



UNIVERSITATEA TEHNICĂ
DIN CLUJ-NAPOCA
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII

Ing. Adriana IONESCU

TEZA DE DOCTORAT

**Contribuții privind proiectarea antiseismică a
structurilor de construcții prevăzute cu
dispozitive de amortizare a vibrațiilor**

**CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:
Prof. dr. ing. Eugen PANȚEL**

2017

*Varianta completă poate fi studiată în format tipărit la secretariatul
Departamentului Mecanica Construcțiilor*

DREPTUL DE AUTOR

Conținutul acestei lucrări poate fi vizualizat, transmis și imprimat numai în scopuri personale, didactice, de cercetare și necomerciale. Dreptul de autor pentru informațiile existente în această lucrare este deținut de autorul lucrării și/sau de conducătorul științific. Nici un material din această lucrare nu poate fi reprodus parțial, integral sau modificat fără permisiunea anterioară explicită, prin acord scris, a autorului lucrării și a conducătorului științific.

Conținutul acestei lucrări, textele, relațiile matematice, ilustrațiile, fotografiile și orice alte materiale prezente în lucrare, sunt protejate de legea dreptului de autor.

Citarea lucrării se va face în acest format:

Ionescu Adriana, *Contribuții privind proiectarea antiseismică a structurilor de construcții prevăzute cu dispozitive de amortizare a vibrațiilor*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2017.

CUPRINS

Lista figurilor	IV
Lista tabelelor	XIII
Lista principalelor simboluri	XV
Lista abrevierilor	XVII
Cap. 1 Introducere	1
1.1 Importanța și oportunitatea cercetării	1
1.2 Obiectivele cercetării	2
1.3 Conținutul tezei de doctorat	2
Cap. 2 Tipuri de dispozitive utilizate la protecția antiseismică a clădirilor	5
2.1 Tipuri de amortizori seismici	5
2.1.1 Amortizori vâscoelastici	5
2.1.2 Amortizori cu fluid vâscos	6
2.1.3 Bare disipative cu flambaj împiedicat	10
2.1.4 Amortizori metalici	11
2.1.5 Amortizori cu frecare	12
2.1.6 Amortizori românești ȘERB	13
2.1.6.1 Dispozitive ȘERB de amortizare seismică pentru suprastructură	14
2.1.6.2 Dispozitive ȘERB de amortizare seismică pentru fundație	17
2.2 Tipuri de izolatori seismici	19
2.2.1 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB)	19
2.2.2 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB)	20
2.2.3 Izolatori din cauciuc lamelar cu miez de plumb (LRB)	21
2.2.4 Izolatori de tip pendul cu frecare (FPS)	22
2.2.5 Izolatori românești ȘERB	23
Cap. 3 Contribuții privind determinarea experimentală a buclelor de histerezis specifice amortizorilor ȘERB	25
3.1 Introducere	25
3.2 Încercări experimentale pe amortizorul ȘERB C-194	26
3.3 Încercări experimentale pe amortizorul telescopic ȘERB TEL-150	30
3.4 Concluzii	32
Cap. 4 Contribuții privind analiza cu M.E.F. a amortizorilor ȘERB	33
4.1 Introducere	33
4.2 Amortizorii pentru suprastructură ȘERB C-194	33
4.2.1 Principiul de funcționare	34
4.2.2 Modelarea cu M.E.F. în ANSYS a prototipului ȘERB C-194	35
4.2.3 Validarea modelului cu elemente finite a amortizorului ȘERB pentru suprastructură	41
4.2.4 Concluzii	42
4.3 Amortizorii telescopici pentru fundație ȘERB TEL-150	42
4.3.1 Principiul de funcționare	43
4.3.2 Modelarea cu M.E.F. în ANSYS a amortizorului ȘERB TEL-150	43
4.3.3 Validarea modelului cu elemente finite a amortizorului ȘERB TEL-150	49
4.3.4 Concluzii	50

4.4 Concluzii finale	50
Cap. 5 Contribuții privind modelarea structurilor echipate antiseismic	51
5.1 Introducere	51
5.2 Contribuții privind modelarea matematică a amortizorilor	52
5.2.1 Modelul amortizorului cu fluid vâscos	52
5.2.2 Modelul Maxwell	53
5.2.3 Modelul Kelvin-Voigt	54
5.2.4 Modelul Zener	54
5.2.5 Modelul Bouc-Wen	55
5.2.5.1 Introducere	55
5.2.5.2 Influența parametrilor Bouc-Wen asupra buclei de histerezis	56
5.2.5.3 Componentele buclei de histerezis Bouc-Wen	61
5.2.5.4 Contribuții privind adaptarea modelului Bouc-Wen	62
5.2.5.4.1 Contribuții la adaptarea modelului Bouc Wen privind relaxarea rigidității	62
5.2.5.4.2 Contribuții la adaptarea modelului Bouc-Wen privind pierderea rezistenței	68
5.2.5.5 Contribuții originale la modelarea amortizorilor ȘERB	74
5.2.5.6 Modelul Bouc-Wen Papion	78
5.2.6 Alte modele de histerezis	80
5.2.7 Concluzii	80
5.3 Contribuții privind modelarea matematică a structurilor echipate antiseismic	81
5.3.1 Stabilirea ecuațiilor de mișcare pentru sisteme cu n grade de libertate dinamică la acțiuni seismice	81
5.3.2 Elemente de calcul specifice configurațiilor de amplasare a amortizorilor la suprastructură	86
5.3.3 Bilanț energetic	91
5.3.4 Concluzii	92
5.4 Contribuții privind implementarea software a modelului matematic pentru structuri echipate cu dispozitive histeretice	93
5.4.1 Introducere	93
5.4.2 Programul <i>HistPlot</i>	94
5.4.3 Programul <i>ProConfig</i>	97
5.4.4 Programul <i>GenEcAm</i>	100
5.4.5 Programul <i>ProAnim</i>	103
5.4.6 Concluzii	105
5.5 Concluzii finale	107
Cap. 6 Contribuții privind validarea modelării structurilor echipate antiseismic	109
6.1 Introducere	109
6.2 Analiza structurilor în <i>SAP2000</i>	109
6.3 Compararea rezultatelor referitoare la modurile proprii de vibrație	112
6.4 Compararea rezultatelor referitoare la deplasări, viteze, accelerații și forțe de amortizare	114
6.4.1 Cazul 1 – Clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâscos, $c = 10000$	115

kNs/m ²	
6.4.2 Cazul 2 – Clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâcos, $c = 17000$	
kNs/m ²	127
6.4.3 Cazul 3 – Clădire P+10E fără amortizori	139
6.5 Concluzii	142
Cap. 7 Contribuții la evaluarea performanțelor antiseismice a sistemelor de protecție la seism cu amortizori ȘERB	146
7.1 Introducere	146
7.2 Evaluarea performanțelor antiseismice ale amortizorilor ȘERB pentru suprastructură	147
7.2.1 Comparație între rezultatele modelării sistemului de amortizare ȘERB folosind cele două modele de histerezis: Bouc-Wen clasic (BW) și Bouc-Wen-Exp (BW-Exp)	148
7.2.2 Cazul clădirii echipate cu patru amortizori ȘERB pe nivel pe direcția Ox a seismului, modelați cu modelele de histerezis Bouc-Wen clasic și respectiv Bouc-Wen-Exp	150
7.2.3 Cazul clădirii echipate cu doi și respectiv patru amortizori ȘERB pe nivel, pe direcția Ox a seismului, modelați cu Bouc-Wen clasic	153
7.2.4 Cazul clădirii echipate cu doi și respectiv patru amortizori ȘERB pe nivel, pe direcția Ox a seismului, modelați cu modelul Bouc-Wen-Exp	155
7.2.5 Cazul clădirii echipate pe nivel cu doi amortizori cu fluid vâcos (FV) și respectiv doi amortizori ȘERB (modelați cu Bouc-Wen-Exp), pe direcția Ox a seismului	158
7.2.6 Cazul clădirii echipate pe nivel cu doi amortizori cu fluid vâcos (FV) și respectiv patru amortizori ȘERB modelați cu Bouc-Wen-Exp, pe direcția Ox a seismului	160
7.2.6.1 Analiza cu accelerograme având a_g specific SLS	160
7.2.6.2 Analiza cu accelerograme având a_g specific ULS	164
7.3 Evaluarea performanțelor antiseismice ale amortizorilor ȘERB pentru fundație	168
7.4 Concluzii	172
Cap. 8 Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare	175
8.1 Concluzii generale	175
8.2 Contribuții personale	176
8.3 Direcții viitoare de cercetare	179
Bibliografie	181
Anexa A Cazuri suplimentare de validare a aplicației GenEcAm	192
Anexa B Selecții din codurile sursă în Embarcadero Delphi XE3 ale aplicațiilor software	213

Lista figurilor

Fig. 2.1 Amortizor vâscoelastic: a) alcătuire [100]; b) model mecanic; c) bucla de histerezis	6
Fig. 2.2 Bank of America: (a) vedere; (b) amortizor vâscoelastic [100]	6
Fig. 2.3 Schema de principiu a unui amortizor cu fluid vâcos [100]	6
Fig. 2.4 Clădirea Torre Mayor, Mexico City [89]	7

Fig. 2.5 Sediul Facultății de Management din cadrul Academiei de Științe Economice (stânga), Amortizor seismic Taylor Devices SUA montat în fundație (dreapta) [62, 64]	8
Fig. 2.6 Izolatori și amortizori seismici montați în fundația clădirii Primăriei București [154]	9
Fig. 2.7 Bară disipativă cu flambaj împiedicat – alcătuire [164]	10
Fig. 2.8 Bară disipativă cu flambaj împiedicat – bucla de histerezis [54]	10
Fig. 2.9 Rigidizarea parcării supraetajate a aeroportului John Wayne Airport, Santa Ana, California, USA [164]	11
Fig. 2.10 Amortizor metalic tip ADAS [165]	11
Fig. 2.11 Amortizor metalic tip “fagure” [165]	12
Fig. 2.12 Banca Wells Fargo: (a) vedere; (b) amortizor metalic de tip X-ADAS [100]	12
Fig. 2.13 Amortizor cu frecare - alcătuire	13
Fig. 2.14 Complexul rezidențial Nouvel Europa: a) vedere; b) amortizor cu frecare produs de firma Pall [100]	13
Fig. 2.15 Dispozitive de amortizare seismică pentru suprastructură, ȘERB-B*T și caracteristicile lor histeretice determinate experimental [136]	14
Fig. 2.16 Dispozitiv telescopic ȘERB-B1T*F _x -Δx [135]	14
Fig. 2.17 Corp B NAVROM înainte de modernizare (stânga) și după modernizare (centru și dreapta) [161]	15
Fig. 2.18 Corp B NAVROM. Secțiune longitudinală – axa “a”. Dispunere amortizori ȘERB [125]	16
Fig. 2.19 Corp B NAVROM. Secțiune longitudinală – axa ”c”. Dispunere amortizori ȘERB [125]	16
Fig. 2.20 Corp B – Detalii amplasare și prindere contravântuiri cu amortizori ȘERB [161]	16
Fig. 2.21 Dispozitiv telescopic ȘERB-B2T*F _x -Δx [135]	16
Fig. 2.22 Amortizor telescopic ȘERB-TEL pentru fundație – schemă de principiu [136]	17
Fig 2.23 Dispozitiv telescopic ȘERB-TEL*600-300 (stânga) și caracteristica sa de histerezis (dreapta) [136]	18
Fig. 2.24 Schema de principiu a sistemului de protecție antiseismică a platformelor CETAL [162]	18
Fig. 2.25 Detalii cu sistemul de protecție antiseismică a platformelor CETAL [162]	18
Fig. 2.26 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB) – alcătuire [100]	19
Fig. 2.27 Unele aplicații de izolare seismică în Turcia: Sediul Central T.E.B. izolat cu 87 LRB și LDRB, care era în curs de execuție în 2006; b) cele două rezervoare LNG de 140.000 m ³ din Egegaz la terminalul Aliaga-Izmir, izolat cu 112 LRB și 241 LDRB proiectată să reziste până la PGA de 0,7g. [89]	19
Fig. 2.28 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB) a) structura reală [100]; b) bucla de histerezis	20
Fig. 2.29 Clădirea Centrului Civil de Apărare din Foligno (Italia) izolată seismic cu 10 izolatori HDRB [95]	20
Fig. 2.30 a) Noul sediu al Agenției Naționale de Drumuri din L’Aquila, clădire izolată cu 60 HDRB; b) câțiva izolatori montați la baza clădirii [96]	21
Fig. 2.31 Izolator din cauciuc lamelar cu miez de plumb (LRB) – alcătuire [100]	21
Fig. 2.32 Bucle de histerezis ale izolatorilor seismici cu elastomeri [166]	21
Fig. 2.33 Noul complex hotelier cu 27 de etaje din beton armat ridicat în Sochi (înălțime 93 m, suprafață locuibilă 40.000 m ²), protejat cu 156 izolatori tip LRB [31,96]	22
Fig. 2.34 Izolator de tip pendul cu frecare (FPS): a) alcătuire [100]; b) bucla de histerezis	22
Fig. 2.35 a) Unul din rezervoarele Uzinei Chimice Polimeri Europa din Priolo, Italia,	22

consolidat folosind izolatori tip FPS în 2008. Detalii în timpul (b) și după montarea izolatoarelor (c)

Fig 2.36 Izolator elastic cu amortizare ȘERB-B6I*Fz-Δxy (varianta 1) [135]	23
Fig. 2.37 Caracteristica forță-deformare pe direcție verticală și pe o direcție orizontală [136]	24
Fig 2.38 Izolator ȘERB cu frecare ȘERB-B5I [135]	24
Fig. 3.1 Amortizorul ȘERB C-194 testat la ICECON București	26
Fig. 3.2 Elemente componente ale amortizorului ȘERB C-194	26
Fig. 3.3 Amortizorul ȘERB C-194 montat pe mașina de testat universală SANS	27
Fig. 3.4 Echipamentul de comandă, control și măsurare al mașinii de testat SANS	27
Fig. 3.5 Forța ciclică și curba de histerezis la întindere a amortizorului ȘERB C-194	28
Fig. 3.6 Forța ciclică și curba de histerezis la compresiune a amortizorului ȘERB C-194	28
Fig. 3.7 Bucla de histerezis experimentală a amortizorului ȘERB C-194 testat la întindere și compresiune	28
Fig. 3.8 Forța ciclică și curba de histerezis la întindere a amortizorului ȘERB C-194	29
Fig. 3.9 Bucla de histerezis experimentală a amortizorului ȘERB C-194 testat la întindere	29
Fig. 3.10 Amortizorul telescopic ȘERB TEL-150 montat pe mașina de încercat la tracțiune – IMSAR București	30
Fig. 3.11 Traductorul de deplasare (stânga) și traductorul de forță (dreapta) montați pe mașina de încercat la tracțiune	31
Fig. 3.12 Interfața și sistemul de calcul necesar preluării și procesării datelor experimentale	31
Fig. 3.13 Bucla de histerezis experimentală a amortizorului telescopic ȘERB TEL-150	31
Fig. 4.1 Prototipul amortizorului ȘERB C-194 pentru suprastructură [136] – schiță	34
Fig. 4.2 Modelul geometric al prototipului amortizorului ȘERB C-194	35
Fig. 4.3 Modelul cu elemente finite integral (sus) și detalii de discretizare (jos), ȘERB C-194	35
Fig. 4.4 Reprezentarea 3D (pe sfert) a modelului cu elemente finite al prototipului ȘERB C-194	36
Fig. 4.5 Forța axială F care acționează asupra modelului amortizorului ȘERB C-194	37
Fig. 4.6 Tensiunile Von Mises [MPa] la timpul $t = 70s$ și forța axială $F = -1000$ kN (compresiune)	37
Fig. 4.7 Deplasările axiale [mm] la timpul $t = 70s$ și forța axială $F = -1000$ kN (compresiune)	38
Fig. 4.8 Tensiunile Von Mises [MPa] la timpul $t = 80s$ și forța axială $F = 1000$ kN (întindere)	38
Fig. 4.9 Deplasările axiale [mm] la timpul $t = 80s$ și forța axială $F = 1000$ kN (întindere)	38
Fig. 4.10 Reprezentare 3D - Tensiunile Von Mises [MPa] la timpul $t = 70s$ și forța axială $F = -1000$ kN	39
Fig. 4.11 Reprezentare 3D - Tensiunile Von Mises [MPa] la timpul $t = 80s$ și forța axială $F = 1000$ kN	39
Fig. 4.12 Bucla de histerezis numerică a prototipului amortizorului ȘERB C-194 pentru cele 3 modele A, B, C	40
Fig. 4.13 Buclele de histerezis determinate numeric și experimental	41
Fig. 4.14 Amortizor telescopic pentru fundație ȘERB TEL-150 [136]	43
Fig. 4.15 Modelul geometric al amortizorului (un sfert din structura amortizorului ȘERB TEL-150)	43
Fig. 4.16 Modelul cu elemente finite (jumătate din structura amortizorului ȘERB TEL-150)	44
Fig. 4.17 Reprezentarea pe jumătate a modelului cu elemente finite în ANSYS – detaliu (ȘERB TEL-150)	44

Fig. 4.18 Încărcarea și rezemarea modelului amortizorului ȘERB TEL-150	45
Fig. 4.19 Tensiuni Von Mises la sfârșitul etapei 2 - deplasare ax la 150 mm pe Ox	46
Fig. 4.20 Tensiuni Von Mises la sfârșitul etapei 3 - deplasare ax la -150 mm pe Ox	46
Fig. 4.21 Deplasarea de-a lungul axei Oy la sfârșitul etapei 2 de analiză	47
Fig. 4.22 Deplasarea de-a lungul axei Oy la sfârșitul etapei 3 de analiză	47
Fig. 4.23 Bucle de histerezis a amortizorului ȘERB TEL-150, obținută cu M.E.F. în ANSYS	48
Fig. 4.24 Buclele de histerezis ale amortizorului ȘERB TEL-150 obținute numeric și experimental	49
Fig. 5.1 Modelul mecanic al unui amortizor liniar cu fluid vâscos	52
Fig. 5.2 Aplicația <i>HistPlot</i> - Bucle de histerezis adimensionale pentru $0.5 \leq \alpha_v \leq 1$ - amortizare vâscoasă	52
Fig. 5.3 Modelul mecanic Maxwell	53
Fig. 5.4 <i>HistPlot</i> - Bucle de histerezis adimensionale pentru un amortizor tip Maxwell cu $0.1 \leq \tau_0 \leq 0.5$	53
Fig. 5.5 Modelul mecanic Kelvin-Voigt	54
Fig. 5.6 <i>HistPlot</i> - Bucle de histerezis adimensionale - model Kelvin-Voigt cu $0.1 \leq c \leq 0$ și $1 \leq k \leq 2.5$	54
Fig. 5.7 Modelul mecanic Zener	55
Fig. 5.8 Aplicația <i>HistPlot</i> - Bucle de histerezis adimensionale pentru un amortizor tip Zener	55
Fig. 5.9 <i>HistPlot</i> – Bucle de histerezis adimensionale, modelul Bouc-Wen, influența parametrului γ	57
Fig. 5.10 <i>HistPlot</i> – Bucle de histerezis adimensionale, modelul Bouc-Wen, influența parametrului β	57
Fig. 5.11 <i>HistPlot</i> – Bucle de histerezis adimensionale Bouc-Wen, influența condiției $\gamma \geq \beta$ sau $\beta > \gamma$	58
Fig. 5.12 Aplicația <i>HistPlot</i> – Bucle de histerezis adimensionale Bouc-Wen, influența parametrului n	58
Fig. 5.13 Bucle histeretice adimensionale obținute cu modelul extins Bouc-Wen – aplicația <i>HistPlot</i>	59
Fig. 5.14 Aplicația <i>HistPlot</i> – Bucle de histerezis adimensionale Bouc-Wen, influența parametrului A	60
Fig. 5.15 Aplicația <i>HistPlot</i> – Bucle de histerezis adimensionale Bouc-Wen, influența parametrului a	60
Fig. 5.16 Segmentele buclei de histerezis Bouc-Wen	61
Fig. 5.17 Diferența între curba reală (roșu) și modelul Bouc-Wen (albastru) – coordonate adimensionale	62
Fig. 5.18 <i>HistPlot</i> – Variația în timp a lui R_k (albastru) și R_k^{min} (roșu) pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine crescătoare în timp (coordonate adimensionale)	64
Fig. 5.19 <i>HistPlot</i> – bucla de histerezis folosind modelul Bouc-Wen_UC pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine crescătoare în timp (coordonate adimensionale)	65
Fig. 5.20 <i>HistPlot</i> – R_k^{trial} (albastru) și R_k^{min} (roșu) pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine variabilă în timp sub formă de ovoid (coordonate adimensionale)	65
Fig. 5.21 Aplicația <i>HistPlot</i> – bucla de histerezis folosind Modelul Bouc-Wen_UC pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine variabilă în timp sub formă de ovoid (coordonate adimensionale)	66
Fig. 5.22 Aplicația <i>HistPlot</i> – R_k^{trial} și R_k^{min} modelul Bouc-Wen_UC pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine variabilă în timp sub formă de ovoid (coordonate adimensionale)	67

Fig. 5.23 Aplicația <i>HistPlot</i> – R_k^{trial} , R_k^{min} și bucla histeretică - modelul Bouc-Wen_UC, pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine variabilă în timp sub formă de ovoid (coordonate adimensionale)	67
Fig. 5.24 Aplicația <i>HistPlot</i> - bucla histeretică obținută cu modelul Bouc-Wen_UC, opțiunea “ <i>Energ</i> ”	69
Fig. 5.25 Aplicația <i>HistPlot</i> – Bucle de histerezis cu caracteristica liniară obținute cu modelele Bouc Wen clasic (stânga) și Bouc-Wen_UC-Energ (dreapta)	70
Fig. 5.26 Aplicația <i>HistPlot</i> – Bucle de histerezis cu caracteristica neliniară degresivă obținute cu modelele Bouc Wen clasic (stânga) și Bouc-Wen_UC-Energ (dreapta)	70
Fig. 5.27 Variația energiei H în timp	70
Fig. 5.28 Influența modificării parametrului β_2 asupra variației factorului de adaptare propus	72
Fig. 5.29 Influența modificării parametrului β_3 asupra variației factorului de adaptare propus	72
Fig. 5.30 Influența modificării parametrului β_4 asupra variației factorului de adaptare propus	72
Fig. 5.31 Aplicația <i>HistPlot</i> , bucla histeretică obținută cu modelul Bouc-Wen_Strength la modelarea amortizorilor ȘERB	73
Fig. 5.32 Aplicația <i>HistPlot</i> , bucla histeretică obținută cu modelul Bouc-Wen_Exp	76
Fig. 5.33 Aplicația <i>HistPlot</i> , bucla histeretică obținută cu modelul Bouc-Wen_Exp la diferite valori ale lui K_0	77
Fig. 5.34 Aplicația <i>HistPlot</i> , bucla histeretică - modelul Bouc-Wen Papion (coordonate adimensionale)	78
Fig. 5.35 Aplicația <i>HistPlot</i> , modelul Bouc-Wen Papion, variația formei buclei histeretice funcție de A , β și F_0 (coordonate adimensionale)	79
Fig. 5.36 <i>HistPlot</i> , modelul Bouc-Wen Papion, variația formei buclei histeretice funcție de α și K_0 (coordonate adimensionale)	79
Fig. 5.37 Sistem cu n grade de libertate dinamică echipat antiseismic	82
Fig. 5.38 Modelul mecanic asociat sistemului oscilant cu n grade de libertate dinamică echipat antiseismic	82
Fig. 5.39 Configurații de amplasare a amortizorilor; a-configurația tip chevron; b-configurația tip contravântuire; c - configurația cu pârghii nr.1 ; d - configurația cu pârghii nr. 2	86
Fig. 5.40 Configurația cu pârghii nr. 1 [100]	87
Fig. 5.41 Configurația cu pârghii nr. 2	88
Fig. 5.42 Interfața grafică a programului <i>HistPlot</i>	95
Fig. 5.43 Cele trei tipuri de variație a deplasării în timp pentru amortizor afișate cu opțiunea <i>Plot</i>	95
Fig. 5.44 Suprapunere date experimentale cu buclă de histerezis teoretică Bouc-Wen în <i>HistPlot</i>	96
Fig. 5.45 Animație buclă histerezis (Bouc-Wen-UC) folosind opțiunea <i>Start</i>	97
Fig. 5.46 Interfața grafică a programului <i>ProConfig</i>	97
Fig. 5.47 Cele patru configurații de amplasare amortizorilor în <i>ProConfig</i>	98
Fig. 5.48 Variația multiplicatorului de cursă(stânga) și forță (dreapta) cu unghiurile θ_{01} și θ_{02}	98
Fig. 5.49 Variația multiplicatorilor maximi: de cursă și de forță orizontală, în funcție de unghiul θ_{01}	99
Fig. 5.50 Pozițiile configurației 3, pentru care multiplicatorul de forță orizontală are valorile cuprinse între $1,3 \div 1,4$ (stânga) și între $1,2 \div 1,5$ (dreapta)	99
Fig. 5.51 Pozițiile configurației 4, pentru care multiplicatorul de forță orizontală are valorile cuprinse între $1,2 \div 1,5$ (stânga) și între $2 \div 3$ (dreapta)	99

