.28E+00	-9.06E-04	-0.350	112.61	3.59E-03	1.01E-02	1.37E-02	0.02	0.02	1.80
0.40	1.42E+00	1.18E+00	-7.56E-04	-0.271	112.63	7.17E-03	2.70E-03	9.86E-03	0.19	0.07	1.98
0.50	1.95E+00	1.24E+00	-2.47E-03	-0.271	142.49	8.77E-03	4.40E-03	1.32E-02	0.14	0.28	1.65
0.60	1.99E+00	1.49E+00	-2.93E-03	-0.375	137.18	1.22E-02	1.27E-02	2.49E-02	0.08	0.25	1.30
0.70	2.00E+00	1.26E+00	-2.61E-03	-0.210	118.46	1.20E-02	1.28E-02	2.47E-02	0.04	0.14	1.24
0.80	2.09E+00	1.12E+00	-2.79E-03	-0.024	126.15	1.44E-02	9.37E-03	2.38E-02	0.13	0.14	1.25
0.90	1.67E+00	8.83E-01	-8.27E-04	0.168	55.58	1.19E-02	1.23E-02	2.41E-02	0.08	0.07	1.28
1.00	1.90E+00	5.91E-01	-1.18E-03	0.324	62.46	1.16E-02	2.42E-02	3.58E-02	0.03	0.42	1.18
1.10	2.15E+00	3.08E-01	-1.74E-03	0.523	76.12	1.16E-02	2.90E-02	4.06E-02	0.02	0.29	1.15
1.20	2.31E+00	2.73E-01	-2.22E-03	0.560	89.12	1.45E-02	1.96E-02	3.41E-02	0.07	0.14	1.13

1.30	2.39E+00	3.68E-01	-2.49E-03	0.522	107.31	1.70E-02	1.24E-02	2.95E-02	0.12	0.28	1.15
1.40	2.58E+00	3.13E-01	-2.85E-03	0.544	128.98	1.84E-02	8.67E-03	2.71E-02	0.17	0.26	1.18
1.50	2.85E+00	3.39E-01	-3.63E-03	0.542	155.56	1.87E-02	8.88E-03	2.76E-02	0.14	0.31	1.20
1.60	2.61E+00	3.86E-01	-3.06E-03	0.535	131.89	1.91E-02	9.59E-03	2.86E-02	0.16	0.27	1.23
1.70	2.57E+00	3.37E-01	-2.98E-03	0.593	122.53	1.83E-02	1.15E-02	2.98E-02	0.14	0.17	1.24
1.80	2.66E+00	1.31E-01	-3.03E-03	0.719	118.88	1.74E-02	1.36E-02	3.10E-02	0.12	0.31	1.25
1.90	2.64E+00	-5.09E-02	-2.69E-03	0.824	106.19	1.70E-02	1.48E-02	3.18E-02	0.11	0.25	1.24
2.00	2.76E+00	-2.25E-01	-2.83E-03	0.908	103.36	1.73E-02	1.80E-02	3.53E-02	0.09	0.30	1.19
2.10	2.80E+00	-3.19E-01	-2.83E-03	0.957	100.13	1.54E-02	1.99E-02	3.53E-02	0.07	0.29	1.18
2.20	2.91E+00	-4.84E-01	-2.93E-03	1.048	104.51	1.44E-02	2.22E-02	3.66E-02	0.06	0.24	1.18
2.30	2.93E+00	-6.49E-01	-2.69E-03	1.134	98.81	1.36E-02	2.26E-02	3.62E-02	0.05	0.12	1.20
2.40	2.90E+00	-7.42E-01	-2.34E-03	1.175	90.38	1.34E-02	2.36E-02	3.70E-02	0.05	0.14	1.21
2.50	2.87E+00	-8.53E-01	-2.00E-03	1.221	81.68	1.50E-02	2.51E-02	4.00E-02	0.05	0.26	1.19
2.60	2.94E+00	-1.02E+00	-1.92E-03	1.292	80.76	1.59E-02	2.75E-02	4.33E-02	0.05	0.36	1.18
2.70	2.97E+00	-1.10E+00	-1.79E-03	1.323	80.66	1.60E-02	2.81E-02	4.41E-02	0.05	0.32	1.18
2.80	3.06E+00	-1.18E+00	-1.95E-03	1.350	88.15	1.57E-02	2.84E-02	4.40E-02	0.05	0.20	1.20
2.90	3.04E+00	-1.16E+00	-1.79E-03	1.327	86.74	1.56E-02	2.68E-02	4.24E-02	0.05	0.03	1.24
3.00	3.03E+00	-1.11E+00	-1.70E-03	1.275	88.92	1.65E-02	2.54E-02	4.19E-02	0.06	0.03	1.26
3.10	2.90E+00	-8.99E-01	-1.64E-03	1.153	83.46	1.74E-02	2.50E-02	4.23E-02	0.06	0.03	1.31
3.20	3.06E+00	-1.07E+00	-1.79E-03	1.205	90.86	1.75E-02	2.51E-02	4.26E-02	0.06	0.01	1.26
3.30	3.05E+00	-1.04E+00	-1.78E-03	1.177	89.79	1.73E-02	2.64E-02	4.37E-02	0.06	0.01	1.26
3.40	2.99E+00	-1.01E+00	-1.63E-03	1.152	84.87	1.75E-02	2.70E-02	4.45E-02	0.06	0.15	1.26
3.50	2.89E+00	-9.57E-01	-1.33E-03	1.122	77.94	1.80E-02	2.54E-02	4.35E-02	0.06	0.14	1.28
3.60	2.83E+00	-8.88E-01	-1.17E-03	1.077	75.45	1.80E-02	2.45E-02	4.25E-02	0.06	0.12	1.30
3.70	2.84E+00	-8.67E-01	-1.19E-03	1.052	77.27	1.76E-02	2.46E-02	4.21E-02	0.06	0.06	1.32
3.80	2.87E+00	-8.72E-01	-1.25E-03	1.039	81.50	1.70E-02	2.44E-02	4.14E-02	0.06	0.04	1.34
3.90	2.90E+00	-8.83E-01	-1.30E-03	1.035	86.76	1.64E-02	2.35E-02	4.00E-02	0.06	0.06	1.38
4.00	2.92E+00	-9.16E-01	-1.30E-03	1.049	90.69	1.58E-02	2.28E-02	3.86E-02	0.06	0.01	1.41
								medie	0.07	0.16	1.27
								mediana	0.06	0.14	1.24