Fig. 5.52 Interfața programului <i>GenEcAm</i> cu datele introduse pentru o clădire P+10E cu sistem de amortizare ȘERB (reprezentat cu modelul Bouc-Wen-Exp)	100
Fig. 5.53 Fereastra output cu sistemul de ecuații diferențiale al clădirii P+10E cu sistem de amortizare ȘERB (modelat cu modelul Bouc-Wen-Exp)	101
Fig. 5.54 Aplicația <i>Simulink</i> creată pentru analiza la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB	102
Fig. 5.55 Interfața programului <i>ProAnim</i> – rezultate clădire P+10E cu trei variante de echipare	103
Fig. 5.56 Interfața programului <i>ProAnim</i> – opțiunea <i>Grafic unic</i> activată	104
Fig. 5.57 Interfața programului <i>ProAnim</i> – rezultate clădire P+10E cu trei variante de echipare (opțiunea <i>Drift</i>)	104
Fig. 5.58 Interfața programului <i>ProAnim</i> – opțiunea <i>Grafic unic</i> activată	105
Fig. 5.59 Prezentarea forțelor de amortizare - opțiunea <i>Grafic unic</i> activată	105
Fig. 6.1 Spectrele de răspuns elastice ale celor șapte accelerograme generate pentru $T_c = 0,7$ s [111]	111
Fig. 6.2 Spectrele de răspuns elastice ale celor șapte accelerograme generate pentru $T_c = 1$ s [111]	111
Fig. 6.3 Spectrele de răspuns elastice ale celor șapte accelerograme generate pentru $T_c = 1,6$ s [111]	111
Fig. 6.4 Primele trei moduri proprii de vibrație în <i>GenEcAm</i>	113
Fig. 6.5 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , $T_c = 0,7$ s	116
Fig. 6.6 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E $c = 10000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 17 și 18 ($T_c = 0.7$ s)	116
Fig. 6.7 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , pentru $T_c=0,7$ s	118
Fig. 6.8 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , pentru $T_c=1$ s	118
Fig. 6.9 Variația în timp a deplasării relative de nivel [m] la et. 3 al clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 01 și 02 ($T_c = 1$ s)	119
Fig. 6.10 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , pentru $T_c=1$ s	120
Fig. 6.11 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , $T_c = 1,6$ s	121
Fig. 6.12 Variația în timp a deplasării relative de nivel [m] la et. 3 al clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 05 și 11 ($T_c = 1,6$ s)	121
Fig. 6.13 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , pentru $T_c=1.6$ s	123
Fig. 6.14 Valoarea diferențelor medii între vitezele relative de nivel [mm/s] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , pentru $T_c=1,6$ s	124
Fig. 6.15 Valoarea diferențelor medii între accelerațiile relative [m/s ²] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , pentru $T_c=1.6$ s	125
Fig. 6.16 Forțe axiale maxime din amortizorii cu fluid vâcos pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($c = 10000$ kNs/m ²) pentru accelerogramele 02, 03, 04 ($T_c=1,6$ s)	126
Fig. 6.17 Variația în timp a forței axiale din amortizori la et. 3 al clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 03 și 04 ($T_c = 1.6$ s)	127
Fig. 6.18 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E (acc. 04 și 22, $T_c = 0,7$ s)	128

Fig. 6.19 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$ ($T_c=0,7 \text{ s}$)	128
Fig. 6.20 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c=0,7 \text{ s}$	129
Fig. 6.21 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$ (accelerogramele 02, 03, 06 pentru $T_c=1 \text{ s}$)	130
Fig. 6.22 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelerogramele 03 și 06 ($T_c = 1 \text{ s}$)	131
Fig. 6.23 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c=1 \text{ s}$	132
Fig. 6.24 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E (acc. 05 și 11, $T_c = 1,6 \text{ s}$)	133
Fig. 6.25 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$ (accelerogramele 05, 07, 11 pentru $T_c=1,6 \text{ s}$)	133
Fig. 6.26 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c=1,6 \text{ s}$	135
Fig. 6.27 Diferențe medii între vitezele relative de nivel [m/s] obținute cu cele două programe (cazul P+10E, $T_c=1,6 \text{ s}$)	136
Fig. 6.28 Valoarea diferențelor medii între accelerațiile relative [m/s^2] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c=1,6 \text{ s}$	137
Fig. 6.29 Forțe de amortizare maxime maxime în amortizorii cu fluid vâscos pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($c = 17000 \text{ kNs/m}^2$) pentru accelerogramele 01, 02, 03 ($T_c=1,6 \text{ s}$)	138
Fig. 6.30 Variația în timp a forței axiale din amortizori [kN] la et. 3 al clădirii P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelerogramele 02 și 03 ($T_c = 1,6 \text{ s}$)	139
Fig. 6.31 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E fără amortizori (accelerogramele 05, 07, 11 pentru $T_c=1,6 \text{ s}$)	140
Fig. 6.32 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E fără amortizori, pentru accelerogramele 05 și 11 ($T_c = 1,6 \text{ s}$)	140
Fig. 6.33 Diferențele medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+10E fără amortizori, pentru $T_c=1,6 \text{ s}$	141
Fig. 6.34 Diferența medie între rezultatele obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> pentru $T_c = 1,6 \text{ s}$	144
Fig. 7.1 Interfața <i>GenEcAm</i> – datele de intrare pentru modelarea analizei la seism a clădirii P+10E echipată cu amortizori ȘERB	147
Fig. 7.2 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori ȘERB - 2BW și 2BW-Exp (pentru $T_c=1,6 \text{ s}$)	148
Fig. 7.3 Aplicația ProAnim - Deplasări maxime la modelarea cu <i>GenEcAm</i> a comportamentului la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB modelați cu modelele teoretice BW și BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6 \text{ s}$)	149
Fig. 7.4 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E (modelare cu <i>GenEcAm</i>)	149
Fig. 7.5 Forțe axiale maxime din amortizorii ȘERB modelați cu BW clasic și cu BW-Exp, pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6 \text{ s}$)	150
Fig. 7.6 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu patru amortizori ȘERB pe nivel - 4BW și 4BW-Exp (pentru $T_c=1,6 \text{ s}$)	151
Fig. 7.7 Aplicația ProAnim - Deplasări maxime la modelarea cu <i>GenEcAm</i> a comportamentului la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB modelați cu modelele teoretice BW și BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6 \text{ s}$)	151
Fig.7.8 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E	152
Fig. 7.9 Forțe axiale maxime din amortizorii ȘERB (4BW și 4BW-Exp) pe fiecare etaj al	152

clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)	
Fig. 7.10 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori ȘERB - 2BW și 4BW ($T_c=1,6$ s)	154
Fig. 7.11 Aplicația <i>ProAnim</i> - Deplasări maxime la modelarea cu <i>GenEcAm</i> a comportamentului la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW (acc. 01, $T_c=1,6$ s)	154
Fig. 7.12 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E	154
Fig. 7.13 Forțe de amortizare maxime în amortizorii ȘERB (2BW și 4BW) pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)	155
Fig. 7.14 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori ȘERB - 2BW-Exp și 4BW-Exp ($T_c=1,6$ s)	156
Fig. 7.15 Aplicația <i>ProAnim</i> - Deplasări maxime la modelarea cu <i>GenEcAm</i> a comportamentului la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6$ s)	156
Fig. 7.16 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E	157
Fig. 7.17 Forțele axiale maxime din amortizorii ȘERB (2BW-Exp și 4BW-Exp) pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)	157
Fig. 7.18 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori cu fluid vâscos (FV) și amortizori ȘERB - 2BW-Exp ($T_c=1,6$ s)	158
Fig. 7.19 Aplicația <i>ProAnim</i> - Deplasări maxime - clădire P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâscos (FV) și amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6$ s)	158
Fig.7.20 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E	159
Fig. 7.21 Forțe axiale maxime din amortizorii cu fluid vâscos și amortizorii ȘERB - 2BW-Exp pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)	159
Fig. 7.22 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu doi amortizori cu fluid vâscos (FV) și patru amortizori ȘERB - 4BW-Exp ($T_c=1,6$ s)	160
Fig. 7.23 Aplicația <i>ProAnim</i> - Deplasări maxime - clădire P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâscos (FV) și amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6$ s)	161
Fig. 7.24 Variația deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E cu doi amortizori cu fluid vâscos pe nivel (FV) și patru amortizori ȘERB pe nivel (4BW-Exp), pentru accelerogramele 07 și 11 ($T_c = 1,6$ s)	161
Fig. 7.25 Forțele axiale maxime din amortizorii cu fluid vâscos (FV) și amortizorii ȘERB - 4BW-Exp pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)	162
Fig. 7.26 Buclele de histerezis pentru amortizorii ȘERB (BW-Exp) de la etajul 3 (acc. 01 și 11 - $T_c=1,6$ s)	162
Fig. 7.27 Buclele de histerezis pentru amortizorii cu fluid vâscos de la etajul 3 (acc. 01 și 11 - $T_c=1,6$ s)	163
Fig. 7.28 Comparatie bucle de histerezis pentru amortizorii ȘERB și cu fluid vâscos de la etajul 3 (acc. 01 - stanga și 11 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s)	163
Fig. 7.29 Energii absorbite pe nivel pentru amortizorii de la etajul 3: cu fluid vâscos (FV) și ȘERB modelați cu BW-Exp (acc. 04 - stanga, 07 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s)	163
Fig. 7.30 Energia de amortizare totală pentru sistemele de amortizare cu fluid vâscos (FV) și ȘERB modelați cu BW-Exp (acc. 01 - stanga, 07 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s)	163
Fig. 7.31 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori cu fluid vâscos – FV și amortizori ȘERB - 4BW-Exp ($T_c=1,6$ s și $a_g=0,3g$)	165
Fig. 7.32 Aplicația <i>ProAnim</i> - Deplasări maxime - clădire P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâscos (FV) și amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp (acc. 06, $T_c=1,6$ s și $a_g=0,3g$)	165

Fig. 7.33 Variația deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E cu amortizori cu fluid vâcos și ȘERB – 4BW-Exp, pentru accelerogramele 03 și 06 ($T_c = 1,6$ s și $a_g=0,3g$)	166
Fig. 7.34 Forțe axiale maxime din amortizorii cu fluid vâcos și amortizorii ȘERB - 4BW-Exp pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s și $a_g=0,3g$)	166
Fig. 7.35 Energiile absorbite de amortizorii de la etajul 3: cu fluid vâcos (FV) și ȘERB modelați cu BW-Exp (acc. 03 - stânga, 06 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s și $a_g=0,3g$)	167
Fig. 7.36 Energia totală absorbită pentru sistemele de amortizare cu fluid vâcos (FV) și ȘERB modelați cu BW-Exp (acc. 03 - stânga, 06 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s și $a_g=0,3g$)	167
Fig. 7.37 Comparație deplasări relative ale clădirii P+10E - cazul 1 și cazul 2 (accelerogramele 01 și 04)	169
Fig. 7.38 Comparație deplasări relative ale clădirii P+10E - cazul 1 și cazul 3 (accelerogramele 04 și 11)	170
Fig. 7.39 Comparație deplasări relative ale clădirii P+10E - cazul 2 și cazul 3 (acc. 04 și 11)	170
Fig. 7.40 Comparație bucle de histerezis - cazul 2 și cazul 3 (acc. 04 și 11)	171
Fig. 7.41 Comparație energie totală absorbită de amortizori - cazul 2 și cazul 3 (acc. 04 și 11)	171
Fig. A.1 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² (accelerogramele 01, 02, 22 pentru $T_c=0,7$ s)	192
Fig. A.2 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E (acc. 02 și 22, $T_c = 0,7$ s)	193
Fig. A.3 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+5E – $c = 2000$ kNs/m, pentru $T_c=0,7$ s	194
Fig. A.4 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² (accelerogramele 02, 03, 11 pentru $T_c=1$ s)	194
Fig. A.5 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 03 și 11 ($T_c = 1$ s)	195
Fig. A.6 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+5E – $c = 2000$ kNs/m, pentru $T_c=1$ s	196
Fig. A.7 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² (accelerogramele 04, 05, 11 pentru $T_c=1,6$ s)	196
Fig. A.8 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E (acc. 05 și 11, $T_c = 1,6$ s)	197
Fig. A.9 Diferențele medii între deplasările relative de nivel obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+5E – $c = 2000$ kNs/m, pentru $T_c = 1,6$ s	198
Fig. A.10 Valoarea diferențelor medii între vitezele relative de nivel obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+5E – $c = 2000$ kNs/m, pentru $T_c=1,6$ s	198
Fig. A.11 Valoarea diferențelor medii între accelerațiile relative obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² , pentru $T_c=1,6$ s	199
Fig. A.12 Forțe axiale maxime în amortizorii cu fluid vâcos (P+5E, $T_c=1,6$ s)	200
Fig. A.13 Variația în timp a forței axiale din amortizori la et. 2 al clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 04 și 11 ($T_c = 1,6$ s)	200
Fig. A.14 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² (accelerogramele 01, 02, 22 pentru $T_c=0,7$ s)	201
Fig. A.15 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E – $c=4000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 02 și 22 ($T_c = 0,7$ s)	201
Fig. A.16 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+5E – $c = 4000$ kNs/m, pentru $T_c=0,7$ s	202
Fig. A.17 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² (accelerogramele 02, 03, 11 pentru $T_c=1$ s)	203

Fig. A.18 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E – $c=4000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 03 și 11 ($T_c = 1$ s)	203
Fig. A.19 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+5E – $c = 4000$ kNs/m, pentru $T_c=1$ s	204
Fig. A.20 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² (accelerogramele 04, 05, 11 pentru $T_c=1,6$ s)	205
Fig. A.21 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 05 și 11 ($T_c = 1.6$ s)	205
Fig. A.22 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+5E – $c = 4000$ kNs/m, pentru $T_c=1,6$ s	206
Fig. A.23 Valoarea diferențelor medii între vitezele relative de nivel obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+5E – $c = 4000$ kNs/m, pentru $T_c=1,6$ s	207
Fig. A.24 Valoarea diferențelor medii între accelerațiile relative obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+5E – $c = 4000$ kNs/m, pentru $T_c=1,6$ s	208
Fig. A.25 Forțe de amortizare maxime [kN] în amortizorii cu fluid vâscos pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($c = 4000$ kNs/m ²) pentru accelerogramele 04, 05, 11 ($T_c=1,6$ s)	209
Fig. A.26 Variația în timp a forței de amortizare la et. 2 al clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² , pentru accelerogramele 04 și 11 ($T_c = 1,6$ s)	210
Fig. A.27 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E fără amortizori (accelerogramele 04, 05, 11 pentru $T_c=1,6$ s)	211
Fig. A.28 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> la clădirea P+5E fără amortizori, pentru $T_c=1,6$ s	212

Lista tabelor

Tab. 2.1 Parametrii pentru diferite tipuri de amortizori ȘERB-B1T*F _x -Δx [135]	15
Tab. 2.2 - Parametrii pentru diferite tipuri de amortizori ȘERB-B2T*F _x -Δx [135]	17
Tab. 2.3 Parametrii pentru diferite tipuri de amortizori telescopici ȘERB-TEL*F _x -Δx [135]	18
Tab. 2.4 - Parametrii pentru diferite tipuri de izolatori elastici cu amortizare ȘERB-B6I*F _z -Δxy [135]	23
Tab. 2.5 Parametrii pentru diferite tipuri de izolatori cu frecare ȘERB-B5I*F _z -Δxy [135]	24
Tab. 4.1 Rezultate numerice la analiza cu elemente finite a prototipului dispozitivului ȘERB C-194	40
Tab. 4.2 Rezultate numerice la analiza cu elemente finite a dispozitivului ȘERB TEL-150	48
Tab. 6.1 Rigidități de nivel pentru structura P+10E obținute cu <i>SAP2000</i>	112
Tab. 6.2 Rigidități de nivel pentru structura P+5E obținute cu <i>SAP2000</i>	113
Tab. 6.3 Vectorii proprii pentru structura P+10E	113
Tab. 6.4 Rezultatele analizei modale la structura P+10E	114
Tab. 6.5 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² ($T_c = 0,7$ s)	116
Tab. 6.6 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm], P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² ($T_c=0,7$ s)	117
Tab. 6.7 – Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² ($T_c = 1$ s)	118
Tab. 6.8 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] (P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , $T_c=1$ s)	119
Tab. 6.9 – Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² ($T_c = 1,6$ s)	121
Tab. 6.10 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] (P+10E – $c = 10000$	122

kNs/m ² , $T_c=1,6$ s)	
Tab. 6.11 Prelucrarea statistică a vitezelor relative de nivel [mm/s] (P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , $T_c=1,6$ s)	123
Tab. 6.12 Prelucrarea statistică a accelerațiilor relative [m/s ²] (P+10E – $c = 10000$ kNs/m ² , $T_c=1,6$ s)	124
Tab. 6.13 Forțele axiale maxime din amortizorii montați pe structura clădirii P+10E – $c = 10000$ kNs/m ²	126
Tab. 6.14 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 17000$ kNs/m ² ($T_c = 0,7$ s)	127
Tab. 6.15 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] (P+10E – $c = 17000$ kNs/m ² , $T_c=0,7$ s)	128
Tab. 6.16 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 17000$ kNs/m ² ($T_c = 1$ s)	130
Tab. 6.17 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] (P+10E – $c = 17000$ kNs/m ² , $T_c=1$ s)	131
Tab. 6.18 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 17000$ kNs/m ² ($T_c = 1,6$ s)	132
Tab. 6.19 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+10E – $c = 17000$ kNs/m ² , $T_c=1,6$ s)	134
Tab. 6.20 Prelucrarea statistică a vitezelor relative de nivel [mm/s], P+10E – $c = 17000$ kNs/m ² ($T_c=1,6$ s)	135
Tab. 6.21 Prelucrarea statistică a accelerațiilor relative [m/s ²], P+10E – $c = 17000$ kNs/m ² ($T_c=1,6$ s)	137
Tab. 6.22 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 17000$ kNs/m ²	138
Tab. 6.23 Date obținute pe structura clădirii P+10E fără amortizori	139
Tab. 6.24 - Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] (P+10E fără amortizori, $T_c=1,6$ s)	141
Tab. 6.25 Indicatori de variație medii pentru diferențele între rezultatele obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> (deplasări relative de nivel și forțe axiale din amortizori)	143
Tab. 6.26 Indicatori de variație medii pentru diferențele între rezultatele obținute cu <i>SAP2000</i> și <i>GenEcAm</i> (viteze relative de nivel și accelerații relative pentru $T_c = 1,6$ s)	143
Tab. 7.1 Rezultate clădire P+10E cu doi amortizori ȘERB pe etaj - BW clasic și BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)	148
Tab. 7.2 Rezultate clădire P+10E cu doi amortizori ȘERB pe etaj - BW clasic și BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)	150
Tab. 7.3 Rezultate - clădire P+10E cu 4 amortizori ȘERB pe etaj: 4BW clasic și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)	151
Tab. 7.4 Rezultate - clădire P+10E cu 4 amortizori ȘERB pe etaj: 4BW clasic și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)	152
Tab. 7.5 Comparație între diferențele medii la dublarea numărului de amortizori ȘERB	153
Tab. 7.6 Rezultate pe structura clădirii P+10E cu amortizori ȘERB -2BW și 4BW ($T_c = 1,6$ s)	153
Tab. 7.7 Rezultate pe structura clădirii P+10E cu amortizori ȘERB - 2BW și 4BW ($T_c = 1,6$ s)	155
Tab. 7.8 Rezultate pe structura clădirii P+10E cu amortizori ȘERB -2BW-Exp și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)	155
Tab. 7.9 Rezultate pe structura clădirii P+10E cu amortizori ȘERB -2BW-Exp și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)	157
Tab. 7.10 Rezultate - clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâscos (FV) și 2BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)	158
Tab. 7.11 Rezultate - clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâscos și 2BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)	159
Tab. 7.12 Rezultate - clădire P+10E cu doi amortizori cu fluid vâscos (FV) și 4BW-Exp ($T_c =$	160

1,6 s)	
Tab. 7.13 Rezultate - clădire P+10E cu doi amortizori cu fluid vâscos (FV) și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)	162
Tab. 7.14 Rezultate - clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâscos și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s și $a_g=0,3g$)	164
Tab. 7.15 Rezultate - clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâscos și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ și $a_g=0,3g$)	166
Tab. 7.16 Rezultate clădire P+10E izolată – a) fără amortizori și b) cu amortizori cu fluid vâscos (FV)	169
Tab. 7.17 Rezultate clădire P+10E izolată - cazul 1 (fără amortizori) și cazul 3 (cu amortizori ȘERB)	169
Tab. 7.18 Rezultate clădire P+10E izolată - amortizori cu fluid vâscos și amortizori ȘERB	170
Tab. 7.19 Rezultate clădire P+10E izolată - amortizori cu fluid vâscos (FV) și amortizori ȘERB	171
Tab. A.1 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² ($T_c = 0,7$ s)	192
Tab. A.2 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² , $T_c=0,7s$)	193
Tab. A.3 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² ($T_c = 1$ s)	194
Tab. A.4 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² , $T_c=1s$)	195
Tab. A.5 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² ($T_c = 1,6$ s)	196
Tab. A.6 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² , $T_c=1,6s$)	197
Tab. A.7 Prelucrarea statistică a vitezelor relative de nivel (P+5E – $c = 2000$ kNs/m ² , $T_c=1,6s$)	198
Tab. A.8 Prelucrarea statistică a accelerațiilor relative (P+10E – $c = 2000$ kNs/m ² , $T_c=1,6s$)	199
Tab. A.9 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m ²	200
Tab. A.10 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² ($T_c = 0,7$ s)	201
Tab. A.11 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² , $T_c=0,7s$)	202
Tab. A.12 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² ($T_c = 1$ s)	203
Tab. A.13 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² , $T_c=1s$)	204
Tab. A.14 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² ($T_c = 1,6$ s)	205
Tab. A.15 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² , $T_c=1,6s$)	206
Tab. A.16 Prelucrarea statistică a vitezelor relative de nivel (P+5E – $c = 4000$ kNs/m ² , $T_c=1,6s$)	207
Tab. A.17 Prelucrarea statistică a accelerațiilor relative (P+10E – $c = 4000$ kNs/m ² , $T_c=1,6s$)	208
Tab. A.18 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m ²	209
Tab. A.19 Date obținute pe structura clădirii P+5E fără amortizori	210
Tab. A.20 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E fără amortizori, $T_c=1,6s$)	211

Lista principalelor simboluri

Litere latine mici

a raportul între rigiditatea post-fluaj și rigiditatea elastică (înainte de fluaj)

a_g	acelerația terenului pentru proiectare (pentru componenta orizontală a mișcării terenului)
c	constanta de amortizare
k	rigiditatea elastică
m_i	masele concentrate corespunzătoare fiecărui nivel, $i = 1, n$
n	numărul de niveluri ale structurii
u	deplasarea terenului
\ddot{u}	acelerația terenului
x_i	deplasările relative ale maselor pe direcția gradelor de libertate,
x_m	factor de scalare a cursei amortizorului în cazul buclelor de histerezis definite adimensional (modelul Bouc-Wen)
x_{ri}	deplasările relative de nivel la nivelul i , $i = 1, n$
z	forța axială din amortizor
z_{Ai}	forța axială totală din amortizorul montat la nivelul i , $i = 1, n$

Litere latine mari

A	parametru adimensional care controlează comportamentul modelului histeretic Bouc-Wen
$[C]$	matricea de amortizare
E_A	energia disipată prin amortizare structurală
E_H	energia disipată prin dispozitivele histeretice
E_S	energia seismică transmisă structurii
F_i	suma proiecțiilor pe orizontală a forțelor de amortizare histeretică corespunzătoare dispozitivelor de disipare a energiei seismice montate pe nivelul respectiv, $i = 1, n$
$\{F_H\}$	vectorul forțelor histeretice
F_m	factor de scalare a forței de amortizare în cazul buclelor de histerezis definite adimensional (modelul Bouc-Wen)
H	energia histeretică disipată
$[K]$	matricea de rigiditate
K_0	rigiditatea inițială totală
K_{el}	rigiditatea elastică a componentei elastice a amortizorului
K_h	rigiditatea histeretică
$[M]$	matricea maselor
N	exponent care controlează tranziția de la domeniul elastic la domeniul elasto-plastic
P_A	puterea disipată prin amortizare structurală
P_H	puterea histeretică disipată prin sistemul de echipare antiseismică a clădirii
P_{ST}	puterea seismică totală transmisă structurii
R_k	factorul de relaxare a rigidității (Stiffness degradation)

R_k^{trial}	factorul de relaxare a rigidității
T_c	perioada de control (colț) ale spectrului de răspuns elastic pentru componenta orizontală a accelerației terenului
$\{X_a\}$	vectorul deplasărilor absolute x_{ai}
$\{\dot{X}_a\}$	vectorul vitezelor absolute \dot{x}_{ai}
$\{\ddot{X}_a\}$	vectorul accelerațiilor absolute \ddot{x}_{ai}
$\{X\}$	vectorul deplasări relative x_i
$\{\dot{X}\}$	vectorul vitezelor relative \dot{x}_i
$\{\ddot{X}\}$	vectorul accelerațiilor relative \ddot{x}_i

Litere grecești

α_v	exponentul vitezei
β	parametru adimensional care controlează comportamentul modelului histeretic Bouc-Wen
β_i	fracțiunea amortizării critice
γ	parametru adimensional care controlează comportamentul modelului histeretic Bouc-Wen
μ_{F_i}	coeficient de multiplicare a forței de amortizare specifică configurației de amplasare a amortizorului
μ_{x_i}	coeficient de multiplicare a cursei amortizorului specifică configurației de amplasare a amortizorului
ω_i	pulsăția locală a nivelului i
ξ	deplasarea axială din amortizor
$\dot{\xi}(t)$	viteza relativă pe direcția axială între capetele amortizorului

Lista abrevierilor

A.S.	amortizare seismică
BRB	amortizor de tip contravântuire cu flambaj împiedicat
BW	amortizori ȘERB modelați cu modelul Bouc-Wen clasic
BW-Exp	amortizori ȘERB modelați cu modelul Bouc-Wen modificat
CETAL	Centrul de Tehnologii Avansate cu Laser, București-Măgurele
CITON	Centrul de Inginerie și Tehnologie Obiective Nucleare, București-Măgurele
CSS	dispozitiv cu alunecare pe suprafață curbă
ED	sistem de disipare a energiei
EPD	amortizor elasto-plastici
FPS	izolator tip pendul cu frecare
FV	amortizori cu fluid vâcos

HDRB	izolator de cauciuc natural cu amortizare ridicată
ICECON	Institutul de Cercetări pentru Echipamente și Tehnologii în Construcții, București
IMSAR	Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române
I.S.	izolare seismică
LDRB	izolator de cauciuc lamelar cu amortizare scăzută
LRB	izolator de cauciuc lamelar cu miez de plumb
M.E.F.	metoda elementelor finite
NB	izolator de neopren
OSIM	Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci
PGA	valoarea de vârf a accelerației terenului
RB	izolator de cauciuc
SEP	rezeme elastomerice
SIP	izolator tip pendul cu alunecare
SITON	Sucursala de Inginerie Tehnologică pentru Obiective Nucleare, București
SLS	starea limită de serviciu
STU	dispozitiv de transmitere a șocurilor
TMD	amortizor cu masă adăugată
ULS	starea limită ultimă
VD	amortizor cu fluid vâscos
VED	amortizor vâsco-elastic

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

1.1 Importanța și oportunitatea cercetării

Cutremurele de pământ reprezintă unul din principalele fenomene naturale care produc catastrofe cu efecte dezastruase atât asupra vieții oamenilor, cât și asupra mediului construit și a economiei țărilor afectate. De la începutul secolului 21 și până în prezent, cutremurele au provocat, la nivel mondial, moartea a peste 900.000 de persoane, distrugerea a peste 500.000 de clădiri, numărul persoanelor rănite și a clădirilor avariate fiind mult mai mare [158].

România este caracterizată de seismicitate intensă în zona epicentrală Vrancea, având și alte epicentre cu seismicitate moderată. În consecință, proiectarea de structuri rezistente la mișcările seismice reprezintă un obiectiv principal în ingineria structurală atât la nivel mondial, în țările cu seismicitate ridicată, cât și la noi în țară.

Variantele de echipare antiseismică a structurilor implică folosirea de izolatori seismici sau amortizori seismici, care sunt aplicați pe o scară din ce în ce mai largă în Japonia, China, Rusia, Italia, SUA, ca și în alte țări. Aplicațiile acestor echipări antiseismice la clădiri prezintă deja din ce în ce mai mult interes și în colectivele de cercetare din România, principalul inconvenient fiind costul ridicat al acestor dispozitive, dar și lipsa reglementărilor specifice proiectării construcțiilor echipate antiseismic.

La nivel mondial, interesul dezvoltării de noi sisteme de protecție antiseismică, precum și de optimizare a celor existente este din ce în ce mai mare, iar în România aceasta se evidențiază prin inițierea de studii în cadrul unor proiecte naționale de cercetare, a multor teze de doctorat în domeniu și brevetarea unor dispozitive specifice pentru condițiile seismice autohtone.

Studiile realizate în România au urmărit să găsească soluții noi și îmbunătățite de protecție la seism a clădirilor. Astfel, au fost inventate și produse noi dispozitive de protecție antiseismică, denumite dispozitive ȘERB după numele inventatorului lor dr. ing. Viorel Șerban, care au fost brevetate și omologate. Acestea au fost deja aplicate la protecția antiseismică a unei clădiri și a unor platforme de testare din beton armat. Din cauza numărului mare de elemente componente elastice aflate în contact cu frecare, funcționarea lor nu a putut fi modelată analitic, ci doar aproximată cu modelul matematic de histerezis Bouc-Wen [114], forma și dimensiunile elementelor componente fiind determinate, până în prezent, prin încercări experimentale succesive [130]. Cele două bucle de histerezis specifice amortizorilor ȘERB pentru suprastructură și amortizorilor ȘERB pentru fundație au forme diferite față de cele corespunzătoare modelelor clasice de histerezis [130], fiind dificilă abordarea lor cu programele clasice de calcul ale structurilor cu metoda elementului finit.

Deoarece amortizorii ȘERB au un preț de cost și de montaj de cel puțin două ori mai mic decât al amortizorilor cu fluid vâcos folosiți preponderent la ora actuală, ei pot reprezenta o alternativă economică autohtonă de protecție la seism a clădirilor. De aceea, am considerat necesară realizarea unui instrument de proiectare care să permită evaluarea performanțelor antiseismice ale acestora, prin comparație cu performanțele amortizorilor uzual folosiți la protecția antiseismică a clădirilor.

1.2 Obiectivele cercetării

Obiectivul principal al tezei ”*Contribuții privind proiectarea antiseismică a structurilor de construcții prevăzute cu dispozitive de amortizare a vibrațiilor*” îl reprezintă realizarea unui model analitic-computațional implementat software care să permită alegerea adecvată a sistemului de protecție antiseismică prin evaluarea comparativă a performanțelor diferitelor sisteme de protecție la seism, inclusiv a sistemului cu amortizori ȘERB, pentru o anumită clădire. Pentru aceasta teza își propune:

- determinarea experimentală a caracteristicilor de histerezis pentru ultimele variante îmbunătățite a două tipuri de amortizori românești ȘERB;
- modelarea comportamentului la seism a celor două tipuri de amortizori ȘERB folosind modele 3D cu elemente finite în ANSYS, în vederea obținerii buclelor de histerezis numerice;
- elaborarea unor modele matematice de histerezis îmbunătățite pentru modelarea caracteristicilor histeretice ale celor două tipuri de amortizori ȘERB;
- realizarea unui model analitic pentru structuri multietajate echipate cu amortizori sau cu izolatori seismici, care să permită evaluarea comparativă a performanțelor antiseismice ale diferitelor sisteme de protecție antiseismică pentru clădirea analizată;
- realizarea unui set de aplicații software care să implementeze computațional modelul analitic al structurilor echipate antiseismic, în vederea evaluării rapide, comparative, a comportamentului la seism al clădirii echipate cu diverse sisteme de protecție antiseismică;
- evidențierea performanțelor antiseismice ale amortizorilor ȘERB prin compararea acestora cu cele specifice sistemelor clasice de protecție.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Prezenta teză este structurată în opt capitole astfel:

Cap. 1 – “Introducere” - prezintă importanța, justificarea și oportunitatea temei de cercetare alese precum și obiectivele propuse pentru rezolvare în cadrul cercetării, ca prim obiectiv fiind elaborarea unui model analitic-computațional implementat software care să permită evaluarea comparativă a performanțelor diferitelor sisteme de protecție la seism, inclusiv a sistemului cu amortizori ȘERB. Se prezintă pe scurt conținutul și metodologia tezei.

Cap. 2 – “Tipuri de dispozitive utilizate la protecția antiseismică a clădirilor” – prezintă principalele tipuri de dispozitive folosite la suprastructură sau în fundație, pentru protecția antiseismică a clădirilor, precum și câteva aplicații ale acestora. Sunt prezentate și dispozitivele românești ȘERB, precum și aplicațiile acestor sisteme în România.

Cap. 3 – “Contribuții privind determinarea experimentală a buclelor de histerezis specifice amortizorilor ȘERB” – prezintă studiile experimentale pe care le-am realizat în scopul determinării caracteristicii de histerezis ale celor două tipuri de amortizori ȘERB: pentru suprastructură și pentru fundație, realizate la ICECON București și respectiv la IMSAR București. S-au analizat variantele noi ale acestor amortizori.

Cap. 4 – “Contribuții privind simularea cu M.E.F. a amortizorilor ȘERB” – prezintă două modele 3D cu elemente finite realizate în ANSYS care permit modelarea comportamentului la seism a celor două tipuri de amortizori ȘERB. Modelele realizate permit determinarea curbelor de histerezis numerice. De asemenea se prezintă și influența anumitor parametrii geometrice asupra formei și dimensiunilor buclelor histeretice. Cele două modele cu elemente finite au fost

validate prin compararea caracteristicii de histerezis obținută numeric cu cea obținută experimental.

Cap. 5 – “Contribuții privind modelarea structurilor echipate antiseismic” – prezintă un model analitic-computațional implementat software pe care l-am realizat pentru analiza liniară la seism a structurilor multietajate echipate antiseismic. Acest model conține:

- modelele matematice de histerezis: Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener, Coulomb, amortizare vâscoasă, Bouc-Wen clasic, Bouc-Wen_UC, Bouc-Wen Papion, Bouc-Wen_Strength și Bouc-Wen_Exp, ultimele două fiind modele noi pe care le-am conceput în vederea unei mai bune aproximări a comportamentului amortizorilor ȘERB;
- modelul analitic pentru analiza liniară la seism a structurilor multietajate echipate antiseismic pe care l-am conceput astfel încât să permită specificarea expresiei forței axiale din amortizori, atât sub formă algebrică, cât și sub formă diferențială. Astfel, am creat facilitatea de a putea integra în modelul analitic, o mare parte din modelele matematice de histerezis folosite la ora actuală;
- implementarea software a modelului numeric, pe care am realizat-o prin elaborarea unui set de patru aplicații software (*HistPlot*, *ProConfig*, *GenEcAm* și *ProAnim*), care constituie un instrument util în proiectarea rațională a sistemelor de protecție antiseismică pentru clădirea analizată. Programul *HistPlot* permite alegerea parametrilor pentru 11 modele matematice de histerezis în funcție de forma și dimensiunile buclei histeretice. Programul *ProConfig* permite alegerea uneia din patru configurații de amplasare a amortizorilor determinând automat factorii de amplificare ai cursei și forței axiale din amortizori. Acestea sunt transmise mai departe programului *GenEcAm* care assemblează sistemul de ecuații al structurii în funcție de modelele de histerezis alese de utilizator. Sistemul de ecuații este transferat automat într-o aplicație pe care am realizat-o în *Simulink* pentru soluționarea acestuia. Programul *ProAnim* realizează postprocesarea rezultatelor obținute cu *GenEcAm* prezentând grafic și sub forma de animații mișcarea structurii în timpul acțiunii seismice. De asemenea se prezintă toate facilitățile acestor aplicații software, precum și modul de lucru cu acestea în vederea realizării studiului de proiectare rațională a sistemului de protecție la seism.

Cap. 6 – “Contribuții privind validarea modelării structurilor echipate antiseismic” – prezintă procesul de comparare a rezultatelor obținute pe o structură în cadre de beton armat cu 11 niveluri, analizată la seism cu programele *GenEcAm* și *SAP2000*. Același proces a fost parcurs și pentru o structură cu șase niveluri, iar rezultatele sunt prezentate în Anexa A. Compararea rezultatelor s-a realizat atât pentru cazul clădirilor neechipate, cât și pentru cazul echipării clădirilor cu amortizori cu fluid vâscos. Au fost comparate deplasările și vitezele relative de nivel, accelerațiile relative, precum și forțele axiale din amortizori. De asemenea sunt prezentate prelucrările statistice ale diferențelor dintre cele două programe, care evidențiază apropierea foarte mare dintre cele două seturi de rezultate, validându-se astfel modelul analitic-computațional propus.

Cap. 7 – “Contribuții privind evaluarea performanțelor antiseismice a sistemelor de protecție la seism cu amortizori ȘERB” – prezintă rezultatele obținute cu cele patru aplicații software realizate de autor pentru o structură cu 11 niveluri analizată la seism în două cazuri de echipare antiseismică: sistemul cu amortizori cu fluid vâscos și sistemul cu amortizori ȘERB. Se prezintă rezultatele obținute în cele două situații de protecție antiseismică: amortizori montați la suprastructură și amortizori montați în fundație în paralel cu sistemul de izolare seismică. De asemenea sunt prezentate comparațiile între rezultatele obținute folosind pentru aproximarea

caracteristicii histeretice a amortizorilor ȘERB cele două modele matematice: modelul Bouc-Wen clasic și modelul Bouc-Wen_Exp propus de autor. Se prezintă și situația în care sunt folosiți un număr dublu de amortizori ȘERB la suprastructură. În finalul fiecărui studiu comparativ sunt prezentate diferențele procentuale între parametrii analizați: deplasări și viteze relative de nivel maximale, accelerații relative maxime, valorile maxime ale forțelor axiale și energiilor absorbite în amortizor. Finalul capitolului prezintă concluziile studiilor comparative care evidențiază viabilitatea celor două sisteme de amortizori ȘERB (pentru suprastructură și pentru fundație) datorită performanțelor de protecție antiseismică apropiate de cele ale sistemelor clasice, având avantajul unui preț de cost de cel puțin două ori mai mic.

Cap. 8 – “Concluzii, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare” – prezintă în sinteză concluziile care se desprind în urma studiilor efectuate, evidențiind îndeplinirea obiectivelor propuse în ceea ce privește modelarea structurilor echipate antiseismic care să permită evaluarea comparativă a performanțelor diferitelor sisteme de amortizare, inclusiv a sistemului de amortizare ȘERB. De asemenea sunt enumerate contribuțiile teoretice, software, numerice și aplicative aduse de autor în procesul de cercetare. În finalul capitolului sunt propuse direcții viitoare de cercetare, care implică extinderea studiilor pentru abordarea altor modele matematice de histerezis, îmbunătățirea performanțelor amortizorilor ȘERB și realizarea de analize neliniare la seism prin adaptarea aplicației *GenEcAm*.

În anexe sunt prezentate o parte din tabelele și graficele cu rezultate obținute în *GenEcAm* și *SAP2000*, în procesul de validare a aplicației software *GenEcAm*, obținute pe o structură în cadre de beton armat cu șase niveluri analizată la seism. Anexele prezintă și selecții din codurile sursă în *Embarcadero DELPHI XE3* ale celor patru aplicații software pe care le-am realizat în cadrul acestui studiu.

O parte din rezultatele cercetării au fost diseminate în lucrări științifice astfel: 13 lucrări publicate în reviste de specialitate din țară și străinătate, indexate în baze de date internaționale și 10 lucrări publicate în volumele unor conferințe internaționale din care patru sunt indexate în baze de date internaționale.

CAPITOLUL 2

TIPURI DE DISPOZITIVE UTILIZATE LA PROTECȚIA ANTISEISMICĂ A CLĂDIRILOR

În acest capitol sunt prezentate principalele tipuri de dispozitive folosite la ora actuală în cadrul sistemelor de protecție antiseismică. Sunt evidențiate principiile de funcționare, principalele caracteristici și buclele de histerezis corespondente, precum și câteva aplicații ale acestora.

Există patru categorii de control al comportării structurilor echipate antiseismic: pasiv, activ, semiactiv și hibrid.

Controlul pasiv este realizat prin folosirea unor dispozitive “pasive”, care sunt activate prin mișcarea produsă de seism, neavând nevoie de surse exterioare de alimentare cu energie pentru a funcționa. Se cunosc trei tipuri de sisteme pasive de protecție antiseismică:

- sisteme cu amortizori seismici montați la suprastructură;
- sisteme cu izolatori seismici montați în fundație;
- sisteme cu amortizori seismici montați în fundație în paralel cu izolatorii seismici.

În continuare sunt prezentate principalele tipuri de dispozitive de protecție antiseismică.

2.1 Tipuri de amortizori seismici

Aceste tipuri de dispozitive au rolul de a disipa energia seismică indusă clădirii prin diferite procese histeretice. În funcție de tipul procesului histeretic care le caracterizează, aceste dispozitive se clasifică în:

- amortizori vâscoelastici;
- amortizori cu fluid vâscos;
- bare disipative cu flambaj împiedicat;
- amortizori metalici cu ductilitate mare;
- amortizori cu frecare.

Suplimentar, în acest subcapitol sunt prezentați și amortizorii românești ȘERB care se pot încadra în categoria amortizorilor cu frecare.

2.1.1 Amortizori vâscoelastici

Acești amortizori contribuie la disiparea energiei seismice prin deformațiile de forfecare ale unor materiale vâscoelastice (polimeri, cauciuc, etc.). Aceste materiale au un comportament combinat de solid elastic și lichid vâscos.

Un astfel de amortizor este format dintr-un strat de material vâscoelastic vulcanizat pe plăci de oțel (fig. 2.1). În timpul seismului se produce o mișcare relativă între plăcile exterioare și placa centrală apărând astfel deformații de forfecare ale materialului vâscoelastic care au loc cu disipare de energie seismică. Forțele de amortizare care apar în acești amortizori sunt dependente de viteză [100]. Buclele histeretice pot fi modelate cu ajutorul modelului matematic clasic de histerezis Kelvin-Voigt.

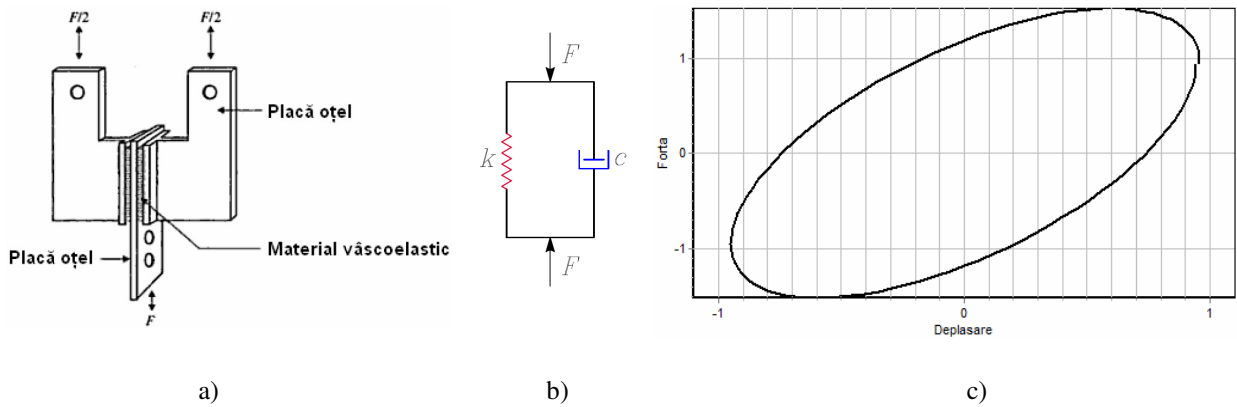


Fig. 2.1 Amortizor vâscoelastic: a) alcătuire [100]; b) model mecanic; c) bucla de histerezis

Ca avantaje se pot aminti: fiabilitate ridicată, comportament reologic stabil, rezistență la agenții poluanți, iar ca și dezavantaje: forțe de amortizare reduse și sensibilitate la variații ale temperaturii [100].

Un exemplu de utilizare a amortizorilor vâscoelastici îl reprezintă clădirea Bank of America, din Seattle (S.U.A.) edificată în anul 1982 având 76 de niveluri (fig.2.2). În acest caz, pentru reducerea vibrațiilor provocate de vânt, s-au folosit 260 de amortizori vâscoelastici [100].



Fig. 2.2 Bank of America: (a) vedere; (b) amortizor vâscoelastic [100]

2.1.2 Amortizori cu fluid vâscos

Acești amortizori constituie, datorită performanțelor ridicate, una dintre cele mai moderne metode de protecție la seism. Aceștia funcționează pe principiul rezistenței apărute la deplasarea unui piston perforat într-un cilindru metalic în care se găsește un fluid vâscos, absorbând astfel, șocurile (fig. 2.3).