Tabel A-4 Setul 1, Teren C, cu termen pătratic

Coeficienți de regresie pentru setul de înregistrări digitale

T [s]	a	b	c	h	σ_r^2	σ_e^2	σ^2	MEANNR	MEDNR	STDNR
0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00	0.00
0.10	4.71E-01	6.31E-01	-5.34E-04	47.96	9.76E-03	2.93E-03	1.27E-02	0.30	0.21	3.03
0.20	1.50E+00	5.87E-01	-1.97E-03	107.90	1.29E-02	0.00E+00	1.29E-02	0.44	0.30	2.75
0.30	1.39E+00	6.29E-01	-5.46E-04	74.55	1.33E-02	0.00E+00	1.33E-02	0.23	0.13	2.92
0.40	1.26E+00	6.83E-01	4.08E-04	37.18	1.38E-02	2.04E-02	3.42E-02	0.29	0.07	2.03
0.50	1.46E+00	6.84E-01	1.16E-04	41.20	1.24E-02	3.98E-03	1.64E-02	0.17	0.08	2.87
0.60	1.69E+00	7.24E-01	-2.26E-04	45.08	1.43E-02	0.00E+00	1.43E-02	0.86	0.89	2.88
0.70	1.67E+00	7.29E-01	-9.36E-05	45.39	1.48E-02	0.00E+00	1.48E-02	0.44	0.52	2.82
0.80	1.74E+00	7.78E-01	-1.83E-04	44.31	1.39E-02	1.76E-03	1.57E-02	0.28	0.27	2.65
0.90	1.73E+00	8.03E-01	-1.84E-04	43.40	1.28E-02	2.13E-03	1.49E-02	0.00	0.37	2.68
1.00	1.70E+00	8.26E-01	2.20E-05	34.94	1.37E-02	2.60E-03	1.63E-02	0.01	0.11	2.50
1.10	1.72E+00	8.35E-01	4.32E-05	34.87	1.30E-02	1.75E-03	1.48E-02	0.05	0.04	2.54
1.20	1.81E+00	8.91E-01	-3.78E-04	43.10	1.23E-02	4.14E-03	1.65E-02	0.06	0.08	2.38
1.30	1.85E+00	9.24E-01	-5.37E-04	43.66	1.08E-02	7.27E-03	1.81E-02	0.08	0.04	2.22
1.40	1.87E+00	9.28E-01	-5.99E-04	46.08	1.23E-02	1.14E-02	2.37E-02	0.13	0.12	1.91
1.50	1.89E+00	9.25E-01	-7.60E-04	51.27	1.07E-02	1.13E-02	2.19E-02	0.06	0.27	1.92
1.60	1.88E+00	9.09E-01	-7.80E-04	51.21	1.09E-02	1.06E-02	2.14E-02	0.05	0.19	1.92
1.70	1.86E+00	9.09E-01	-7.73E-04	50.62	1.21E-02	1.39E-02	2.59E-02	0.01	0.20	1.73
1.80	1.86E+00	8.92E-01	-8.12E-04	49.81	1.28E-02	1.14E-02	2.42E-02	0.05	0.07	1.79
1.90	1.85E+00	9.00E-01	-7.88E-04	49.81	1.24E-02	1.70E-02	2.95E-02	0.01	0.19	1.65
2.00	1.85E+00	9.06E-01	-7.94E-04	49.35	1.19E-02	1.79E-02	2.98E-02	0.00	0.16	1.65
2.10	1.92E+00	8.99E-01	-9.29E-04	59.48	1.13E-02	7.43E-03	1.87E-02	0.28	0.11	2.05
2.20	1.89E+00	8.90E-01	-8.21E-04	56.39	9.96E-03	6.13E-03	1.61E-02	0.31	0.20	2.16
2.30	1.88E+00	8.82E-01	-7.89E-04	55.10	9.23E-03	5.04E-03	1.43E-02	0.37	0.17	2.27
2.40	1.92E+00	8.84E-01	-9.66E-04	60.93	8.71E-03	4.52E-03	1.32E-02	0.45	0.12	2.36
2.50	1.93E+00	8.86E-01	-9.62E-04	63.47	8.33E-03	4.04E-03	1.24E-02	0.53	0.05	2.44
2.60	1.91E+00	8.96E-01	-9.01E-04	63.20	7.79E-03	7.41E-03	1.52E-02	0.35	0.03	2.21
2.70	1.92E+00	9.11E-01	-9.92E-04	67.54	8.08E-03	9.94E-03	1.80E-02	0.26	0.06	2.05
2.80	1.93E+00	9.15E-01	-1.06E-03	68.76	8.10E-03	9.94E-03	1.80E-02	0.22	0.00	2.06
2.90	1.94E+00	9.11E-01	-1.09E-03	69.97	8.61E-03	6.63E-03	1.52E-02	0.33	0.11	2.23
3.00	1.91E+00	9.26E-01	-9.31E-04	68.23	8.62E-03	6.56E-03	1.52E-02	0.29	0.13	2.22
3.10	1.90E+00	9.38E-01	-9.07E-04	67.81	8.82E-03	6.65E-03	1.55E-02	0.26	0.07	2.20
3.20	1.89E+00	9.37E-01	-9.10E-04	66.58	9.23E-03	5.36E-03	1.46E-02	0.28	0.00	2.27
3.30	1.85E+00	9.31E-01	-8.06E-04	62.63	9.20E-03	4.90E-03	1.41E-02	0.22	0.12	2.31
3.40	1.86E+00	9.33E-01	-8.42E-04	63.76	9.56E-03	5.43E-03	1.50E-02	0.20	0.23	2.25
3.50	1.82E+00	9.26E-01	-7.04E-04	59.26	9.94E-03	4.88E-03	1.48E-02	0.18	0.24	2.26