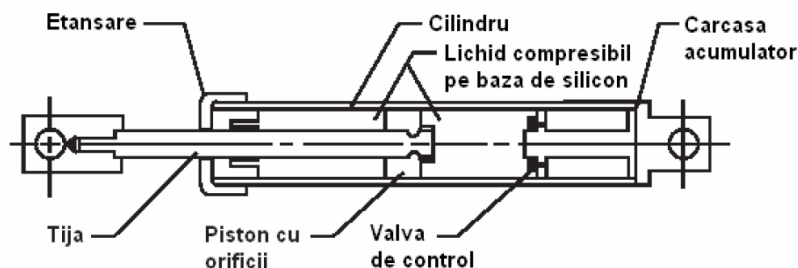


Fig. 2.3 Schema de principiu a unui amortizor cu fluid vâscos [100]

Fluidul este, de obicei, un ulei siliconic de vâscozitate ridicată care este stabil termic și netoxic [100]. La ambele capete, acești amortizori au prevăzute articulații sferice pentru a putea fi menținută încărcarea axială pe direcția axei amortizorului. Astfel, este prevenită încovoierea tijei pistonului care este, de aceea, realizată din oțel de înaltă rezistență.

Amortizorul este alcătuit dintr-un cilindru cu ulei siliconic, prevăzut cu o cameră de acumulare a fluidului, în care se deplasează un piston cu orificii. Forța de amortizare dezvoltată la deplasarea pistonului este dată de diferența de presiune pe fețele pistonului, care poate fi ajustată prin modificarea diametrului orificiilor de pe capul pistonului.

Amortizorul cu fluid vâscos este un dispozitiv care disipă energia prin dezvoltarea unei forțe de reacțiune care apare la deplasarea pistonului prin fluidul interior. Această forță de reacțiune reprezintă forța de amortizare și este în sens invers deplasării capetelor dispozitivului. Valoarea forței de amortizare este direct proporțională cu viteza de deplasare a pistonului amortizorului.

În acest caz, disiparea energiei seismice se produce prin transformarea acesteia în căldură, fiind transferată în mediul înconjurător prin convecție și radiație (fig. 2.3).

Acești amortizori nu necesită întreținere, nefiind necesare rezervoare de ulei, conducte de presiune, indicatoare de nivel, acumulatori exteriori. Fluidul intern nu se schimbă în perioada de serviciu [154].

Forța axială dintr-un amortizor cu fluid vâscos este dată de relația [8]:

$$F = c \cdot \dot{x}^{\alpha_v} \quad (2.1)$$

unde: c - constanta de amortizare;

\dot{x} - viteza relativă pe direcția axială între capetele amortizorului;

α_v - constantă exponențială, cu valori cuprinse între 0,1 și 1, în funcție de dimensiunile găurilor pistonului. Când $\alpha_v = 1$ se consideră amortizare liniară (amortizor liniar), în timp ce pentru $\alpha_v \neq 1$ amortizarea este neliniară (amortizor neliniar).

Avantajul acestor amortizori este că reduc simultan atât deplasările structurii, cât și tensiunile interne [100]. Aceasta se datorează faptului că forța axială din amortizor depinde numai de viteza de deplasare a structurii, fiind defazată de tensiunile produse prin deformarea acesteia.

Dezavantajul principal îl reprezintă prețul de cost ridicat, precum și necesitatea realizării unor curse mari pentru a determina o amortizare eficientă.



Fig. 2.4 Clădirea Torre Mayor, Mexico City [89]

Un exemplu de utilizare a amortizorilor seismici cu fluid vâscos îl reprezintă turnul zgârie-nori Torre Mayor din Mexico City, Mexic. Cu o înălțime de 225 metri și 55 de etaje, Torre Mayor este cea mai înaltă clădire din America Latină. Lucrările de construcție au început în 1999 și au fost finalizate în 2003. Această clădire își dispută titlul de cea mai sigură construcție (din punct de vedere seismic) din lume cu US Bank Tower din Los Angeles, California. Cu cei 96 de amortizori seismici instalați în structură, clădirea Torre Mayor este proiectată să suporte un cutremur cu magnitudinea de 8,50 pe scara Richter (fig. 2.4) [89, 93].

Clădirea Torre Mayor a primit mai multe premii ale American Construction Industry și a fost desemnată una dintre cele patru finaliste pentru U.S. Civil Engineer Research Foundation's 2003 Charles J. Pankow Award for Innovation [89].

În țara noastră, în componența sistemelor de protecție la seism, s-au utilizat în principal, amortizori cu fluid vâscos fabricați de firme din SUA și Italia, dar și izolatori și amortizori seismici inventați, brevetați și fabricați în România.

Amortizori cu fluid vâscos s-au folosit pentru protecția seismică a sediului Agenției Naționale de Mediu, precum și pentru consolidarea clădirii de locuit multietajate din București, Șoseaua Mihai Bravu nr. 90-96, prin proiecte realizate de prof. dr. ing. Radu Văcăreanu de la Universitatea Tehnică de Construcții din București [100].

În anul 2008, s-a aplicat pentru prima dată la noi în țară „Metoda izolării bazei” în vederea protecției antiseismice a sediului Facultății de Management din cadrul Academiei de Științe Economice din București din Calea Griviței nr. 2-2A (fig. 2.5) [62, 64].



Fig. 2.5 Sediul Facultății de Management din cadrul Academiei de Științe Economice (stânga), Amortizor seismic Taylor Devices SUA montat în fundație (dreapta) [62, 64]

În final, s-a optat pentru utilizarea a 79 de reazeme elastomerice SEP – SUA, cu dimensiuni de $\varnothing 700\text{mm} \times 400\text{mm}$, capabile de a asigura deplasări laterale de 600mm, precum și a 18 amortizori seismici Taylor Devices SUA care pot dezvolta o forță maximă de 1500 kN, cursa lor fiind de $\pm 500\text{mm}$. Reducerea eforturilor este de aproximativ trei ori pentru toate direcțiile de acțiune seismică. Distribuția deplasărilor relative de nivel arată o mișcare generală de solid-rigid, cu o deplasare generală la nivelul interfeței izolate de 15cm pe direcția paralelă cu Calea Griviței, respectiv de 20cm pentru direcția de acțiune seismică perpendiculară pe Calea Griviței, în condițiile montării de dispozitive mecanice cu rol de disipare energetică – amortizori seismici.

În prezent, comportarea acestei clădiri este monitorizată seismic de Centrul pentru Fizica Pământului de la Măgurele.

Metoda izolării bazei constă în folosirea izolatoarelor și amortizorilor seismici, astfel încât clădirea este decuplată de efectul macroseismic al undelor seismice distructive [66]. Ca noutate

În acest caz, este de reținut faptul că, pentru a supraveghea modul de comportare al clădirii, aceasta a fost echipată de către Institutul Național de Cercetare Dezvoltare pentru Fizica Pământului (INCDFP), cu doi senzori seismici triaxiali (accelerometri de tipul EpiSensor de 2g) și un înregistrator seismic digital de tipul K2 cu șase canale. Senzorii seismici au fost instalați de o parte și de cealaltă a unui atenuator seismic astfel încât unul să fie în cuplaj acustic cu solul de sub clădire iar celălalt, în cuplaj acustic cu structura clădirii [66].

Analizând valorile înregistrate cu ocazia diferitelor seisme s-a constatat că amplitudinea semnalului care provine de la accelerometrul instalat pe structura clădirii este mai mică în comparație cu cea a semnalului care provine de la accelerometrul instalat în cuplaj cu solul de sub clădire.

Măsurătorile la care ne referim au fost efectuate într-o perioadă de peste 3 ani, perioadă în care au avut loc numeroase cutremure, cu magnitudinea între 4 și 6 grade pe scara Richter. Reducerea amplitudinilor măsurate la structura clădirii a fost între două și de trei ori, ceea ce dovedește eficiența instalării amortizorilor seismici la clădirile pe care dorim să le protejăm la seism [66]. Proiectarea și supravegherea execuției lucrărilor au fost coordonate de dr. ing. Eugeniu Iordăchescu – director general PROESCOM S.R.L.

În anul 2008, s-a realizat consolidarea clădirilor Complexului Sportiv al Academiei de Studii Economice din București [63].

Prin Expertiza Tehnică elaborată de către SC PROESCOM S.R.L. și E.B.C. S.R.L. în vederea supra-etajării Complexului Sportiv al Academiei de Studii Economice din București s-a constatat o creștere a perioadelor proprii de vibrație cu 20% - 26%, respectiv deplasărilor relative de nivel cu aproximativ 25% - 30% , în condițiile creșterii valorilor momentelor încovoietoare în elementele de beton armat cu până la 18% - 25%. Pentru reducerea acestor efecte s-a propus montarea de amortizori seismici, pe traseele unor compartimentări existente, astfel încât răspunsul structural să fie îmbunătățit. Pentru aceasta, s-au folosit șase amortizori cu fluid vâscos cu forța maximă de 300 kN și cursa maximă ± 75 mm [63].

În anul 2009, s-a finalizat Proiectul Mihai Eminescu pentru consolidarea clădirii monument istoric a Academiei de Științe Economice din București. Pentru disiparea energiei seismice s-au fost folosiți în total 142 de amortizori cu fluid vâscos furnizați de firma Taylor Devices USA, dispuși în configurația de tip contravântuire, capabili să dezvolte forțe de amortizare de 1000 kN și 100 kN, cu deplasări până la 100 mm [159].

În cazul clădirii Primăriei București (2010-2015), sistemul de protecție antiseismic s-a realizat prin introducerea unui număr de 36 de amortizori seismici și a 262 izolatori seismici (fig. 2.6) [154].



Fig. 2.6 Izolatori și amortizori seismici montați în fundația clădirii Primăriei București [154]

Izolatorii seismici au fost furnizați de firma Freyssinet, partener al fimei producătoare de dispozitive de disipare a energiei seismice ALGA Italia, și au următoarele caracteristici:

- reazem tip 1 cu dimensiunile 1.010 mm x 558 mm;
 - înălțime totală cauciuc 41 straturi x 8,0 mm = 328 mm;
 - înălțime totală oțel 50 straturi x 3,0 mm = 150 mm;
 - factor de formă $S = 31,25$;
 - încărcare maximă orizontală: 710 kN;
- reazem tip 2 cu dimensiunile 1.050 mm x 558 mm;
 - înălțime totală cauciuc 41 straturi x 8,0 mm = 328 mm;
 - înălțime totală oțel 50 straturi x 3,0 mm = 150 mm;
 - factor de formă $S = 32,50$;
 - încărcare maximă orizontală: 767 kN.

Amortizorii cu fluid vâcos sunt concepuți astfel încât să nu necesite întreținere. Fluidul intern nu se schimbă în perioada de serviciu. Caracteristicile amortizorilor furnizați de firma Freyssinet pentru acest proiect sunt: capacitate de 1.750 kN sarcină nominală și o cursă de 1.400 mm (± 700 mm), rezultând un aparat cu diametrul de 364 mm și o lungime în poziție normală de 6.090 mm (inclusiv conectorii) [154].

În anul 2014 au început lucrările de consolidare a Arcului de Triumf (monumentul are o înălțime de 27 de metri) din București, folosindu-se izolatori seismici și amortizori seismici [160]. Procedul a constat în decuplarea structurii de vibrațiile terenului prin metoda izolării bazei și introducerea unei structuri flexibile compuse din peste 200 de tampoane de oțel și cauciuc. În plus, s-au montat șase amortizori cu fluid vâcos. În prezent, lucrările sunt în curs de finalizare.

2.1.3 Bare disipative cu flambaj împiedicat

Barele disipative cu flambaj împiedicat (Buckling Restrained Braces – BRB) sunt realizate dintr-un miez de oțel ductil și un sistem care împiedică flambajul acestuia (fig.2.7).

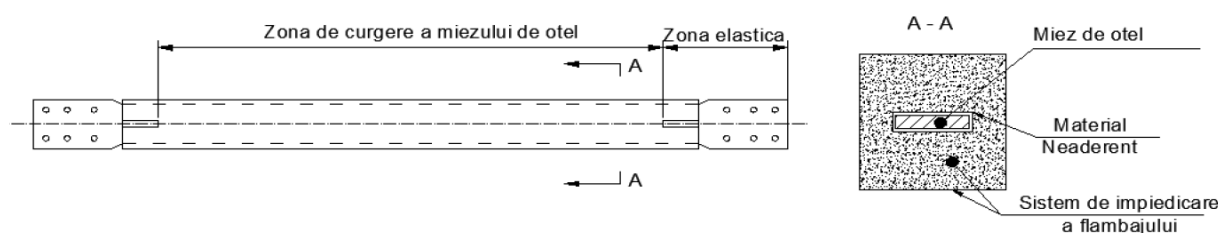


Fig. 2.7 Bară disipativă cu flambaj împiedicat – alcătuire [164]

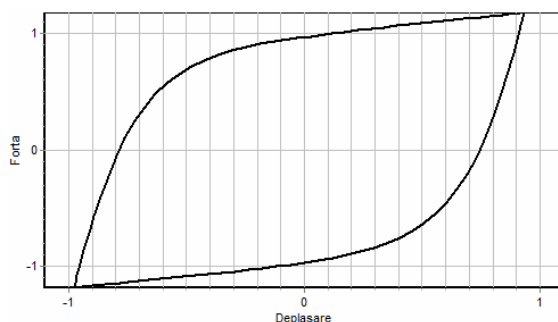


Fig. 2.8 Bară disipativă cu flambaj împiedicat – bucla de histerezis [54]

Împiedicarea flambajului a condus la crearea unui dispozitiv cu comportare elasto-plastică a cărui buclă histeretică arată ca în fig. 2.8. În timpul seismului, nucleul central de oțel se poate deforma longitudinal independent de sistemul de împiedicare a flambajului, deformarea putând avea incursiuni și în domeniul plastic. Acest dispozitiv are o capacitate mare de deformare plastică la întindere și compresiune. Bucla sa histeretică poate fi modelată cu ajutorul modelului matematic clasic de histerezis Bouc-Wen [54].

Miezul de oțel poate avea secțiune în formă de cruce sau dreptunghiulară. Sistemul de împiedicare a flambajului este de obicei alcătuit din mortar sau beton și un înveliș de oțel. Materialul neaderent diminuează transferul forței axiale de la miezul de oțel la învelișul de mortar (beton). De obicei se folosește ca material neaderent vaselină de silicon, polietilenă sau cauciuc. Între miezul de oțel și învelișul de mortar (beton) există un spațiu liber care trebuie să fie corect dimensionat astfel încât să permită mărirea secțiunii oțelului la compresiune și care să împiedice flambajul miezului de oțel [164].

Un exemplu de utilizare a barelor disipative cu flambaj împiedicat este reprezentat de parcare supraetajată din beton armat a aeroportului John Wayne Airport din Santa Ana, California, USA pentru rigidizarea căreia s-au utilizat bare disipative cu flambaj împiedicat (fig. 2.9), produse de compania Star Seismic [164].

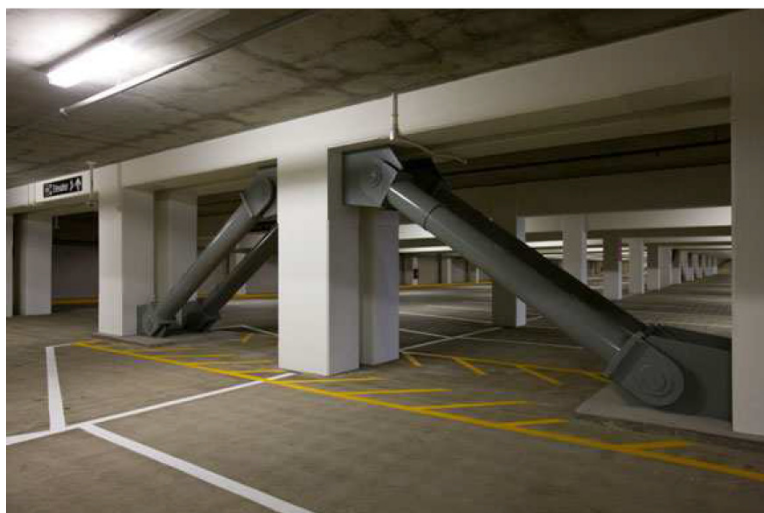


Fig. 2.9 Rigidizarea parcării supraetajate a aeroportului John Wayne Airport, Santa Ana, California, USA [164]

2.1.4 Amortizori metalici cu ductilitate mare

Amortizorii metalici cu ductilitate mare sunt alcătuiți din componente metalice având diferite forme, confecționate dintr-un material ductil. Rigiditatea elastică și post-elastică precum și forța maximă necesară a acestor amortizori este proporțională cu numărul de componente metalice asamblate în paralel (fig. 2.10) [165].

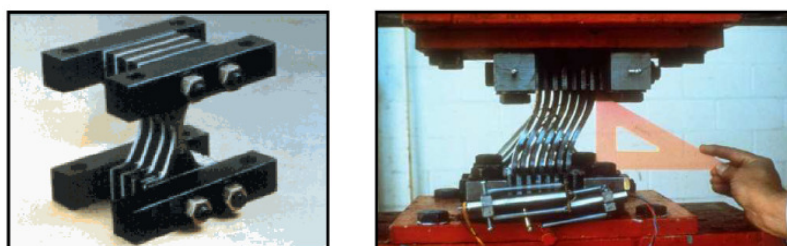


Fig. 2.10 Amortizor metalic tip ADAS [165]

În timpul seismului, plăcuțele metalice realizate din oțel ductil, sunt supuse eforturilor de forfecare ce determină apariția unui moment încovoietor. Forma geometrică a plăcuțelor determină o distribuție uniformă a tensiunilor pe toată înălțimea plăcuței.

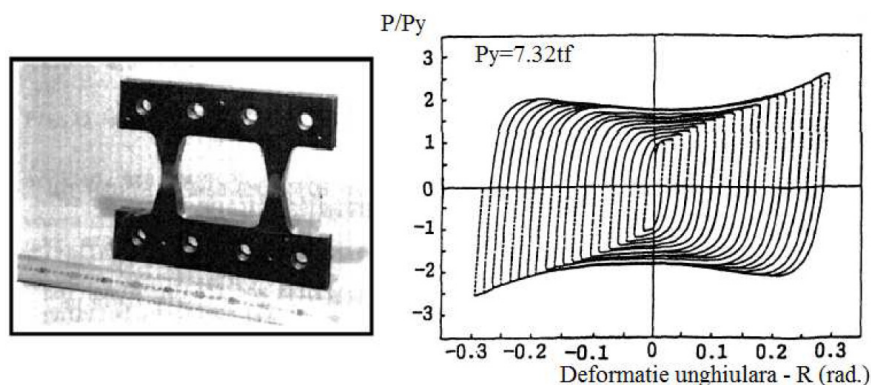


Fig. 2.11 Amortizor metallic tip “fagure” [165]

Zonele disipative ale acestor amortizori sunt plăcuțele metalice cu forme predefinite (fagure, clepsidra, X, triunghi, etc.). Bucla de histerzis caracteristică acestor amortizori are formă de fluture datorită întăririi rigidității la amplitudini mărite ale deplasării (fig. 2.11).

Avantajele acestor amortizori sunt fiabilitatea ridicată, insensibilitatea la variațiile de temperatură și comportament stabil. Printre dezavantaje se pot enumera: mărirea rigidității structurii și necesitatea înlocuirii lor după cutremure puternice [100].

Fig. 2.12 prezintă un exemplu de utilizare a amortizorilor metalici de tip X-ADAS la consolidarea clădirii cu două niveluri a băncii Wells Fargo, construită în anul 1967 în San Francisco (S.U.A.) și care a fost avariata de cutremurul Loma Prieta în 1989. Consolidarea seismică a acestei clădiri s-a realizat în anul 1992, utilizând șapte amortizori metalici tip X-ADAS, amplasați în contravântuiri de tip chevron [100].



a)



b)

Fig. 2.12 Banca Wells Fargo: (a) vedere; (b) amortizor metallic de tip X-ADAS [100]

2.1.5 Amortizori cu frecare

Amortizorii cu frecare au în componența lor un set de plăci metalice care în timpul deplasărilor care apar în timpul seismului, determină apariția fenomenului de frecare între suprafețele lor de contact. Forța de frecare este influențată de forța de strângere a unor buloane de înaltă rezistență care assemblează plăcile metalice. Energia seismică este disipată în timpul deplasării structurii prin fenomenul de frecare care transformă o parte din această energie în căldură generată în suprafețele metalice aflate în contact (fig. 2.13).

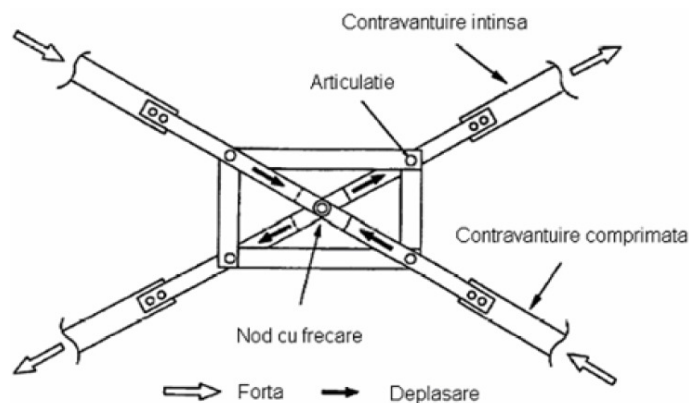


Fig. 2.13 Amortizor cu frecare - alcătuire

Bucula histeretică a acestui dispozitiv este rectangulară, iar modelul matematic corespunzător este modelul Coulomb.

Printre avantaje se pot enumera: simplitate constructivă, insensibilitate la variațiile de temperatură, curbă histeretică stabilă, energie disipată mare chiar la valori mici ale deplasării.

Dezavantajele sunt legate de uzura mecanică precum și modificări care apar la suprafețele de frecare, fapt care determină lucrări de întreținere periodice [100].

În fig. 2.14 este prezentat un exemplu de aplicare a amortizorilor cu frecare pentru protecția seismică a celor două clădiri având fiecare câte 10 niveluri ale Complexului rezidențial Nouvel Europa din Montreal. În acest caz s-au utilizat 57 de amortizori cu frecare produși de firma Pall, amplasați în contravântuiri diagonale.



a)



b)

Fig. 2.14 Complexul rezidențial Nouvel Europa:
a) vedere; b) amortizor cu frecare produs de firma Pall [100]

2.1.6 Amortizori românești ȘERB

Amortizorii românești ȘERB au fost obiectul mai multor brevete de invenție în perioada 2000-2006. Ei au fost realizați de dr. ing. Viorel Șerban de la CITON București (Centrul de Inginerie Tehnologică pentru Obiective Nucleare) pentru echiparea antisismică a unor structuri din cadrul centralelor nucleare din țara noastră.

Există două categorii de amortizori ȘERB:

- amortizori destinați montării la suprastructura clădirilor;
- amortizori destinați montării în fundație în paralel cu sistemul de izolatori seismici.

2.1.6.1 Dispozitive ȘERB de amortizare seismică pentru suprastructură

Dispozitivele de amortizare seismică ȘERB montate la suprastructura clădirilor, în contravânturi sau în alte configurații de poziționare, permit disiparea energiei seismice, precum și controlul deplasărilor relative de nivel prin suprapunerea a două procese care determină ca forța axială din amortizor și energia absorbită să fie direct dependente de mărimea deplasării relative de nivel.

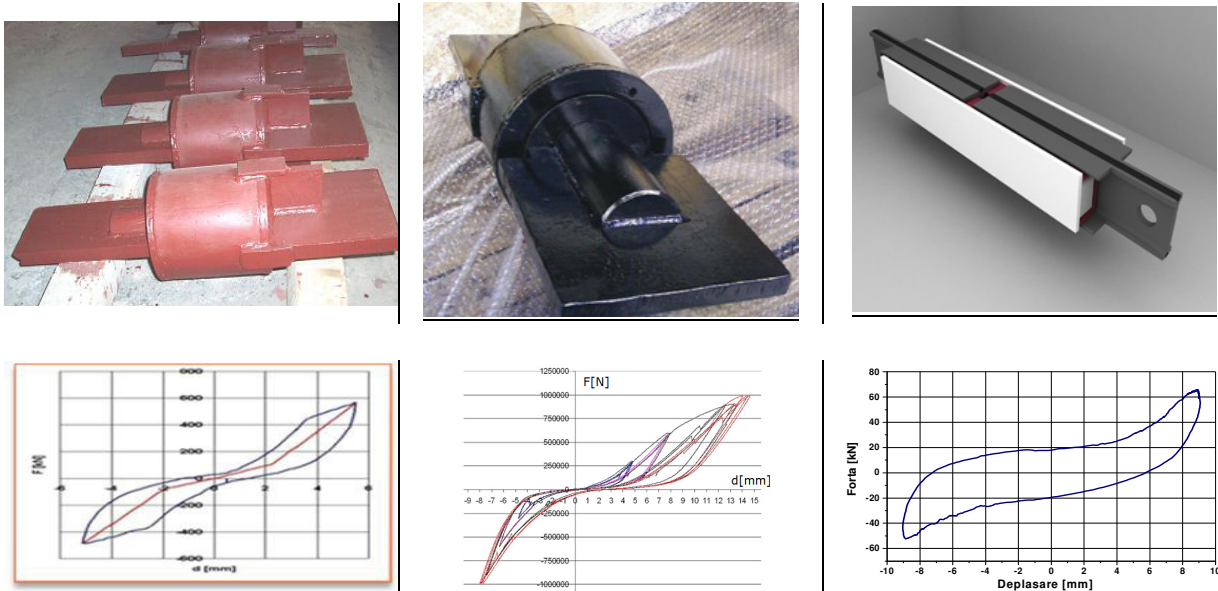


Fig. 2.15 Dispozitive de amortizare seismică pentru suprastructură, ȘERB-B*T și caracteristicile lor histeretice determinate experimental [136]

Acești amortizori au o componentă elastică și una histeretică. Componenta elastică este asigurată la majoritatea tipurilor de amortizori ȘERB, prin deformarea elastică a unor discuri metalice aflate în contact cu frecare uscată, iar componenta histeretică este asigurată prin fenomenul de frecare între discurile metalice, în timpul deformării acestora. Dependența forței de amortizare de deplasarea relativă de nivel face ca aceste dispozitive să lucreze la fel de bine, indiferent de tipul de cutremur, rapid sau lent. Caracteristica de histerezis este neliniară elastică progresivă (fig. 2.15), contribuind foarte mult la limitarea deplasărilor relative de nivel. Schemele de principiu și parametrii acestor amortizori sunt prezentate exemplificativ în figurile 2.16 și 2.17 și în tabelele 2.1 și 2.2.

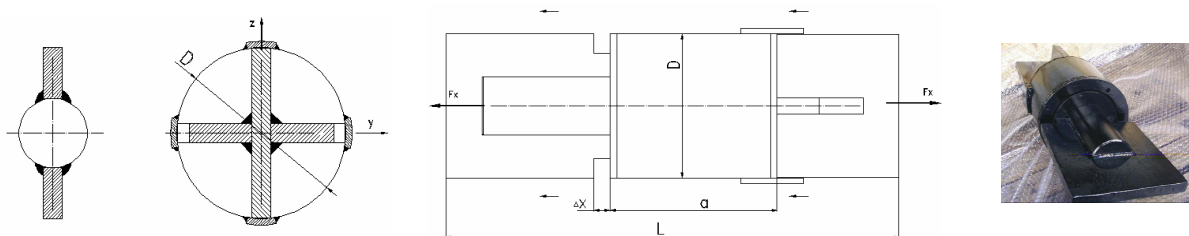


Fig. 2.16 Dispozitiv telescopic ȘERB-B1T*F_x-Δx [135]

Amortizorii ȘERB-B1T sunt realizați în mai multe variante constructive prezentate în tab. 2.1 unde: F_x – forța axială din amortizor, Δx – cursa maximă a amortizorului, F_{yz} – forța tăietoare maximă care apare în amortizor, Δyz – valoarea maximă a deplasărilor pe direcție transversală, L , D și a – cote de gabarit ale amortizorului, m – masa amortizorului.

Tab. 2.1 Parametrii pentru diferite tipuri de amortizori ȘERB-B1T*F_x-Δx [135]

ȘERB-B1T*F _x -Δx	F _x [KN]	Δx [mm]	F _{yz} [KN]	Δyz [mm]	L [mm]	D [mm]	a [mm]	m [kg]
ȘERB-B1T*600-120-4	<600	<±20	<120	<±1	400÷600	160÷200	150÷200	30÷60
ȘERB-B1T*1000-200-6	<1000	<±20	<200	<±1	500÷1000	180÷250	180÷300	50÷130
ȘERB-B1T*2000-400-6	<2000	<±25	<400	<±2	800÷1500	220÷300	250÷400	100÷250

Până în prezent, dispozitivele ȘERB au fost utilizate cu succes pentru reducerea la șocuri, vibrații și mișcări seismice a echipamentelor, rețelelor de conducte, structuri și la consolidarea unor clădiri [125]. Printre aplicațiile mai importante amintim:

- consolidarea antiseismică a unei construcții în cadre de beton armat cu șase niveluri de la NAVROM Galați la care soluțiile clasice de consolidare, conform prevederilor Codului P100 nu satisfăceau cerințele de rezistență și stabilitate a fundației și ansamblului clădirii și nici cerințele impuse pentru pereții cortină (2006) [125];
- izolarea la zgomote, șocuri, vibrații și mișcări seismice a trei platforme de beton armat de la Centrul de Tehnologii Avansate cu Laser (CETAL), amplasat pe platforma Grup II IFIN-HH-Activități nenucleare, Strada Atomiștilor Nr. 409, oraș Măgurele, județul Ilfov, într-o clădire de beton armat, pentru susținerea unor echipamente generatoare de zgomote, șocuri și vibrații și a unor echipamente foarte sensibile la zgomote, șocuri și vibrații [131,133].
- izolarea a două ciocane matrișoare la IUS Brașov. Gradul de izolare obținut prin măsurători experimentale a fost de 98%, iar amplitudinea vibrațiilor vitezelor în apartamentele blocurilor de pe Calea Hârmanului s-a redus de 260 ori după aplicarea sistemului [136];
- izolarea seismică a 10 dulapuri electrice de la Fabrica de Apă Grea ROMAG-PROD de la Drobeta Turnu Severin, ceea ce a permis utilizarea unor componente clasice pentru dulapurile cu cerință de calificare seismică și ieftinirea acestora de circa două ori [136];
- reducerea vibrațiilor la tronsonul de conducte PL105 și PL1006 de la Fabrica de Apă Grea ROMAG-PROD de la Drobeta Turnu Severin de peste cinci ori prin montarea unor suportți ce înglobează dispozitive ȘERB [136];
- reducerea vibrațiilor de circa șase ori la conducta de aer comprimat care alimenta ciocanele matrișoare de la IUS-Brașov [136].

Consolidarea construcției în cadre de beton armat de la NAVROM Galați

Soluția de consolidare a clădirii în cadre de beton armat cu șase niveluri aparținând S.C. NAVROM din Galați a constat în montarea unor amortizori seismici ȘERB-B1T*800 în contravântuirile de la nivelurile inferioare și medii ale clădirii, pe ambele direcții.



Fig. 2.17 Corp B NAVROM înainte de modernizare (stânga) și după modernizare (centru și dreapta) [161]

Inițial clădirea avea funcțiunea de cămin, iar după cutremurul din 4 martie 1977, au apărut atât fisurări ale stâlpilor de la parter, cât și degradări ale pereților din zidărie la parter și etajul 1. După consolidare și reamenajare clădirea are funcțiunile de: hotel, bancă și sediu de companie. Soluția de consolidare a clădirii este prezentată în figurile 2.18 și 2.19.

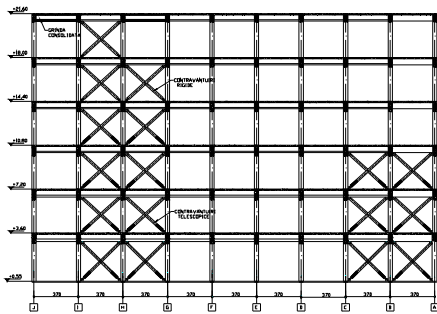


Fig. 2.18 Corp B NAVROM. Secțiune longitudinală – axa "a". Dispunere amortizori ȘERB [125]

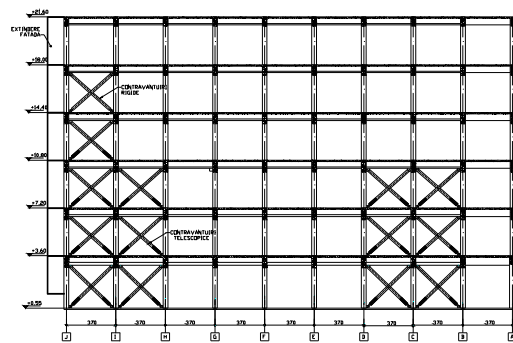


Fig. 2.19 Corp B NAVROM. Secțiune longitudinală – axa "c". Dispunere amortizori ȘERB [125]

Transmiterea forțelor de la contravântuiri la structura de beton armat s-a prevăzut cu cămășuiri metalice ale stâlpilor, grinzilor și nodurilor din contravântuiri.



Fig. 2.20 Corp B – Detalii amplasare și prindere contravântuiri cu amortizori ȘERB [161]

Față de soluția clasică de consolidare, soluția de consolidare cu dispozitive ȘERB are următoarele avantaje [125]:

- dimensiunile elementelor structurale rămân suplu, ceea ce permite părții de arhitectură să realizeze compartimentări mai eficiente și spații de acces mai fluente;
- controlul și limitarea deplasărilor relative de nivel la valori mai mici de 0,4% cu ajutorul amortizorilor ȘERB;
- disiparea energiei seismice la deplasări relative de nivel sub 0,3%;
- menținerea elementelor structurale ale clădirii într-o stare elastică de solicitare și evitarea apariției de articulații plastice, inclusiv la cutremure foarte mari.

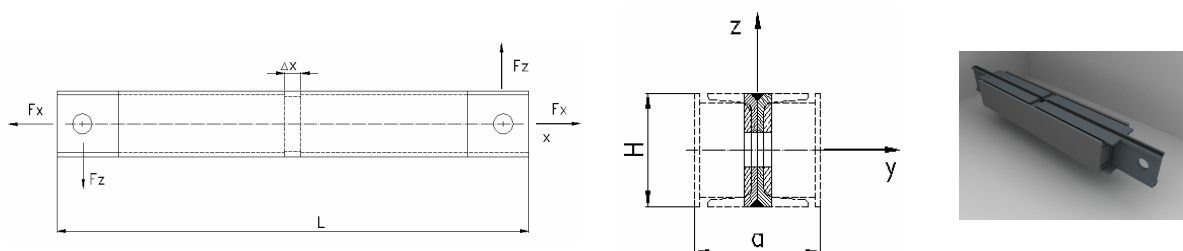


Fig. 2.21 Dispozitiv telescopic ȘERB-B2T*F_x-Δx [135]

Amortizorii ȘERB-B2T sunt realizați în mai multe variante constructive prezentate în tab. 2.2 unde: F_x – forța axială din amortizor, Δx – cursa maximă a amortizorului, Δyz – valoarea maximă a deplasărilor pe direcție transversală, F_{yz} – forța tăietoare maximă care apare în amortizor, L , H și a – cote de gabarit ale amortizorului, m – masa amortizorului.

Tab. 2.2 Parametrii pentru diferite tipuri de amortizori ȘERB-B2T* F_x - Δx [135]

ȘERB-B2T* F_x - Δx	F_x [KN]	Δx [mm]	F_{yz} [KN]	Δyz [mm]	L [mm]	H [mm]	a [mm]	m [kg]
ȘERB-B2T*1000-200	<1000	< ± 300	<200	< ± 1	800÷1200	160÷200	180÷240	160÷450
ȘERB-B2T*4000-800	<4000	< ± 400	<800	< ± 1	1000÷2000	180÷300	200÷340	280÷1600
ȘERB-B2T*6000-1200	<6000	< ± 600	<1200	< ± 2	1600÷3000	250÷400	270÷440	860÷4100

Amortizorii ȘERB-C funcționează pe aceleași principii ca și amortizori ȘERB-B1T și ȘERB-B2T având bucle de histerezis similare, diferența constând în numărul și poziționarea diferită a discurilor metalice. În literatura de specialitate s-a încercat modelarea acestor bucle histeretice cu modelul matematic Bouc-Wen [114].

2.1.6.2 Dispozitive ȘERB de amortizare seismică pentru fundație

Dispozitivele telescopice de amortizare seismică ȘERB-TEL sunt destinate montării în fundația clădirilor în paralel cu sistemul de izolare seismică. Acestea sunt dispozitive cu caracteristici elastice și disipative neliniare de tip histeretic, în care componenta elastică este realizată prin deformarea unor pachete de tablă de oțel, iar componenta histeretică este realizată prin frecarea care apare în timpul mișcărilor relative dintre elementele componente aflate în contact cu frecare uscată. Prin suprapunerea acestor două fenomene în timpul funcționării rezultă o buclă histeretică caracterizată de neliniaritate elastică, geometrică, de tip progresiv (cu consolidare) [136].

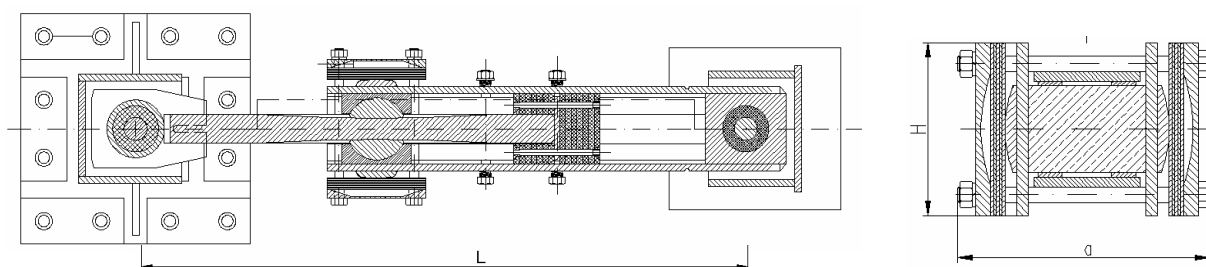


Fig. 2.22 Amortizor telescopic ȘERB-TEL pentru fundație – schemă de principiu [136]

În timpul deplasării tijei amortizorului se inițiază procesul de frecare între un corp profilat și suprafața profilată a tijei. Forța de frecare între cele două elemente este variabilă datorită profilului tijei. Forța elastică care determină presiunea între cele două elemente în contact poate avea mai multe valori în funcție de gradul de prestrângere al șuruburilor care influențează distanța a (vezi fig. 2.22).

Caracteristica axială de histerezis, forță-deplasare are o formă specială de tip “papion”, formă care depinde în mare măsură de forma profilării tijei amortizorului. Caracteristica de histerezis determinată experimental pentru diferite situații de prestrângere a șuruburilor este prezentată în fig. 2.23.

Dispozitivele telescopice ȘERB-TEL se realizează într-o gamă largă prezentată exemplificativ în tab. 2.3.

Tab. 2.3 Parametrii pentru diferite tipuri de amortizori telescopici ȘERB-TEL* F_x - Δx [135]

ȘERB-TEL* F_x - Δx	F_x [KN]	Δx [mm]	L [mm]	H [mm]	a [mm]	m [kg]
SERB-TEL*600-300	<600	< ± 300	800÷1400	160÷200	180÷300	60÷120
SERB-TEL*2000-400	<2000	< ± 400	1200÷2000	180÷300	220÷360	100÷300
SERB-TEL*5000-600	<5000	< ± 600	1600÷3000	250÷400	280÷420	250÷2500

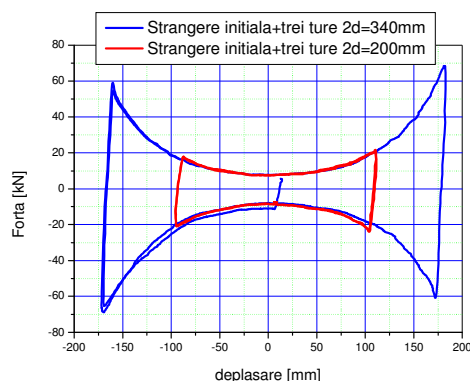


Fig 2.23 Dispozitiv telescopic ȘERB-TEL*600-300 (stânga) și caracteristica sa de histerezis (dreapta) [136]

În literatura de specialitate s-a realizat modelarea acestor bucle histerezice cu un model matematic Bouc-Wen modificat [136].

Izolarea seismică a platformelor CETAL

Soluția adoptată pentru cele trei platforme de beton armat a constat într-un sistem de izolare seismică cu izolatori ȘERB montați în fundație, la care s-a adăugat în paralel un sistem de amortizori ȘERB pentru fundație (figurile 2.24 și 2.25) [131, 133].

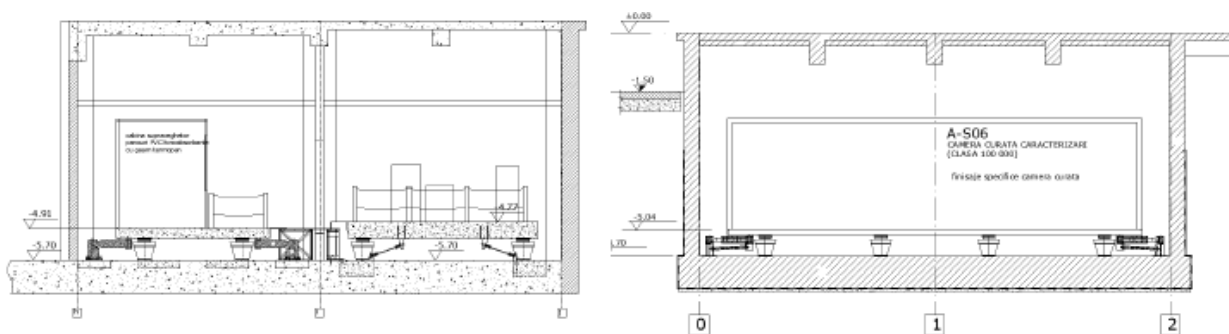


Fig. 2.24 Schema de principiu a sistemului de protecție antiseismică a platformelor CETAL [162]



Fig. 2.25 Detalii cu sistemul de protecție antiseismică a platformelor CETAL [162]

2.2 Tipuri de izolatori seismici

Aceste dispozitive pasive de disipare a energiei seismice se poziționează la baza structurii, având rol de întrerupere a legăturii directe între structura clădirii și terenul de fundare. Prin folosirea acestor dispozitive se urmărește ca acestea să preia toate deformațiile care apar datorită acțiunii seismice, astfel încât întreaga structură să aibă un comportament de corp rigid. Astfel, structura va avea o perioadă fundamentală de vibrație mai mare care va fi cât mai îndepărtată de perioadele predominante ale seismelor din zona respectivă.

Există mai multe tipuri de izolatori seismici dintre care amintim:

- izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB);
- izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB);
- izolatori din cauciuc lamelar cu miez de plumb (LRB);
- izolatori de tip pendul cu frecare (FPS);
- izolatori românești ȘERB.

2.2.1 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB)

Acești izolatori, cunoscuți în literatura de specialitate ca LDRB (Low Damping Rubber Bearings), sunt realizați dintr-un set de lamele metalice între care este inserat cauciuc natural sau sintetic (fig. 2.26). Lamelele metalice au rol de rigidizare pe verticală a dispozitivului. Rigiditatea laterală este scăzută fiind controlată de caracteristicile cauciucului folosit.

Avantaje: proces de fabricație simplu, preț de cost relativ scăzut, insensibilitate la variații ale temperaturii, stabilitate în funcționare. Dezavantajele sunt legate de rigiditatea laterală scăzută care necesită montarea unor amortizori suplimentari în fundație în paralel cu sistemul de izolare seismică.

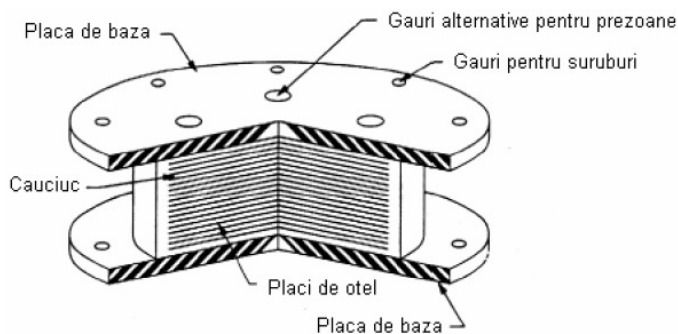


Fig. 2.26 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB) – alcătuire [100]



Fig. 2.27 Unele aplicații de izolare seismică în Turcia:

- a) Sediul Central T.E.B. izolat cu 87 LRB și LDRB, care era în curs de execuție în 2006;
- b) cele două rezervoare LNG de 140.000 m³ din Egegaz la terminalul Aliaga-Izmir, izolat cu 112 LRB și 241 LDRB proiectată să reziste până la PGA de 0,7g. [89]

Aceste dispozitive au un comportament liniar în timpul seismului cu o amortizare vâscoasă echivalentă de 5% [100].

În fig. 2.27 sunt prezentate exemplificativ două aplicații ale izolatorilor din cauciuc lamelar cu amortizare mică (LDRB).

2.2.2 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB)

Aceste dispozitive cunoscute în literatura de specialitate ca HDRB (High Damping Rubber Bearings) sunt asemănători cu izolatorii de tip LDRB, cu deosebirea că amortizarea cauciucului dintre lamelele metalice a fost crescută prin adăugarea în componența acestuia a carbonului extra fin precum și a unei combinații de uleiuri și rășini. Amortizarea atinge astfel valori de până la 20%.

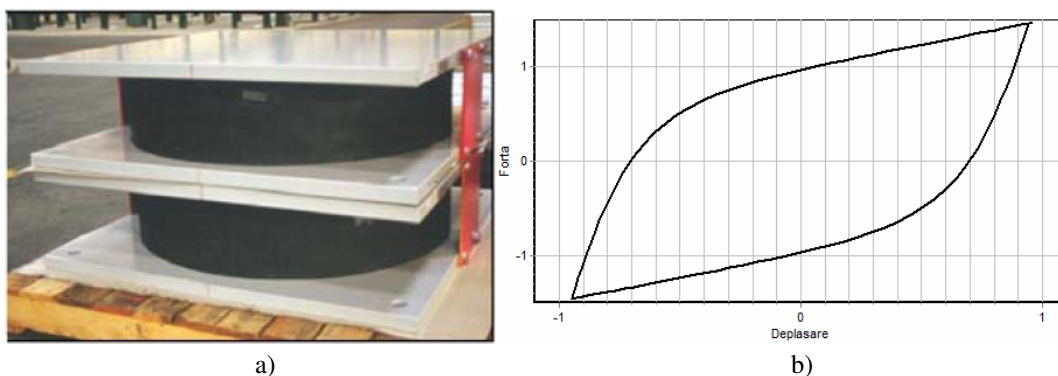


Fig. 2.28 Izolatori din cauciuc lamelar cu amortizare mare (HDRB)

a) structura reală [100]; b) bucla de histerezis

Forma buclei de histerezis (fig. 2.28) permite modelarea acestor izolatori cu modelul matematic de histerezis Bouc-Wen clasic [99].