3.60	1.79E+00	9.20E-01	-6.45E-04	55.65	1.03E-02	4.45E-03	1.47E-02	0.18	0.25	2.26
3.70	1.79E+00	9.10E-01	-6.41E-04	54.92	1.04E-02	3.71E-03	1.41E-02	0.20	0.30	2.29
3.80	1.78E+00	9.06E-01	-6.19E-04	54.11	1.03E-02	3.70E-03	1.40E-02	0.17	0.35	2.30
3.90	1.76E+00	9.09E-01	-5.75E-04	54.83	1.03E-02	4.00E-03	1.43E-02	0.13	0.38	2.28
4.00	1.74E+00	9.09E-01	-4.75E-04	51.15	1.03E-02	4.44E-03	1.48E-02	0.07	0.39	2.23
4.20	1.71E+00	9.04E-01	-4.30E-04	46.10	1.11E-02	3.59E-03	1.47E-02	0.05	0.44	2.20
4.40	1.71E+00	8.96E-01	-4.84E-04	45.95	1.11E-02	2.14E-03	1.33E-02	0.05	0.47	2.25
4.60	1.68E+00	9.01E-01	-3.70E-04	43.72	1.06E-02	2.60E-03	1.32E-02	0.04	0.29	2.24
4.80	1.67E+00	9.04E-01	-3.57E-04	43.50	1.10E-02	3.54E-03	1.45E-02	0.02	0.38	2.13
5.00	1.63E+00	9.06E-01	-2.26E-04	39.52	1.19E-02	3.89E-03	1.58E-02	0.02	0.39	2.07
5.20	1.62E+00	8.99E-01	-2.41E-04	39.82	1.20E-02	3.72E-03	1.57E-02	0.04	0.43	2.10
5.40	1.61E+00	9.05E-01	-1.89E-04	39.68	1.13E-02	4.58E-03	1.59E-02	0.07	0.43	2.11
5.60	1.60E+00	9.17E-01	-1.57E-04	39.81	1.08E-02	6.59E-03	1.74E-02	0.11	0.45	2.04
5.80	1.61E+00	9.15E-01	-2.41E-04	41.50	1.07E-02	7.17E-03	1.79E-02	0.12	0.48	2.00
6.00	1.58E+00	9.05E-01	-1.21E-04	37.28	1.02E-02	6.55E-03	1.68E-02	0.14	0.45	2.05
6.40	1.58E+00	9.05E-01	-1.26E-04	37.27	1.03E-02	5.80E-03	1.61E-02	0.08	0.29	2.09
6.80	1.61E+00	9.05E-01	-2.82E-04	41.43	1.09E-02	5.91E-03	1.68E-02	0.05	0.27	2.02
7.20	1.62E+00	9.06E-01	-3.94E-04	42.91	1.05E-02	9.09E-03	1.96E-02	0.09	0.28	1.88
7.60	1.62E+00	9.13E-01	-4.92E-04	42.02	1.09E-02	1.28E-02	2.37E-02	0.11	0.17	1.73
8.00	1.62E+00	9.13E-01	-5.09E-04	41.43	1.04E-02	1.35E-02	2.39E-02	0.11	0.24	1.72
							medie	0.18	0.23	2.18
							mediana	0.20	0.13	2.26

Tabel A-5 Setul 2, Teren B

T [s]	a	b	c	h	σ_r^2	σ_e^2	σ^2	MEANNR	MEDNR	STDNR
0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00	0.00
0.10	3.16E+00	7.73E-01	-6.64E-03	306.12	5.98E-03	1.99E-02	2.58E-02	0.76	0.78	1.57
0.20	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.30	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.70	1.37E+01	1.05E+00	-1.59E-02	697.86	1.24E-02	6.41E-03	1.88E-02	0.37	0.41	2.33
0.80	4.68E+00	1.07E+00	-7.27E-03	322.52	1.49E-02	8.10E-03	2.30E-02	0.27	0.47	2.10
0.90	4.44E+00	1.11E+00	-7.29E-03	307.35	1.51E-02	1.01E-01	1.16E-01	0.60	0.55	0.94
1.00	4.75E+00	1.14E+00	-7.76E-03	316.86	1.45E-02	1.13E-01	1.28E-01	0.42	0.28	0.92
1.10	4.57E+00	1.19E+00	-7.42E-03	301.08	1.47E-02	1.20E-01	1.34E-01	0.30	0.12	0.93
1.20	3.86E+00	1.20E+00	-6.25E-03	246.70	1.52E-02	1.18E-01	1.33E-01	0.18	0.04	0.95