Avantajele acestor izolatori sunt legate de ușurința de fabricație și proiectare, precum și lipsa necesității montării de amortizori suplimentari în fundație.

Dezavantajele sunt legate de sensibilitatea la variațiile de temperatură și apariția fenomenului de îmbătrânire a elastomerului.

Fig. 2.29 prezintă un exemplu de utilizare a izolatorilor tip HDRB la izolarea seismică a clădirii Centrului Civil de Apărare din Foligno (Perugia) în anul 2011 [95].



Fig. 2.29 Clădirea Centrului Civil de Apărare din Foligno (Italia) izolată seismic cu 10 izolatori HDRB [95]

Un alt exemplu de izolare seismică a clădirilor folosind izolatori tip HDRB este noul Sediul al Agenției Naționale de Drumuri din L’Aquila edificat în 2011 (fig. 2.30), vechiul sediu fiind grav avariat în timpul cutremurului din Abruzzo, 2009 [95, 96].



Fig. 2.30 a) Noul sediu al Agenției Naționale de Drumuri din L’Aquila, clădire izolată cu 60 HDRB; b) câțiva izolatori montați la baza clădirii [96]

2.2.3 Izolatori din cauciuc lamelar cu miez de plumb (LRB)

Aceste dispozitive cunoscute în literatura de specialitate ca LRB (Lead Rubber Bearings) sunt asemănători cu izolatorii de tip LDRB, cu deosebirea că în componența lor intră suplimentar unul sau mai multe miezuri de plumb (fig. 2.31). În timpul seismului se produce deformarea miezului de plumb care asigură astfel, un proces de amortizare histeretică (amortizarea echivalentă putând ajunge până la 35%).

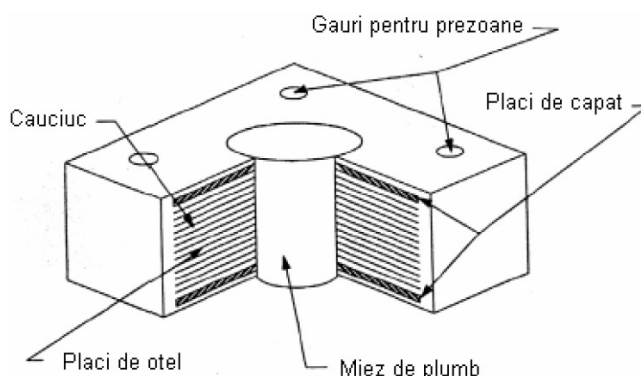


Fig. 2.31 Izolator din cauciuc lamelar cu miez de plumb (LRB) – alcătuire [100]

Din fig. 2.32 care prezintă comparativ buclele de histerezis ale celor trei tipuri de izolatori cu elastomeri, se observă că izolatorii cu miez de plumb (LRB) au o rigiditate inițială și o arie a curbei histeretice mai mare decât în cazul izolatorilor de tip HDRB și LDRB.

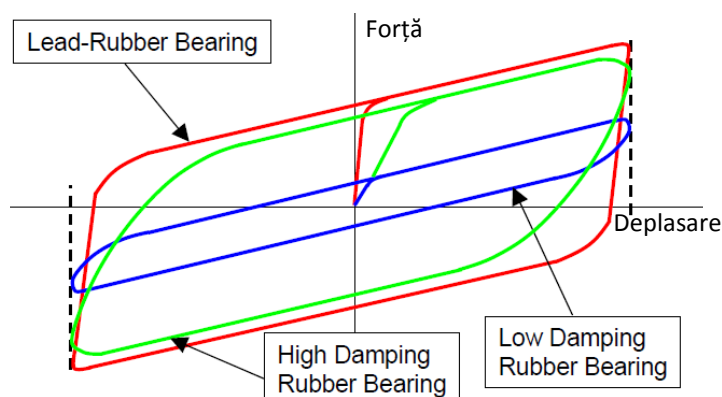


Fig. 2.32 Bucle de histerezis ale izolatorilor seismici cu elastomeri [166]

Aplicații recente rusești includ consolidarea unor importante clădiri istorice și construcții noi și proiecte privind clădiri înalte, în particular în Sochi, locația desfășurării Jocurilor Olimpice de Iarnă 2014 (fig. 2.33) [31, 96].



Fig. 2.33 Noul complex hotelier cu 27 de etaje din beton armat ridicat în Sochi (înălțime 93 m, suprafață locuibilă 40.000 m²), protejat cu 156 izolatori tip LRB [31,96]

2.2.4 Izolatori de tip pendul cu frecare (FPS)

Acești izolatori mai sunt cunoscuți ca izolatori FPS (Friction Pendulum System) și reprezintă un sistem alcătuit din componente realizate din materiale diferite (oțel și teflon) care în timpul seismului se află în mișcare relativă unele față de altele, mișcarea realizându-se cu frecare (fig. 2.34 a).

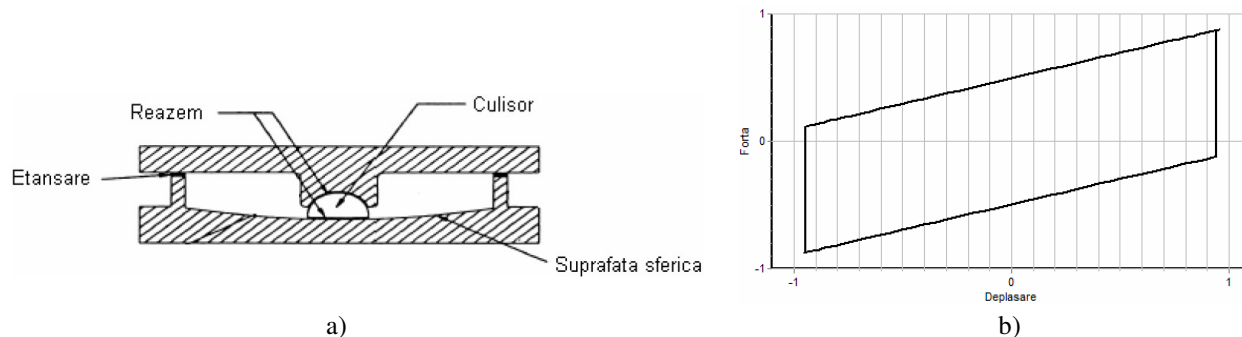


Fig. 2.34 Izolator de tip pendul cu frecare (FPS): a) alcătuire [100]; b) bucla de histerezis

Bucla de histerezis (fig. 2.34 b) poate fi modelată matematic cu modelul biliniar (Coulomb). Fig. 2.35 prezintă un exemplu de utilizare a izolatoarelor tip FPS în Italia.

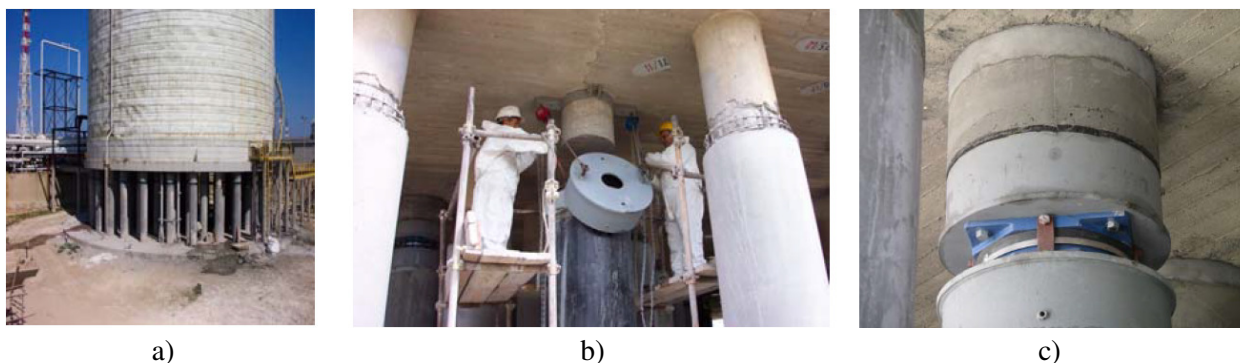


Fig. 2.35 a) Unul din rezervoarele Uzinei Chimice Polimeri Europa din Priolo, Italia, consolidat folosind izolatori tip FPS în 2008. Detalii în timpul (b) și după montarea izolatoarelor (c)

Avantajele constau în stabilitatea curbei histeretice, costurile scăzute de realizare și întreținere și insensibilitatea la variațiile de temperatură. Dezavantajele sunt legate de degradarea suprafețelor de contact.

2.2.5 Izolatori românești ȘERB

Acești izolatori [125] sunt alcătuiți dintr-o structură centrală elastică și o structură rigidă tronconică. Între cele două structuri se află un material disipativ care este de regulă nisip. Structura elastică centrală este realizată în două variante în vederea obținerii unei rigidități mici în plan orizontal și unei rigidități ridicate pe direcție verticală:

- varianta 1: structură elastică omogenă realizată din discuri de cauciuc natural sau cauciuc cloroproprenic, care se leagă între ele cu mai multe fascicule elastice;

- varianta 2: structură elastică hibridă formată din discuri elastice de cauciuc care au montat în zona centrală un corp rigid cu înălțime mai mică cu 10% decât înălțimea structurii elastice neîncărcate. Bazele circulare ale corpului rigid sunt acoperite cu teflon care permite alunecarea cu frecare mică în plan orizontal. În zona centrală se poate monta și un corp elastic cu o rigiditate diferită de rigiditatea cauciucului pe direcție verticală, cum ar fi un arc.

Izolatorii construiți în varianta 2 au aceeași deformare pe verticală indiferent de forța care acționează asupra lor deoarece 90% din această încărcare verticală este preluată de corpul central. Rigiditatea acestor dispozitive în plan orizontal este de câteva ori mai mică decât a dispozitivelor realizate în varianta 1 sau a dispozitivelor clasice [125].

În fig. 2.36 sunt prezentați izolatorii ȘERB în varianta 1 conform fișei tehnice [135], iar în tab. 2.4 sunt prezentați parametrii acestora.

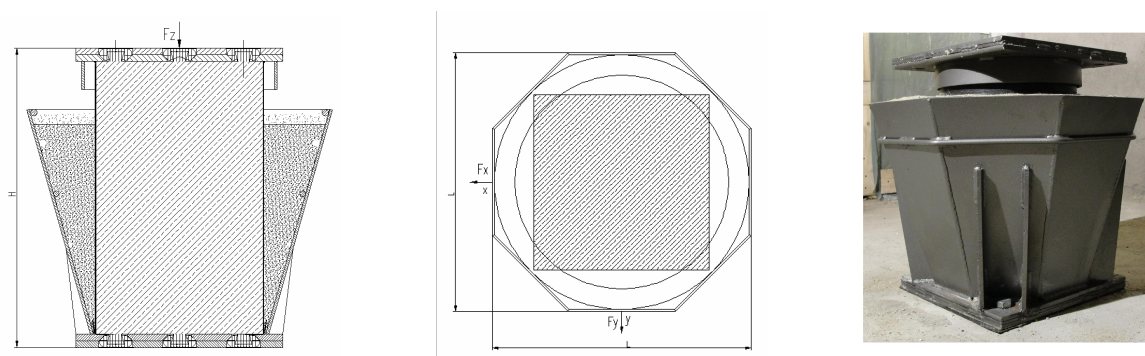


Fig 2.36 Izolator elastic cu amortizare ȘERB-B6I*Fz-Δxy (varianta 1) [135]

Aceste dispozitive pot prelua încărcării permanente până la 10.000 kN peste care se pot suprapune solicitări dinamice de întindere și compresiune. Translația în plan orizontal este de maxim ±600 mm, iar rigiditatea și amortizarea pot fi reglate între anumite limite chiar și după instalarea dispozitivului în sistemul de izolare seismică a clădirii. Se pot monta două dispozitive unul peste altul pentru deplasări laterale mai mari.

Tab. 2.4 Parametrii pentru diferite tipuri de izolatori elastici cu amortizare ȘERB-B6I*Fz-Δxy [135]

ȘERB*B6I*F _z -Δxy	F _z [KN]	Δxy [mm]	L [mm]	H [mm]	m [kg]
ȘERB-B6I*2000-300	<2000	<±300	500÷800	500÷700	150÷300
ȘERB-B6I*5000-400	<5000	<±400	700÷1200	700÷1100	250÷700
ȘERB-B6I*10000-600	<10000	<±600	1000÷1200	800÷1100	500÷900

Izolatorii ȘERB-B6I sunt realizați în mai multe variante constructive prezentate în tab. 2.4 unde: F_x – forța verticală preluată de izolator, Δ_{xy} – valoarea maximă a deplasărilor relative pe direcțiile x și y admise de izolator, L și H – cote de gabarit ale izolatorului, m – masa izolatorului.

Caracteristicile de histerzis pe cele două direcții, pentru izolatorul ȘERB în varianta 1, au fost determinate experimental și sunt prezentate exemplificativ în fig. 2.37.

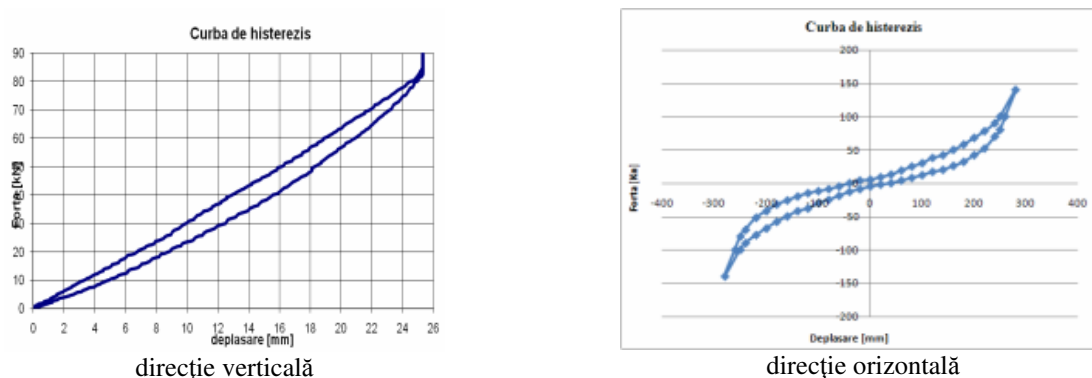


Fig. 2.37 Caracteristica forță-deformare pe direcție verticală și pe o direcție orizontală [136]

Pe lângă acești izolatori au fost brevetați și izolatori ȘERB cu frecare ȘERB-B5I, prezentați ca schemă de principiu în fig. 2.38.

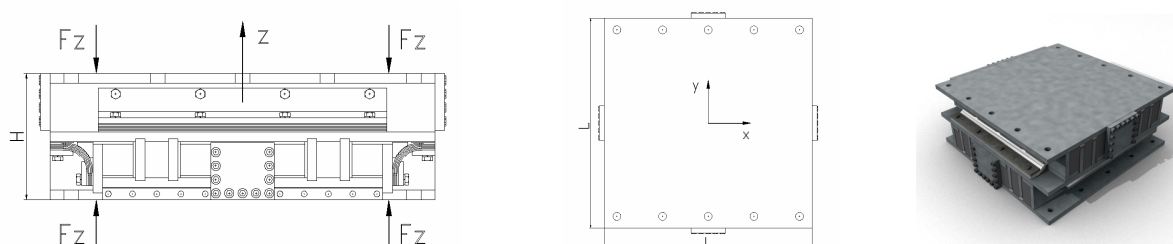


Fig 2.38 Izolator ȘERB cu frecare ȘERB-B5I [135]

Acești izolatori au fost realizați într-o gamă largă exemplificată în tab. 2.5, unde: F_x – forța verticală preluată de izolator, Δ_{xy} – valoarea maximă a deplasărilor relative pe direcțiile x și y admise de izolator, L și H – cote de gabarit ale izolatorului, m – masa izolatorului.

Tab. 2.5 Parametrii pentru diferite tipuri de izolatori cu frecare ȘERB-B5I* F_z - Δ_{xy} [135]

ȘERB-B5I* F_z - Δ_{xy}	F_z [KN]	Δ_{xy} [mm]	L [mm]	H [mm]	m [kg]
ȘERB-B5I*3000-300	<3000	< \pm 300	1000	<410	<2000
ȘERB-B5I*5000-450	<5000	< \pm 450	1000÷1200	<500	<3500
ȘERB-B5I*7000-600	<7000	< \pm 600	1200÷1500	<600	<6500

Izolatorii de tip ȘERB nu necesită întreținere pe durata de viață a obiectivului și au marea facilitate că rigiditatea lor pe direcție orizontală poate fi modificată după montarea suportilor în construcție fără a afecta stabilitatea și siguranța construcției oricând pe durata de viață a construcției. Capacitatea de amortizare a izolatorilor poate fi realizată într-o plajă relativ mare, iar pentru mărirea eficienței acestor dispozitive în ceea ce privește limitarea deplasărilor relative și disiparea energiei seismice se recomandă folosirea lor în paralel cu amortizorii telescopici pentru fundație ȘERB-TEL [135].

CAPITOLUL 3

CONTRIBUȚII PRIVIND DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A BUCLELOR DE HISTEREZIS SPECIFICE AMORTIZORILOR ȘERB

3.1 Introducere

Amortizorii românești ȘERB au fost realizați de către inventatorul lor dr. ing. Viorel Șerban ca o alternativă mult mai ieftină la oferta de amortizori fabricați de firme de prestigiu din străinătate. Aceștia au fost destinați inițial echipării antiseismice a unor structuri din cadrul centralelor nucleare românești, însă au fost folosiți și la structuri de clădiri civile (clădirea NAVROM Galați).

Amortizorii românești ȘERB C-194 destinați echipării antiseismice la suprastructură a clădirilor, la fel ca și amortizorii telescopici ȘERB TEL-150 destinați montării în paralel cu sistemul de izolare a clădirilor, sunt dispozitive mecanice care dezvoltă procese histeretice datorită fenomenului de frecare între elementele lor componente. Fenomenul de frecare care apare este influențat în timpul funcționării de tensiunile și forțele care apar datorită deformării elastice a elementelor ce intră în componența acestora.

Deoarece aceste procese de frecare și de deformare sunt destul de complexe, curba forță-deplasare a acestor amortizori nu a putut fi determinată până în prezent printr-o relație matematică care să evidențieze parametrii acestor fenomene de frecare și de deformare. Din acest motiv, pentru modelarea procesului de disipare a energiei seismice precum și de limitare a drifturilor în cazul unei clădiri încărcată seismic, este necesară determinarea curbei forță-deplasare experimental sau cu ajutorul metodei elementului finit. Odată determinată forma buclei de histerezis, ea poate fi ulterior modelată cu unul din modelele teoretice uzuale specifice procesului de histerezis.

Deoarece modelul matematic pentru amortizorii ȘERB nu a putut fi realizat până în prezent datorită complexității proceselor mecanice care apar între elementele componente, procesul de optimizare a formei și dimensiunilor acestora este foarte dificil. Până în prezent acest proces a fost realizat de către inventator prin teste experimentale succesive.

În lucrarea de față, pentru a modela comportamentul acestor amortizori în timpul funcționării, s-au pus la punct două modele numerice realizate cu metoda elementului finit în ANSYS care permit, pe lângă înțelegerea comportamentului amortizorilor în timpul funcționării, și optimizarea formelor și dimensiunilor elementelor componente în vederea obținerii unei bucle de histerezis optime pentru condițiile particulare ale clădirilor pe care acești amortizori vor fi montați. Pentru a valida cele două modele numerice realizate în ANSYS în cadrul acestui studiu, este necesară compararea rezultatelor obținute pe aceste două modele cu rezultatele obținute experimental. Testele experimentale prezentate în acest capitol au fost realizate pentru a completa testele experimentale realizate anterior de către inventator și de alți cercetători [33].

În continuare sunt prezentate experimentele pe care le-am realizat pe cele două tipuri de amortizori ȘERB, pentru determinarea buclelor de histerezis necesare validării modelelor numerice ale amortizorilor și modelării acestora cu modele matematice de histerezis specifice.

3.2 Încercări experimentale pe amortizorul ȘERB C-194

Încercările experimentale pentru amortizorul ȘERB C-194 destinat montării la suprastructură le-am realizat în cadrul laboratorului de încercări mecanice al ICECON București.

Deoarece structura acestui tip de amortizor este simetrică, rezultă că și bucla de histerezis va fi simetrică la întindere față de cea corespunzătoare compresiunii. Pentru o testare experimentală completă am realizat teste atât la întindere cât și la compresiune.

Ținând cont că suprafețele elementelor componente ale amortizorului care se află în contact nu au fost lubrificate, frecarea este de tip frecare uscată. Datorită acestui motiv, coeficientul de frecare între aceste suprafețe nu este dependent de viteza de deplasare relativă între suprafețele în contact. În concluzie, pentru modelarea condițiilor dinamice de funcționare a amortizorului, este suficientă testarea în condiții cvasi-stactice a amortizorului deoarece rezultatele sunt teoretic aceleași, forța axială din amortizor fiind dependentă doar de deplasare.

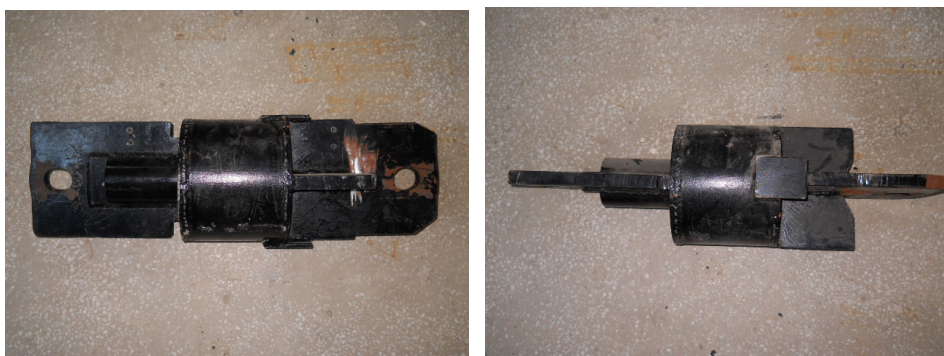


Fig. 3.1 Amortizorul ȘERB C-194 testat la ICECON București

Elementele elastice ale amortizorului sunt discuri metalice realizate din oțel special 11R51. Au fost realizate de către inventator, mai multe variante ale acestui tip de amortizor având un număr diferit de discuri metalice elastice cu grosimi și diametre diferite. Astfel, se poate vorbi de o tipologie de amortizori ȘERB care pot dezvolta forțe de amortizare conform necesităților clădirii pe care urmează să fie montate. Numărul, grosimea și diametrul acestor discuri metalice determină forma și dimensiunile buclei de histerezis.



Fig. 3.2 Elemente componente ale amortizorului ȘERB C-194

Am realizat testele experimentale pe o mașină universală de testat la tracțiune SANS echipată cu un sistem automat de acțiune, control și măsurare a parametrilor testați. Pentru acest tip de testare experimentală este necesară măsurarea deplasării între capetele amortizorului, care variază funcție de forța de tracțiune aplicată. Pentru a modela comportamentul amortizorului în timpul seismului, am ales ca solicitarea la tracțiune a acestuia să se realizeze prin variația ciclică lentă a forței de tracțiune cu amplitudini diferite atât la întindere cât și la compresiune.



Fig. 3.3 Amortizorul ȘERB C-194 montat pe mașina de testat universală SANS



Fig. 3.4 Echipamentul de comandă, control și măsurare al mașinii de testat SANS

Datorită formei speciale a amortizorului a fost necesară montarea acestuia în sisteme de prindere diferite în timpul solicitării la întindere și la compresiune. De aceea, am realizat separat cele două tipuri de solicitări în cicluri de încărcare diferite.

Am realizat mai multe testări la întindere și apoi separat la compresiune, cu forțe care variază ciclic, lent, atingând amplitudini de până la 600 kN. În figurile 3.5 și 3.6 am prezentat ciclurile de solicitare a amortizorului la întindere și la compresiune și bucla de histerezis pe care am obținut-o pe baza datelor măsurate în timpul celor două solicitări (fig. 3.7).

Se observă că bucla de histerezis are o formă neliniară-elastică progresivă, fapt care permite creșterea forței și a energiei hysteretice o dată cu mărirea cursei amortizorului. Aceasta are un efect de limitare a deplasărilor relative de nivel în timpul seismului la clădirile echipate cu acest tip de sisteme de amortizare.

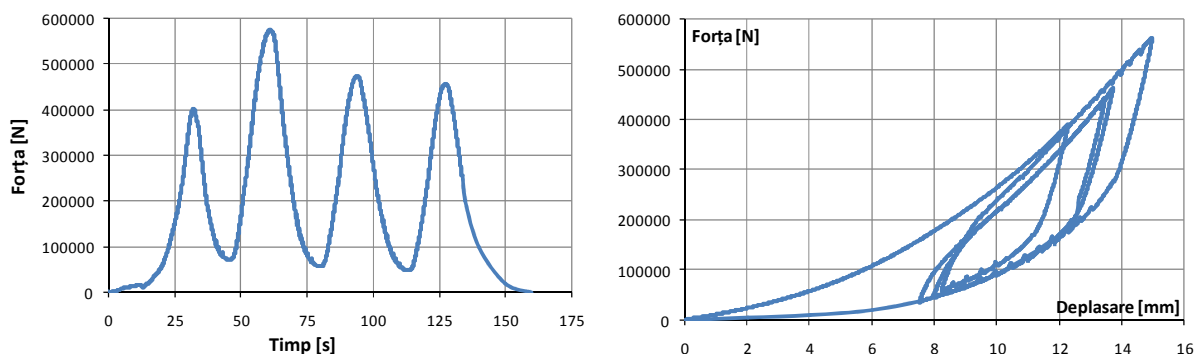


Fig. 3.5 Forța ciclică și curba de histerezis la întindere a amortizorului ŞERB C-194

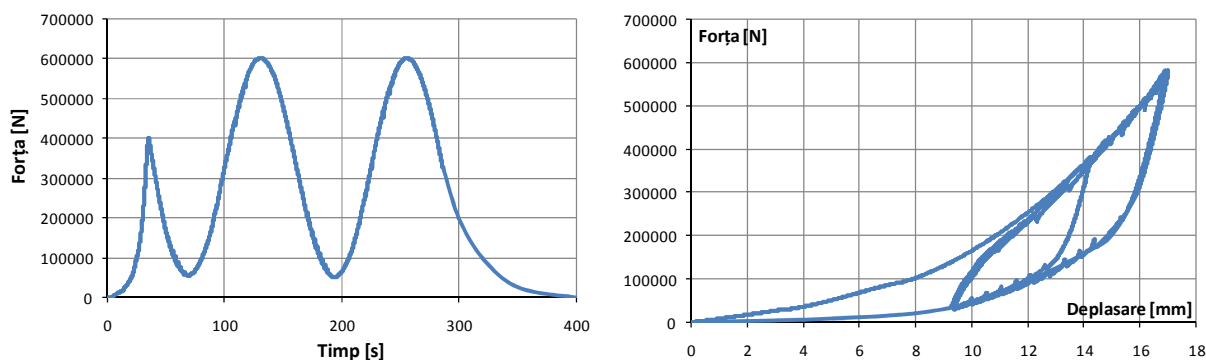


Fig. 3.6 Forța ciclică și curba de histerezis la compresiune a amortizorului ŞERB C-194

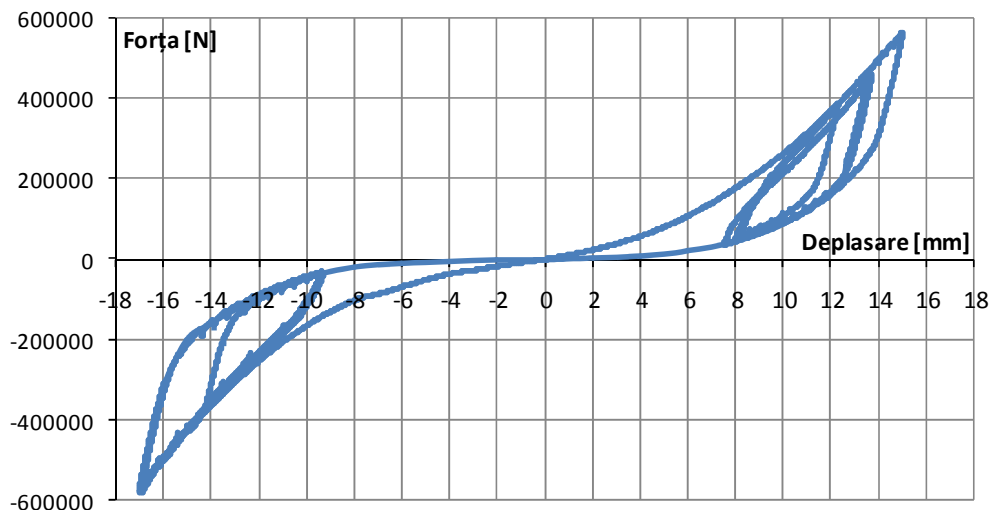


Fig. 3.7 Bucla de histerezis experimentală a amortizorului ŞERB C-194 testat la întindere și compresiune

Așa cum se poate observa din figurile 3.5, 3.6 și 3.7, curbele de histerezis obținute la întindere și compresiune sunt identice, fapt care se explică prin simetria structurii amortizorului. Datorită acestui fapt, în cazul determinării experimentale a formei și dimensiunilor buclei de histerezis caracteristică amortizorilor ȘERB C-194, este suficientă testarea acestora doar la întindere sau doar la compresiune, simplificându-se astfel întregul proces experimental.

Pentru a evidenția această variantă de obținere a curbei histeretice experimentale, în fig. 3.8 am prezentat un alt set de date experimentale pe care le-am obținut la solicitarea de întindere și în fig. 3.9 am prezentat curba de histerezis experimentală pe care am construit-o prin dublarea simetrică a acestor date.

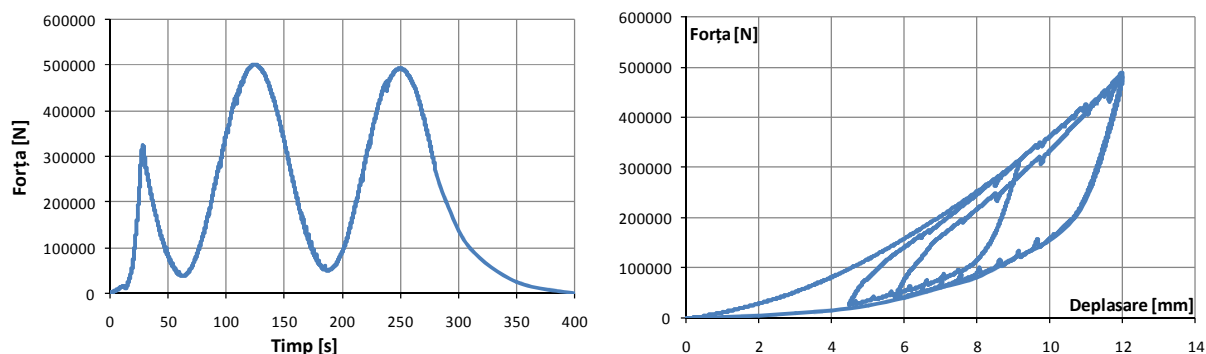


Fig. 3.8 Forța ciclică și curba de histerezis la întindere a amortizorului ȘERB C-194

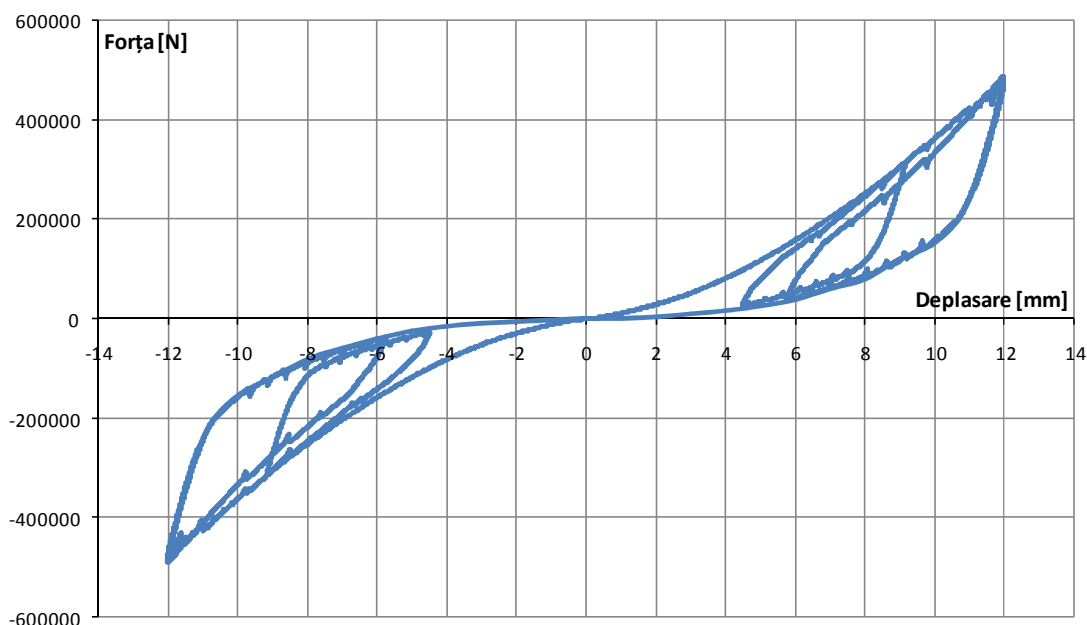


Fig. 3.9 Bucla de histerezis experimentală a amortizorului ȘERB C-194 testat la întindere

Din analiza graficelor curbelor de histerezis pe care le-am obținut experimental, se observă că acestea au forme și dimensiuni asemănătoare cu cele obținute în cadrul studiilor experimentale anterioare realizate de inventatorul amortizorilor ȘERB [125] și de colaboratorii săi [33]. Se observă că forma buclei histeretice experimentale nu poate fi modelată cu modele matematice de histerezis uzual folosite, având următoarele caracteristici:

- forța de amortizare crește neliniar o dată cu creșterea cursei amortizorului, având un caracter progresiv;
- permite accentuarea limitării deplasării relative de nivel o dată cu creșterea cursei amortizorului.

3.3 Încercări experimentale pe amortizorul telescopic ȘERB TEL-150

Încercările experimentale pentru amortizorul telescopic ȘERB TEL-150 destinat montării în fundație în paralel cu sistemul de izolare seismică a clădirii, le-am realizat în cadrul laboratorului de încercări mecanice al Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române, București (IMSAR).

Acest tip de amortizori funcționează pe principiul frecării controlate cu ajutorul unui set de lamele elastice care influențează forța normală pe suprafețele de frecare ale elementelor componente.

Deoarece frecarea între suprafețele elementelor componente este uscată, coeficientul de frecare, în acest caz, nu este dependent de viteza de deplasare între suprafețele aflate în contact. Acest fenomen ne permite să testăm amortizorul ȘERB în condiții cvasi-stactice pentru a obține bucla de histerzis ce caracterizează acest amortizor în timpul funcționării în condiții dinamice de solicitare la seism a clădirii echipate cu acest tip de amortizori.

Am realizat acest experiment pe o mașină universală de testat la tracțiune.

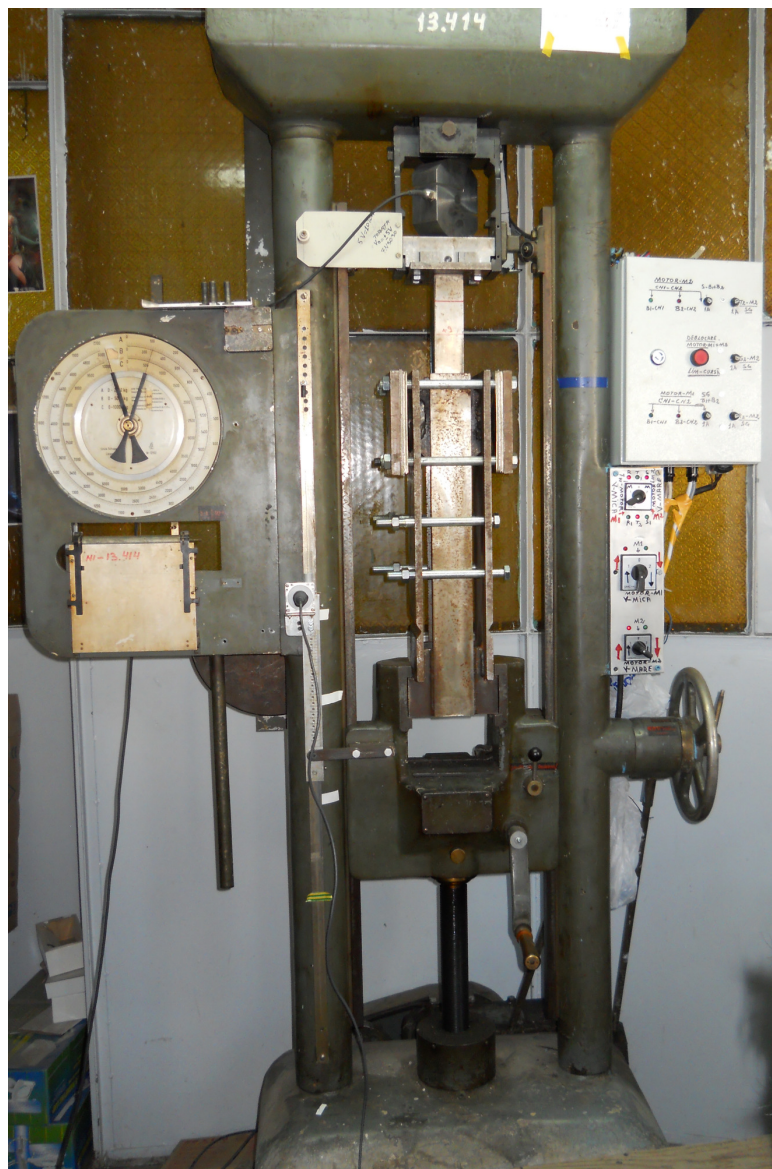


Fig. 3.10 Amortizorul telescopic ȘERB TEL-150 montat pe mașina de încercat la tracțiune – IMSAR București

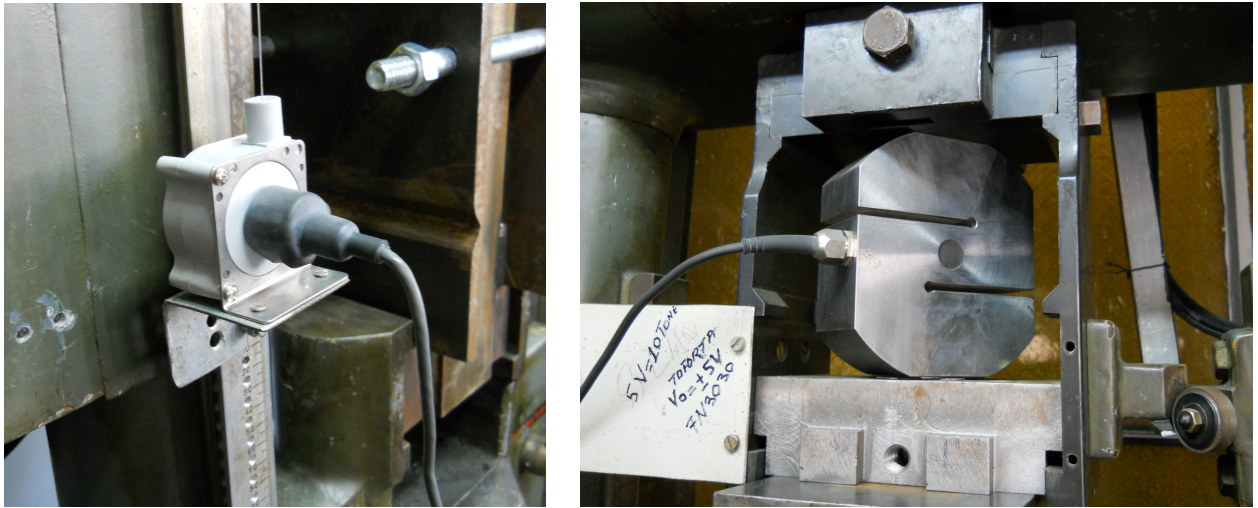


Fig. 3.11 Traductorul de deplasare (stânga) și traductorul de forță (dreapta) montați pe mașina de încercat la tracțiune

Semnalele preluate de la traductori au fost interpretate de o interfață care a permis preluarea acestora într-un sistem de calcul.



Fig. 3.12 Interfața și sistemul de calcul necesar preluării și procesării datelor experimentale

Am realizat aceste încercări experimentale cu forțe de întindere și compresiune de 33 kN, iar datele obținute (forță-deplasare) le-am folosit pentru trasarea buclei de histerezis experimentale a amortizorului telescopic ȘERB TEL-150 pentru fundație, prezentată în fig. 3.13.

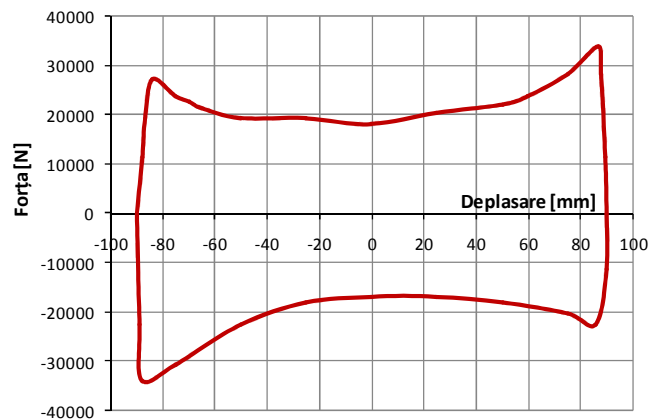


Fig. 3.13 Bucla de histerezis experimentală a amortizorului telescopic ȘERB TEL-150

Se observă că forma și dimensiunile caracteristicii histeretice pe care am obținut-o experimental sunt foarte asemănătoare cu cele obținute în cadrul studiilor experimentale anterioare realizate de inventatorul acestui amortizor [125].

Forma buclei histeretice experimentale obținute este de tip Papion, fiind rar întâlnită la amortizorii pentru fundație. Această formă nu poate fi modelată cu modele matematice de histerezis uzual folosite, fiind necesară adaptarea unor modele de histerezis complexe pentru integrarea sa într-un studiu analitic sau computațional. Acest demers este prezentat în capitolul 5.

3.4 Concluzii

Amortizorii românești ȘERB au fost realizați pentru a echipa antiseismic, la suprastructură sau în fundație, structuri specifice centralelor nucleare românești, dar, în aceeași măsură, pot fi folosiți și pentru echiparea antiseismică a structurilor clădirilor civile.

Scopul prezentului studiu experimental este obținerea caracteristicilor histeretice experimentale ale amortizorilor ȘERB care pot fi utilizate pentru echiparea antiseismică a clădirilor civile. Aceste date experimentale sunt utile pentru validarea modelării cu metoda elementului finit a comportamentului acestor amortizori în timpul seismului, modelare utilă procesului de optimizare structurală a elementelor care intră în componența amortizorilor pentru obținerea unor forme și dimensiuni optime ale caracteristicii histeretice.

Am realizat aceste studii experimentale în cadrul a două institute de cercetări și anume:

- Institutul de Cercetări pentru Echipamente și Tehnologii în Construcții ICECON S.A. București;
- Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române (IMSAR) București.

Ambele tipuri de amortizori ȘERB studiate experimental se bazează pe fenomenul de frecare uscată și pe deformarea elastică a unor elemente metalice. Datorită acestui fapt, forța axială din amortizor este dependentă doar de cursa amortizorului și încercările experimentale au putut fi realizate în regim cvasi-static deoarece sunt oferite astfel, aceleași date experimentale ca și în cazul unor solicitări dinamice specifice comportamentului la seism.

Caracteristicile histeretice pe care le-am obținut experimental au forme diferite de cele întâlnite frecvent la amortizorii uzual folosiți, neputând fi modelate matematic cu modelele matematice de histerezis clasice, fiind necesară abordarea lor cu modele matematice complexe adaptate corespunzător.

Ambele tipuri de amortizori pe care i-am testat experimental, au o structură simetrică din punct de vedere al elementelor componente care asigură un comportament simetric în timpul solicitărilor de întindere și compresiune specifice solicitării seismice a clădirii echipate cu astfel de amortizori. Datorită acestui fapt, obținerea experimentală a caracteristicilor histeretice poate fi simplificată prin testarea amortizorilor doar la întindere sau doar la compresiune, rezultatele obținute putând fi dublate simetric pentru obținerea buclei de histerezis finale.

Ambele tipuri de curbe histeretice pe care le-am obținut experimental permit creșterea forței și energiei amortizate o dată cu mărirea cursei amortizorului, având un efect de limitare accentuată a deplasărilor relative în timpul seismului pentru clădirile echipate cu aceste sisteme de amortizare.

CAPITOLUL 4

CONTRIBUȚII PRIVIND ANALIZA CU M.E.F. A AMORTIZORILOR ȘERB

4.1 Introducere

Dispozitivele de amortizare de tip ȘERB au fost subiectul mai multor invenții și inovații brevetate la OSIM de către inventatorul lor, dr. ing. Viorel Șerban [118÷124, 127], structura internă și caracteristicile geometrice ale elementelor componente ale acestora nefiind publicate în detaliu până în prezent. Există mai multe variante constructive ale acestora, pentru diferite valori ale forței maxime din amortizor și pentru diferite valori ale cursei maxime, însă principiul de funcționare este același pentru fiecare tipologie în parte.

Aceste tipuri de dispozitive histeretice nu au fost până în prezent modelate matematic sau numeric datorită complexității fenomenelor mecanice care apar și numărului mare de elemente componente, determinarea dimensiunilor acestor elemente realizându-se de către inventator prin teste experimentale. Cele două tipuri de amortizori ȘERB pe care le-am modelat în acest capitol sunt:

- amortizorii pentru suprastructură ȘERB C-194;
- amortizorii telescopici ȘERB TEL-150 pentru fundație.

Pentru modelarea cu metoda elementelor finite a celor două tipuri de amortizori ȘERB am ales programul *ANSYS* datorită facilităților performante de analiză neliniară, necesară modelării fenomenului de frecare care apare între elementele deformabile ale acestora.