1.30	4.01E+00	1.21E+00	-6.65E-03	258.78	1.59E-02	1.03E-01	1.19E-01	0.36	0.04	0.99
1.40	4.26E+00	1.22E+00	-7.06E-03	280.99	1.45E-02	1.00E-01	1.14E-01	0.47	0.21	0.99
1.50	3.80E+00	1.23E+00	-6.19E-03	246.75	1.37E-02	8.90E-02	1.03E-01	0.36	0.12	1.02
1.60	3.58E+00	1.23E+00	-5.78E-03	228.03	1.36E-02	8.09E-02	9.45E-02	0.33	0.11	1.05
1.70	3.40E+00	1.23E+00	-5.39E-03	217.41	1.27E-02	7.36E-02	8.63E-02	0.33	0.12	1.07
1.80	3.45E+00	1.23E+00	-5.44E-03	226.92	1.23E-02	6.98E-02	8.21E-02	0.39	0.27	1.08
1.90	3.43E+00	1.22E+00	-5.45E-03	226.34	1.22E-02	6.56E-02	7.78E-02	0.43	0.28	1.10
2.00	4.02E+00	1.22E+00	-6.72E-03	271.61	1.24E-02	6.48E-02	7.73E-02	0.68	0.57	1.09
2.10	4.98E+00	1.22E+00	-8.42E-03	340.88	1.33E-02	6.55E-02	7.87E-02	1.30	1.17	1.06
2.20	5.09E+00	1.21E+00	-8.60E-03	347.03	1.23E-02	6.43E-02	7.66E-02	1.34	1.18	1.06
2.30	4.52E+00	1.21E+00	-7.64E-03	308.32	1.13E-02	6.47E-02	7.59E-02	0.95	0.81	1.07
2.40	4.23E+00	1.22E+00	-7.11E-03	288.33	1.07E-02	6.54E-02	7.61E-02	0.78	0.61	1.08
2.50	4.02E+00	1.22E+00	-6.79E-03	272.58	1.13E-02	6.66E-02	7.79E-02	0.70	0.49	1.08
2.60	3.64E+00	1.22E+00	-6.05E-03	244.17	1.14E-02	6.49E-02	7.63E-02	0.57	0.30	1.09
2.70	3.58E+00	1.22E+00	-5.93E-03	241.22	1.21E-02	6.29E-02	7.49E-02	0.58	0.34	1.11
2.80	3.63E+00	1.22E+00	-6.02E-03	246.86	1.24E-02	6.24E-02	7.48E-02	0.62	0.37	1.11
2.90	3.53E+00	1.22E+00	-5.80E-03	242.33	1.29E-02	6.27E-02	7.55E-02	0.62	0.42	1.11
3.00	3.43E+00	1.22E+00	-5.61E-03	234.96	1.33E-02	6.21E-02	7.54E-02	0.58	0.40	1.11
3.10	3.30E+00	1.23E+00	-5.36E-03	222.50	1.37E-02	6.20E-02	7.57E-02	0.52	0.39	1.12
3.20	3.24E+00	1.23E+00	-5.25E-03	217.41	1.36E-02	6.20E-02	7.56E-02	0.50	0.38	1.13
3.30	3.26E+00	1.23E+00	-5.29E-03	218.81	1.33E-02	6.21E-02	7.54E-02	0.50	0.39	1.13
3.40	3.33E+00	1.23E+00	-5.45E-03	225.15	1.29E-02	6.31E-02	7.61E-02	0.52	0.38	1.13
3.50	3.37E+00	1.23E+00	-5.54E-03	227.79	1.26E-02	6.46E-02	7.72E-02	0.52	0.36	1.12
3.60	3.41E+00	1.23E+00	-5.61E-03	231.62	1.26E-02	6.48E-02	7.74E-02	0.54	0.35	1.12
3.70	3.49E+00	1.24E+00	-5.76E-03	240.70	1.27E-02	6.44E-02	7.71E-02	0.60	0.45	1.12
3.80	3.62E+00	1.24E+00	-6.03E-03	251.91	1.25E-02	6.37E-02	7.62E-02	0.67	0.54	1.12
3.90	3.81E+00	1.24E+00	-6.40E-03	267.09	1.23E-02	6.41E-02	7.64E-02	0.76	1.12	1.12
4.00	3.96E+00	1.24E+00	-6.70E-03	278.97	1.23E-02	6.45E-02	7.68E-02	0.84	0.67	1.12
4.20	4.10E+00	1.25E+00	-6.89E-03	295.32	1.28E-02	6.43E-02	7.71E-02	0.99	0.80	1.10
4.40	4.02E+00	1.23E+00	-6.14E-03	284.67	1.28E-02	4.27E-03	1.71E-02	0.27	0.10	2.26
4.60	4.30E+00	1.23E+00	-6.47E-03	310.10	1.26E-02	4.17E-03	1.67E-02	0.29	0.14	2.24
4.80	4.98E+00	1.23E+00	-7.45E-03	354.64	1.29E-02	4.59E-03	1.75E-02	0.33	0.03	2.16
5.00	6.49E+00	1.22E+00	-9.42E-03	431.86	1.30E-02	5.13E-03	1.81E-02	0.29	0.12	2.11
5.20	6.84E+00	1.22E+00	-9.88E-03	445.73	1.32E-02	5.73E-03	1.90E-02	0.29	0.10	2.06
5.40	7.69E+00	1.22E+00	-1.08E-02	484.78	1.36E-02	6.15E-03	1.97E-02	0.27	0.09	2.00
5.60	5.56E+00	1.21E+00	-8.34E-03	383.70	1.39E-02	6.35E-03	2.02E-02	0.27	0.14	1.98
5.80	5.76E+00	1.21E+00	-8.62E-03	393.17	1.40E-02	6.56E-03	2.05E-02	0.26	0.11	1.97
6.00	6.32E+00	1.21E+00	-9.31E-03	421.74	1.41E-02	6.91E-03	2.11E-02	0.25	0.15	1.95
6.40	5.00E+00	1.20E+00	-7.70E-03	349.64	1.47E-02	7.65E-03	2.24E-02	0.23	0.09	1.88
6.80	4.52E+00	1.19E+00	-7.12E-03	316.29	1.56E-02	8.74E-03	2.44E-02	0.20	0.05	1.79

7.20	4.27E+00	1.18E+00	-6.88E-03	295.08	1.72E-02	1.07E-02	2.79E-02	0.19	0.14	1.69
7.60	4.86E+00	1.18E+00	-7.85E-03	328.29	1.81E-02	1.26E-02	3.07E-02	0.18	0.11	1.63
8.00	6.97E+00	1.18E+00	-1.05E-02	436.90	1.84E-02	1.38E-02	3.22E-02	0.15	0.08	1.58
								medie	0.48	0.35
								mediana	0.43	0.30

Tabel A-6 Setul 2, Teren C

Coeficienți de regresie pentru setul ce cuprinde toată baza de date

T [s]	a	b	c	h	σ_r^2	σ_e^2	σ^2	MEANNR	MEDNR	STDNR
0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00	0.00
0.10	6.00E-01	5.54E-01	-6.25E-04	129.47	6.79E-03	2.27E-02	2.95E-02	0.30	0.22	1.91
0.20	1.07E+00	5.62E-01	-2.23E-04	88.30	1.06E-02	7.57E-03	1.82E-02	0.02	0.07	2.07
0.30	1.49E+00	5.93E-01	-7.12E-04	107.03	9.79E-03	6.52E-03	1.63E-02	0.13	0.45	2.17
0.40	1.54E+00	6.52E-01	-4.13E-04	89.97	1.05E-02	1.83E-02	2.88E-02	0.11	0.00	1.86
0.50	1.68E+00	6.63E-01	-5.18E-04	88.80	1.12E-02	9.01E-03	2.02E-02	0.13	0.30	2.37
0.60	1.78E+00	6.93E-01	-5.89E-04	80.92	1.19E-02	5.07E-03	1.70E-02	0.40	0.30	2.57
0.70	1.79E+00	7.07E-01	-4.11E-04	83.48	1.25E-02	5.56E-03	1.80E-02	0.31	0.43	2.47
0.80	1.80E+00	7.27E-01	-3.70E-04	78.42	1.20E-02	5.22E-03	1.73E-02	0.22	0.16	2.46
0.90	1.78E+00	7.16E-01	-1.79E-04	67.86	1.40E-02	1.01E-02	2.41E-02	0.20	0.14	2.07
1.00	1.68E+00	7.37E-01	3.97E-04	49.10	1.62E-02	1.11E-02	2.73E-02	0.16	0.20	1.92
1.10	1.72E+00	7.61E-01	2.92E-04	52.17	1.51E-02	8.40E-03	2.34E-02	0.17	0.11	1.99
1.20	1.74E+00	7.76E-01	2.23E-04	50.73	1.40E-02	1.38E-02	2.78E-02	0.19	0.04	1.82
1.30	1.77E+00	7.94E-01	3.64E-05	54.10	1.24E-02	1.76E-02	3.01E-02	0.18	0.03	1.74
1.40	1.78E+00	8.17E-01	-3.44E-05	53.45	1.33E-02	1.53E-02	2.86E-02	0.17	0.09	1.75
1.50	1.76E+00	8.45E-01	-5.91E-06	51.19	1.16E-02	1.26E-02	2.42E-02	0.11	0.13	1.86
1.60	1.78E+00	8.50E-01	-1.12E-04	51.36	1.11E-02	1.11E-02	2.22E-02	0.05	0.19	1.90
1.70	1.76E+00	8.50E-01	-6.77E-05	49.08	1.19E-02	1.28E-02	2.47E-02	0.01	0.17	1.77
1.80	1.77E+00	8.45E-01	-9.95E-05	50.80	1.22E-02	1.28E-02	2.51E-02	0.01	0.12	1.75
1.90	1.76E+00	8.39E-01	-1.15E-05	51.63	1.25E-02	1.78E-02	3.03E-02	0.04	0.19	1.62
2.00	1.77E+00	8.35E-01	-5.95E-05	52.03	1.35E-02	1.95E-02	3.30E-02	0.02	0.29	1.55
2.10	1.79E+00	8.30E-01	-9.92E-05	56.85	1.35E-02	1.93E-02	3.28E-02	0.02	0.24	1.57
2.20	1.79E+00	8.25E-01	-1.08E-04	54.39	1.26E-02	2.13E-02	3.39E-02	0.07	0.30	1.54
2.30	1.81E+00	8.23E-01	-2.27E-04	54.84	1.19E-02	2.18E-02	3.37E-02	0.10	0.20	1.53
2.40	1.83E+00	8.23E-01	-3.33E-04	59.46	1.10E-02	2.24E-02	3.35E-02	0.10	0.21	1.53
2.50	1.84E+00	8.21E-01	-3.87E-04	62.62	1.03E-02	2.33E-02	3.37E-02	0.11	0.29	1.52
2.60	1.84E+00	8.24E-01	-4.04E-04	63.20	9.80E-03	2.62E-02	3.60E-02	0.13	0.30	1.46
2.70	1.83E+00	8.30E-01	-4.20E-04	62.61	1.00E-02	2.89E-02	3.89E-02	0.14	0.28	1.41
2.80	1.83E+00	8.31E-01	-4.24E-04	62.26	9.71E-03	3.12E-02	4.09E-02	0.17	0.32	1.38

2.90	1.83E+00	8.39E-01	-4.69E-04	63.38	9.72E-03	2.88E-02	3.85E-02	0.18	0.33	1.42
3.00	1.85E+00	8.52E-01	-5.16E-04	68.42	9.52E-03	2.82E-02	3.77E-02	0.16	0.27	1.42
3.10	1.86E+00	8.62E-01	-5.39E-04	70.77	9.59E-03	2.76E-02	3.72E-02	0.15	0.20	1.43
3.20	1.86E+00	8.66E-01	-5.37E-04	72.09	9.82E-03	2.71E-02	3.69E-02	0.15	0.24	1.46
3.30	1.86E+00	8.66E-01	-5.55E-04	72.95	9.94E-03	2.71E-02	3.70E-02	0.15	0.24	1.49
3.40	1.87E+00	8.68E-01	-5.89E-04	74.14	1.03E-02	2.73E-02	3.76E-02	0.15	0.23	1.50
3.50	1.89E+00	8.72E-01	-6.62E-04	76.40	1.06E-02	2.60E-02	3.66E-02	0.15	0.25	1.53
3.60	1.90E+00	8.72E-01	-7.29E-04	78.94	1.07E-02	2.59E-02	3.66E-02	0.15	0.21	1.53
3.70	1.92E+00	8.70E-01	-7.93E-04	82.01	1.08E-02	2.66E-02	3.75E-02	0.16	0.21	1.53
3.80	1.93E+00	8.67E-01	-8.19E-04	84.46	1.09E-02	2.80E-02	3.89E-02	0.17	0.23	1.51
3.90	1.91E+00	8.66E-01	-7.44E-04	84.54	1.11E-02	3.00E-02	4.11E-02	0.17	0.29	1.48
4.00	1.88E+00	8.62E-01	-5.74E-04	80.94	1.11E-02	3.29E-02	4.40E-02	0.20	0.31	1.44
							medie	0.13	0.21	1.63
							mediana	0.15	0.21	1.53

Tabel A-7 Setul 3, Teren B

T [s]	a	b	c	h	σ_r^2	σ_e^2	σ^2	MEANNR	MEDNR	STDNR
0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00	0.00	0.00
0.10	1.43E+00	5.98E-01	-3.25E-03	224.33	5.84E-03	4.06E-02	4.65E-02	0.01	0.04	1.29
0.20	3.20E+00	6.21E-01	-5.52E-03	312.78	6.43E-03	3.00E-02	3.64E-02	0.44	0.57	1.37
0.30	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.70	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
0.80	3.33E+00	9.46E-01	-4.76E-03	261.74	1.47E-02	7.55E-02	9.02E-02	0.36	0.36	0.93
0.90	2.46E+00	9.80E-01	-2.59E-03	158.90	1.40E-02	7.16E-02	8.56E-02	0.07	0.03	0.94
1.00	2.64E+00	9.95E-01	-2.99E-03	169.84	1.35E-02	8.51E-02	9.86E-02	0.15	0.16	0.91
1.10	2.73E+00	1.03E+00	-3.16E-03	173.61	1.36E-02	9.37E-02	1.07E-01	0.20	0.20	0.90
1.20	2.72E+00	1.07E+00	-3.18E-03	167.72	1.50E-02	8.80E-02	1.03E-01	0.19	0.26	0.90
1.30	2.87E+00	1.09E+00	-3.56E-03	189.49	1.62E-02	7.31E-02	8.94E-02	0.06	0.25	0.94
1.40	3.05E+00	1.10E+00	-3.92E-03	214.40	1.58E-02	6.95E-02	8.53E-02	0.04	0.11	0.95
1.50	3.07E+00	1.12E+00	-4.00E-03	214.14	1.54E-02	6.30E-02	7.84E-02	0.06	0.02	0.98
1.60	2.84E+00	1.13E+00	-3.50E-03	187.09	1.54E-02	5.70E-02	7.24E-02	0.01	0.11	1.01
1.70	2.72E+00	1.14E+00	-3.22E-03	174.56	1.46E-02	5.14E-02	6.60E-02	0.04	0.10	1.04
1.80	2.70E+00	1.15E+00	-3.16E-03	174.39	1.40E-02	4.79E-02	6.20E-02	0.03	0.07	1.07
1.90	2.63E+00	1.16E+00	-3.01E-03	166.20	1.38E-02	4.48E-02	5.87E-02	0.03	0.14	1.08
2.00	2.78E+00	1.16E+00	-3.47E-03	178.88	1.41E-02	4.44E-02	5.85E-02	0.01	0.05	1.08
2.10	2.95E+00	1.16E+00	-3.91E-03	196.78	1.40E-02	4.49E-02	5.89E-02	0.07	0.00	1.06
2.20	3.06E+00	1.17E+00	-4.16E-03	207.11	1.30E-02	4.53E-02	5.83E-02	0.08	0.00	1.06

2.30	2.92E+00	1.17E+00	-3.82E-03	193.05	1.21E-02	4.67E-02	5.88E-02	0.02	0.08	1.06
2.40	2.78E+00	1.18E+00	-3.47E-03	179.59	1.16E-02	4.79E-02	5.95E-02	0.01	0.10	1.07
2.50	2.67E+00	1.18E+00	-3.19E-03	167.80	1.25E-02	4.93E-02	6.18E-02	0.02	0.10	1.08
2.60	2.58E+00	1.18E+00	-2.95E-03	158.59	1.29E-02	4.91E-02	6.21E-02	0.03	0.13	1.09
2.70	2.57E+00	1.18E+00	-2.88E-03	159.65	1.34E-02	4.79E-02	6.13E-02	0.03	0.11	1.10
2.80	2.63E+00	1.18E+00	-3.04E-03	168.58	1.35E-02	4.83E-02	6.18E-02	0.02	0.09	1.11
2.90	2.58E+00	1.18E+00	-2.89E-03	166.53	1.38E-02	4.83E-02	6.21E-02	0.02	0.10	1.12
3.00	2.55E+00	1.18E+00	-2.78E-03	165.02	1.44E-02	4.73E-02	6.17E-02	0.02	0.10	1.13
3.10	2.52E+00	1.18E+00	-2.73E-03	161.64	1.49E-02	4.69E-02	6.18E-02	0.01	0.06	1.13
3.20	2.51E+00	1.17E+00	-2.72E-03	159.83	1.49E-02	4.72E-02	6.21E-02	0.01	0.02	1.15
3.30	2.50E+00	1.17E+00	-2.72E-03	159.36	1.46E-02	4.75E-02	6.22E-02	0.01	0.03	1.15
3.40	2.49E+00	1.17E+00	-2.70E-03	158.85	1.45E-02	4.80E-02	6.24E-02	0.01	0.03	1.15
3.50	2.47E+00	1.17E+00	-2.62E-03	156.61	1.45E-02	4.85E-02	6.30E-02	0.01	0.03	1.15
3.60	2.45E+00	1.17E+00	-2.58E-03	156.91	1.44E-02	4.85E-02	6.29E-02	0.00	0.04	1.15
3.70	2.48E+00	1.17E+00	-2.64E-03	161.49	1.43E-02	4.86E-02	6.30E-02	0.01	0.01	1.16
3.80	2.54E+00	1.16E+00	-2.80E-03	169.90	1.40E-02	4.87E-02	6.27E-02	0.04	0.01	1.17
3.90	2.62E+00	1.16E+00	-3.00E-03	181.41	1.37E-02	4.94E-02	6.31E-02	0.07	0.01	1.17
4.00	2.68E+00	1.16E+00	-3.14E-03	189.85	1.35E-02	5.02E-02	6.37E-02	0.09	0.00	1.17
							medie	0.06	0.09	1.07
							mediana	0.03	0.08	1.08

Tabel A-8 Setul 3, Teren C

Bibliografie

- Akkar, S. (2016, Noiembrie 28). *Utility Software for Data Processing*. Preluat de pe USDP: <http://web.boun.edu.tr/sinan.akkar/usdp1.html>
- Akkar, S., & Bommer, J. (2007). Empirical Prediction Equations for Peak Ground Velocity Derived from Strong-Motion Records from Europe and the Middle East. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 511-530.
- Allen, T., & Wald, D. (2007). Topographic Slope as a Proxy for Seismic Site-Conditions ($V_s 30$) and Amplification Around the Globe. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2007-1357*, 69p.
- ATC-40. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Redwood City, California: Applied Technology Council.
- BIGSEES. (2017, July 7). *Bigsees Earthquake Catalogue*. Preluat de pe INFP BIGSEES: <http://infp.infp.ro/bigsees/Results.html>
- Boore. (2004). Estimating $V_s 30$ (or NEHRP classes) from shallow Velocity Models (Depths < 30m). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 591-597.
- Boore, D. (2017, Iulie 13). *Data Online*. Preluat de pe David Boore: http://www.daveboore.com/data_online.html
- Boore, D., Joyner, W., & Fumal, T. (1997). Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work. *Seismological Research Letters*, 128-153.
- Borcia, I. S. (2008). *Procesarea Înregistrărilor Mișcărilor Seismice Vrancea Puternice*. Iași: Editura Societății Academice Matei-Teiu Botez.
- Cauzzi, C., & Faccioli, E. (2008). Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement responsespectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology*, 12, 453-475.
- CEN. (2004). *European Standard EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: Comite Europeen de Normalisation.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering, 4th Edition*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2001). *Direct Displacement-Based Design: Use of Inelastic Design Spectra Versus Elastic Design Spectra*. EERI.
- Crăciun, I., Văcăreanu, R., & Pavel, F. (2016). Spectral Displacement Demands for Strong Ground Motions Recorded During Vrancea Intermediate-Depth Earthquakes. *The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt* (pg. 169-188). București: Springer Natural Hazards.

- Craițăleanu, I. (2005). *Modele neliniare cu un grad de libertate în ingineria seismică*. Bucharest: MatrixRom.
- Damian, I. (2014). *Aplicarea metodelor bazate pe deplasare la proiectarea seismică a structurilor de hale parter cu stâlpi în consolă de beton armat*. București: Teză de doctorat, UTCB.
- Douglas, J. (2016). *Ground motion prediction equations 1964-2016*. Glasgow, United Kingdom: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Strathclyde.
- Faccioli, E., Cauzzi, C., Paolucci, R., Vanini, M., Villani, M., & Finazzi, D. (2007). Long Period Strong Ground Motion and its Use as Input to Displacement Based Design. *Earthquake Geotechnical Engineering, 4th Conference* (pp. 23-51). Thessaloniki: Springer.
- Faccioli, E., Paolucci, R., & Rey, J. (2004). Displacement Spectra for Long Periods. *Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute*, 347-376.
- Frohlich, C. (2006). *Deep Earthquakes*. Cambridge: University Press.
- Goda, K., & Atkinson, G. (2009). Seismic Demand Estimation of Inelastic SDOF Systems for Earthquakes in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 3284–3299.
- Gutunoi, A., & Zamfirescu, D. (2013). Study on Relation Between Inelastic and Elastic Displacement for Vrancea Earthquakes. *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, Doi:10.2478/mmce-2013-0016.
- INFP. (2017, July 7). *Seismicitatea României*. Preluat de pe INFP: http://www.infp.ro/despre-cutremure/#ch_8
- 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*, 81-98.
- Joyner, W., & Boore, D. (1993). Methods for Regression Analysis of Strong-Motion Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 469-487.
- Joyner, W., & Boore, D. (1994). Errata - Methods for Regression Analysis of Strong-Motion Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 955-956.
- Kashima, T. (2016, Noiembrie 27). *ViewWave*. Preluat de pe ViewWave v 2.2.2.0: <http://smo.kenken.go.jp/~kashima/viewwave>
- Lungu, D., & Ghiocel, D. (1982). *Metode Probabilistice în Calculul Construcțiilor*. București: Editura Tehnică.
- Lungu, D., Aldea, A., Arion, C., & Văcăreanu, R. (2003). Hazard, Vulnerabilitate și Risc Seismic. În D. Dubină, & D. Lungu, *Construcții amplasate în zone cu mișcări seismice puternice. Hazard, vulnerabilitate și risc seismic. Structuri performante din oțel pentru clădiri amplasate în zone seismice* (pg. 21-157). Timișoara: Editura Orizonturi Universitare.

- Lungu, D., Văcăreanu, R., Aldea, A., & Arion, C. (2000). *Advanced Structural Analysis*. Bucharest: Conspress.
- MDRAP. (2013). *P100-1/2013*. București, România: Ministerul Dezvoltării Regionale și a Administrației Publice.
- Michel, C., Lestuzzi, P., & Lacave, C. (2014). Simplified non-linear seismic displacement demand prediction for low period structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI 10.1007/s10518-014-9585-1.
- Miranda, E., & Ruiz Garcia, J. (2003). Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1237-1258.
- Miranda, E., & Ruiz-Garcia, J. (2007). Probabilistic estimation of maximum inelastic displacement demands for performance-based design. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1235–1254.
- NASA. (2002, October 6). *Digital Tectonic Activity Map*. Preluat de pe Visible Earth în iulie 2017: <https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=88415>
- Neagu, C., Arion, C., Aldea, A., Văcăreanu, R., & Pavel, F. (2017). Ground Types for Seismic Design in Romania. *6th National Conference on Earthquake Engineering & 2nd National Conference on Earthquake Engineering and Seismology - Proceedings* (pg. 345-352). București: Publishing Conspress.
- Priestley, M., Calvi, G., & Kowalsky, M. (2007). *Displacement-Based Seismic Design Of Structures*. Pavia, Italy: IUSS Press.
- Scherbaum, F., Delavaud, E., & Riggelsen, C. (2009). Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 3234-3247.
- Seismosoft. (2016, Noiembrie 28). *Seismosignal 2016*. Preluat de pe Seismosoft: <http://www.seismosoft.com/seismosignal>
- Strong Motion Seismograph Networks (K-NET, KiK-net)*. (2017, Ianuarie 30). Preluat de pe National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>
- Sucuoglu, H., & Akkar, S. (2014). *Basic Earthquake Engineering. From Seismology to Analysis and Design*. Springer International Publishing Switzerland.
- Trendafiloski, G., Wyss, M., Rosset, P., & Marmureanu, G. (2009). Constructing City Models to Estimate Losses Due to Earthquakes Worldwide: Application to Bucharest, Romania. *Earthquake Spectra*, 22p.
- USGS. (2017, Iulie 13). *Vs30 Data*. Preluat de pe USGS: <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>
- Văcăreanu, R., Pavel, F., Aldea, A., Arion, C., & Neagu, C. (2015). *Elemente de analiză a hazardului seismic*. București: Conspress.

- Veletsos, A. S., Newmark, N. M., & Chelapati, C. V. (1965). Deformation Spectra for Elastic and Elastoplastic Systems Subjected to Ground Shock and Earthquake Motions. *Proc. 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, (pg. 663-682). New Zealand.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 974-1002.