Scopul acestui studiu a fost obținerea unor modele cu elemente finite validate experimental (prin intermediul curbelor histeretice pe care le-am obținut), cu ajutorul cărora să fie evidențiat comportamentul elementelor componente în timpul seismului și care să constituie ulterior modele numerice necesare proiectării dimensiunilor acestora, specifice parametrilor doriți ai buclei de histerezis.

În subcapitolul 4.2 este prezentat principiul de funcționare și modelul cu elemente finite al unui prototip al amortizorului pentru suprastructură ȘERB C-194, cu ajutorul caruia s-a obținut bucla de histerezis numerică care a fost apoi comparată cu cea obținută experimental în vederea validării modelului numeric.

În subcapitolul 4.3 este prezentat principiul de funcționare și modelul cu elemente finite al amortizorului telescopic ȘERB TEL-150, validat pe baza rezultatelor experimentale iar în subcapitolul 4.4 sunt prezentate principalele concluzii ale acestor modelări numerice.

4.2 Amortizorii pentru suprastructură ȘERB C-194

În vederea modelării, pentru prima dată, a acestor tipuri de amortizori folosind metoda elementului finit, am primit de la inventatorul dispozitivelor, documentația tehnică a unui prototip de amortizor ȘERB C-194, care are o structură asemănătoare cu cel pe care l-am analizat experimental. În consecință, fenomenele și solicitările mecanice care apar în elementele componente ale prototipului în timpul funcționării sunt, în principiu, foarte asemănătoare cu cele corespunzătoare variantei analizate experimental.

4.2.1 Principiul de funcționare

Amortizorii ȘERB destinați echipării clădirilor la suprastructură sunt, în principiu, construiți din seturi de discuri metalice suprapuse care se deformează în timpul solicitărilor de tracțiune ale amortizorului, fenomen care se produce concomitent cu fenomenul de frecare uscată care apare între aceste discuri. Aceste dispozitive au deci o componentă elastică realizată prin deformarea pachetelor de discuri metalice din oțel de arc, și o componentă histeretică care apare datorită fenomenului de frecare uscată care însoțește mișcarea relativă dintre aceste discuri. Prin combinarea celor două fenomene mecanice, acest tip de amortizor prezintă o caracteristică de histerezis neliniar-elastică de tip progresiv.

Elementele componente ale prototipului amortizorului ȘERB C-194 sunt prezentate în fig. 4.1, în care se observă, pe lângă pachetele de discuri metalice (6), și cele șase inele metalice profilate (3, 4, 5, 7, 8, 9) necesare distribuirii tensiunilor cât mai uniform de-a lungul acestor profile. Cei doi arbori de susținere (11) sunt distanțați prin intermediul distanțierului intermediar (12) și realizează, în timpul seismului, deplasări în sens contrar unul față de celălalt, de-a lungul axei longitudinale, determinând deformarea elastică a discurilor metalice (6) fixate la exterior în carcasa cilindrică (2). Piulițele de fixare (10) asigură o forță de prestrângere a discurilor metalice care influențează forța de frecare care apare între suprafețele plane ale acestora în timpul deformării.

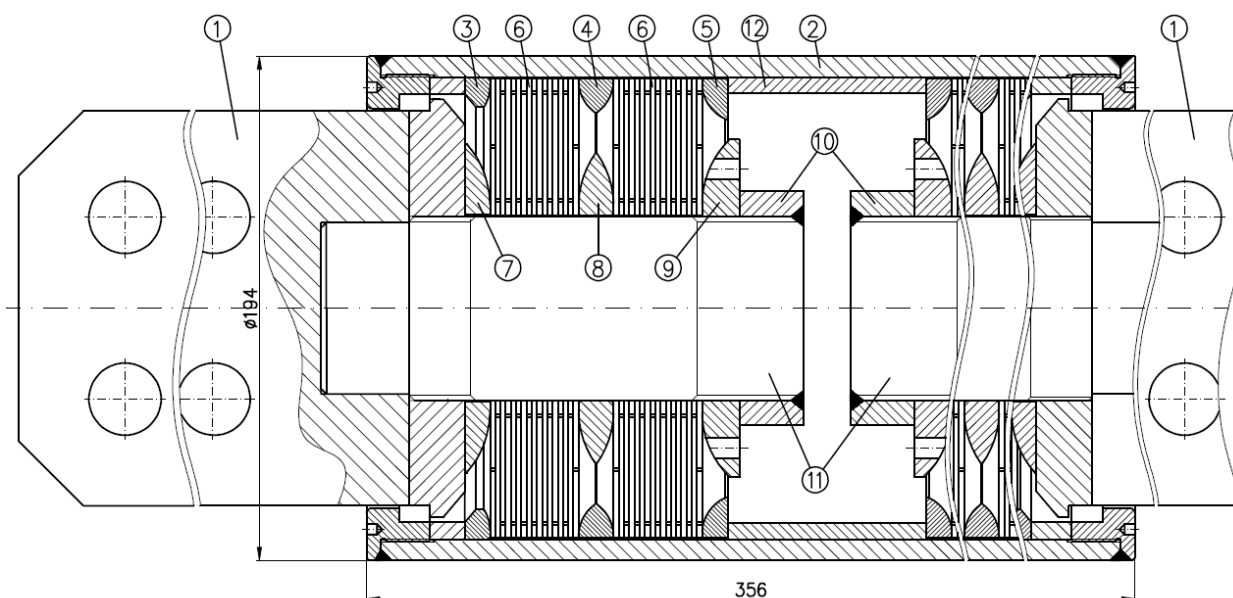


Fig. 4.1 Prototipul amortizorului ȘERB C-194 pentru suprastructură [136] – schiță
1-ureche de prindere; 2-carcasa; 3,4,5-inele profilate de exterior; 7,8,9 – inele profilate de interior;
10-piuliță de fixare; 11-arbore de susținere; 12-distanțier intermediar

Analizând componența și principiul de funcționare, rezultă că, atât componenta elastică cât și componenta histeretică a caracteristicii acestui amortizor pot fi controlate prin modificarea următorilor parametri:

- diametrul și calitatea suprafețelor discurilor elastice;
- numărul discurilor metalice dintr-un pachet;
- numărul pachetelor de discuri metalice ce intră în componența amortizorului;
- forța de prestrângere la montaj a pachetelor de discuri metalice.

4.2.2 Modelarea cu M.E.F. în ANSYS a prototipului ȘERB C-194

Data fiind configurația geometrică a amortizorului, pentru modelarea cu M.E.F. a acestuia, este suficientă realizarea unui model cu elemente finite axi-simetrice care va reduce foarte mult timpul necesar analizelor statice neliniare în ANSYS.

În cazul modelului cu elemente finite axi-simetrice, realizarea modelului geometric se reduce la modelarea în plan a jumătății din secțiunea modelului 3D real. Modelul geometric este prezentat în fig. 4.2 și conține entități grafice de tip *Areas* (suprafețe plane) care au fost ulterior discretizate în elemente finite axi-simetrice așa cum se observă în fig. 4.3 și fig. 4.4. Contactul cu frecare între elemente a fost modelat cu elemente finite de contact tip *node-to-line*.

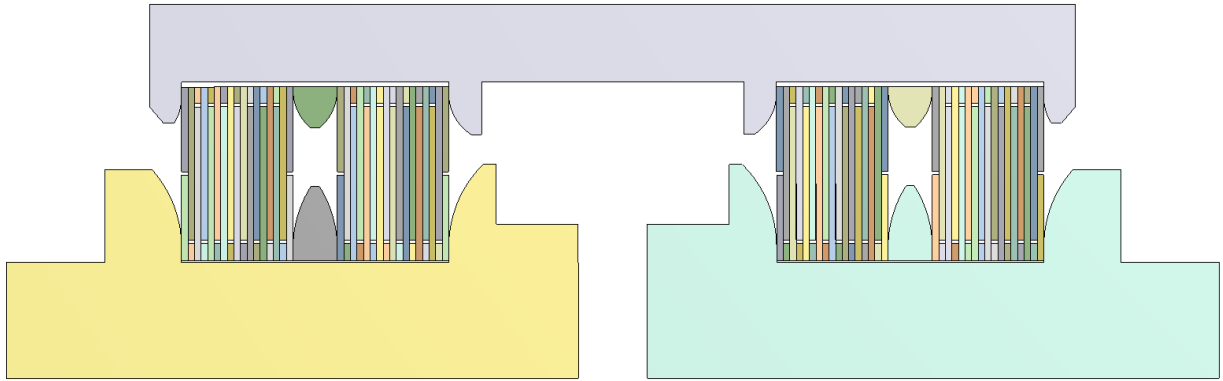


Fig. 4.2 Modelul geometric al prototipului amortizorului ȘERB C-194

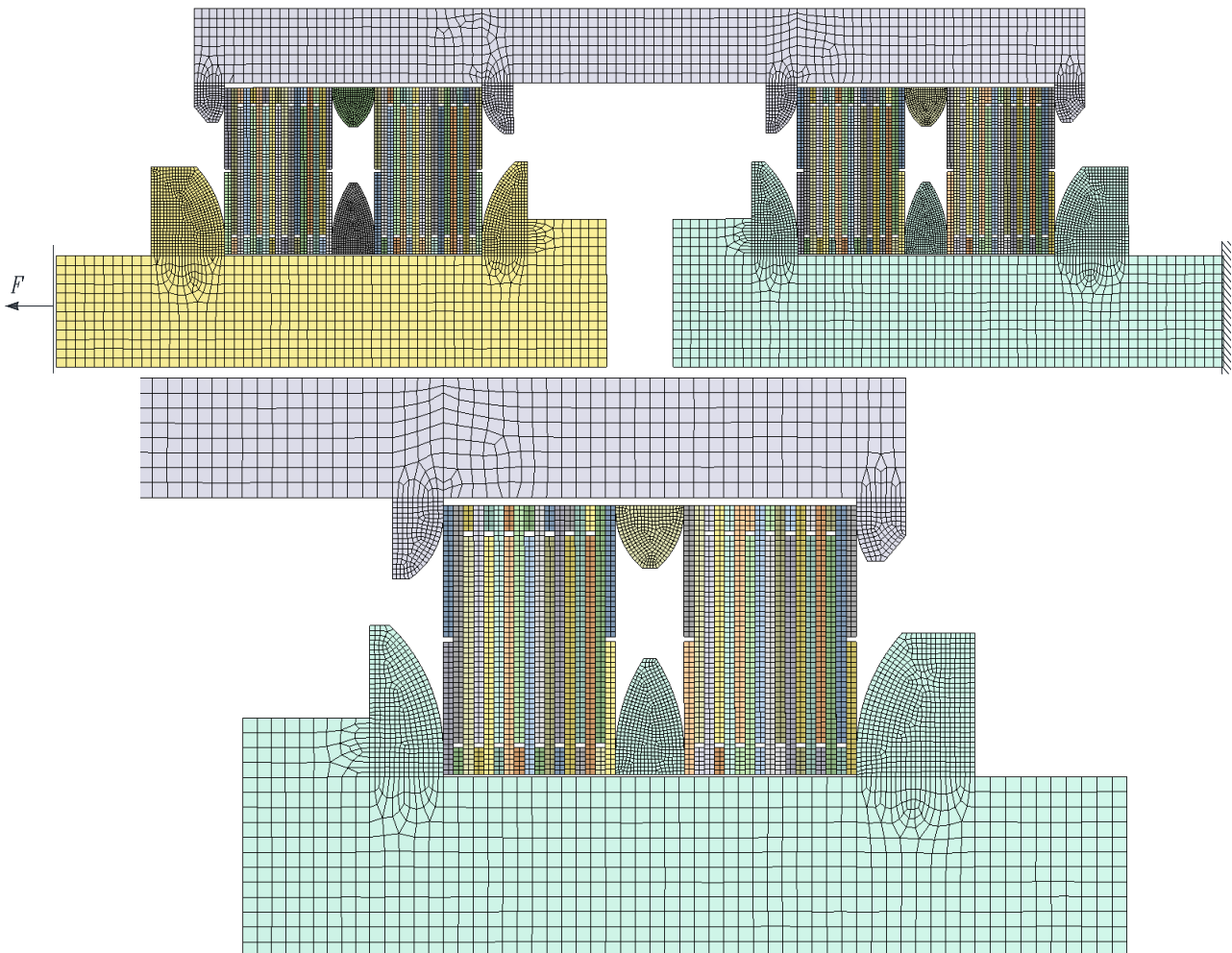


Fig. 4.3 Modelul cu elemente finite integral (sus) și detalii de discretizare (jos), ȘERB C-194

Fig. 4.4 arată reprezentarea 3D a modelului cu elemente finite axi-simetrice pentru prototipul analizat.

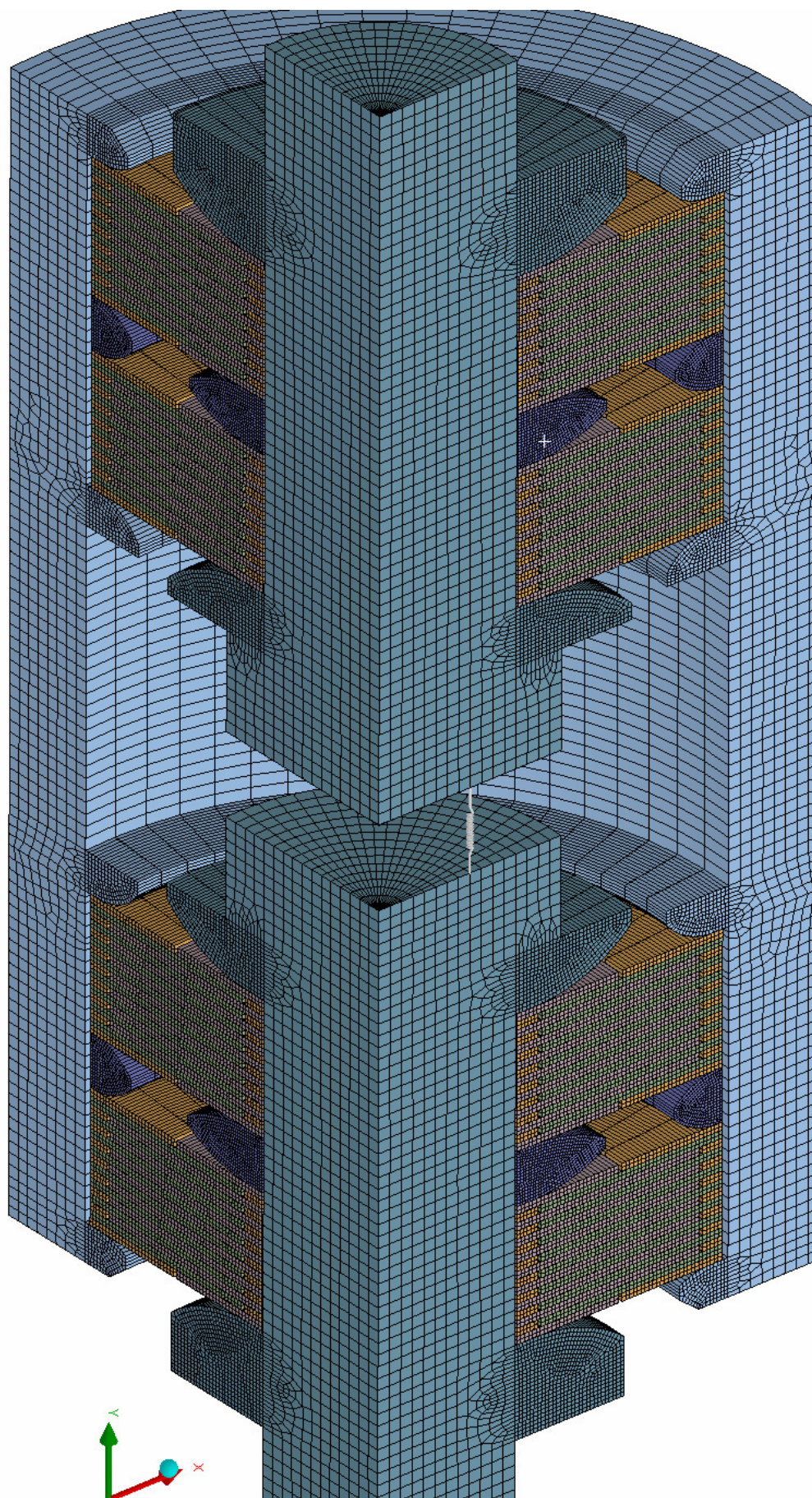


Fig. 4.4 Reprezentarea 3D (pe sfert) a modelului cu elemente finite al prototipului ȘERB C-194

Modelul cuprinde și un element finit de tip resort, cu rigiditate nulă, între cei doi arbori de susținere, observabil în fig. 4.4, pe care l-am introdus pentru a monitoriza cursa amortizorului.

Elementele procesului de modelare numerică sunt:

- materialul pentru discurile metalice este un oțel cu caracteristici speciale care se utilizează în cazul arcurilor și anume 11R51, iar pentru celelalte componente se folosește ca material oțelul OL52;
- pentru suprafețele discurilor metalice în contact s-a folosit coeficientul de frecare $\mu = 0,25$ caracteristic frecării uscate fără lubrifianți între materiale de tip oțel aliat [136].
- încărcarea modelului s-a realizat în mod similar studiului experimental al amortizorului ȘERB C-194 (prezentat în cap. 3), constând dintr-o variație ciclică lentă a forței axiale F cu amplitudinea crescătoare în timp ca în fig. 4.5. Forța F a fost aplicată la capătul exterior al unuia din cei doi arbori de susținere având sensul pozitiv către exteriorul modelului, iar rezemarea a fost aplicată la capătul celălalt prin suprimarea tuturor celor șase grade de libertate ale nodurilor de pe suprafața exterioară (fig. 4.5);

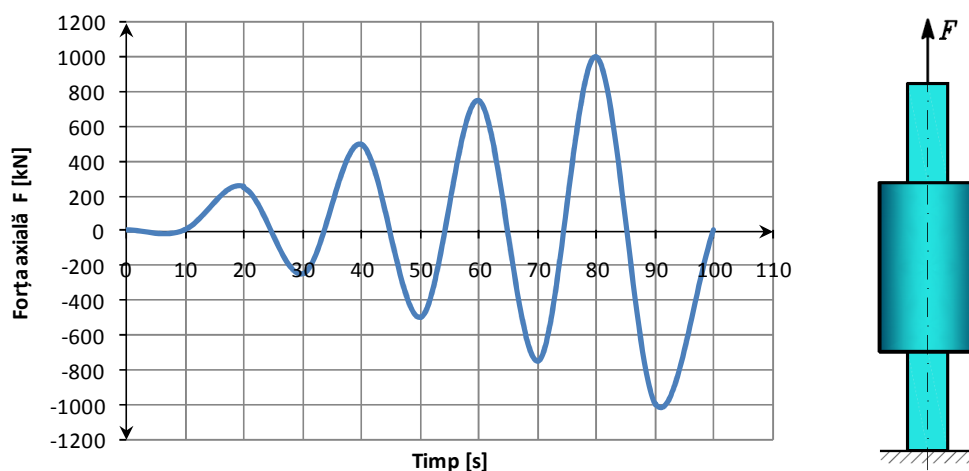


Fig. 4.5 Forța axială F care acționează asupra modelului amortizorului ȘERB C-194

- deoarece frecarea dintre discurile metalice este uscată, fără lubrifianți, considerând coeficientul de frecare independent de viteza relativă, am ales în ANSYS tipul de analiză cvasi-staționară neliniară, cu variația lentă în timp a forței axiale, neliniaritatea fiind dată de elementele de contact cu frecare dintre discurile metalice care intră în componența prototipului.

Principalele rezultate ale analizei în ANSYS sunt prezentate în figurile 4.6 ÷ 4.11.

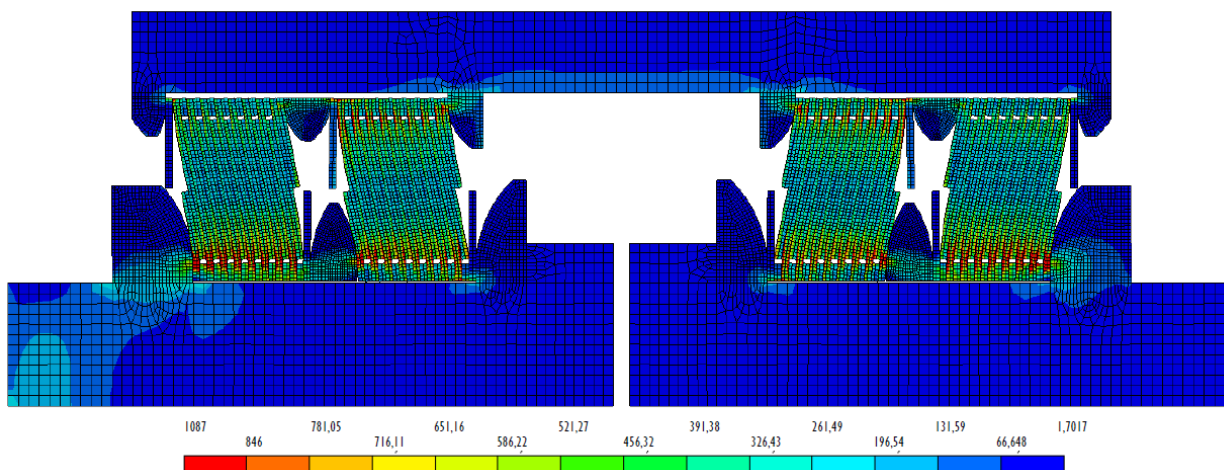


Fig. 4.6 Tensiunile Von Mises [MPa] la timpul $t = 70s$ și forța axială $F = -1000$ kN (compresiune)

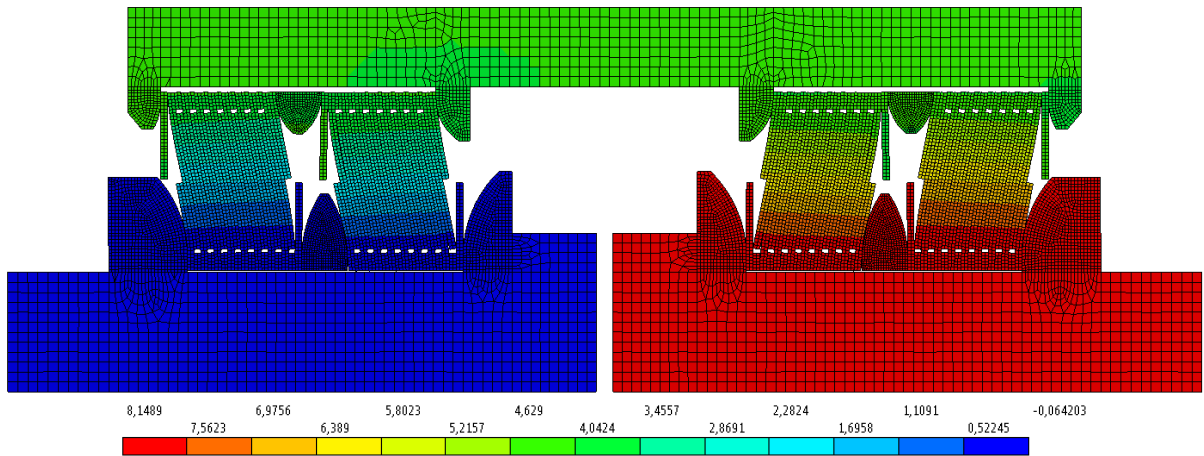


Fig. 4.7 Deplasările axiale [mm] la timpul $t = 70s$ și forța axială $F = -1000$ kN (compresiune)

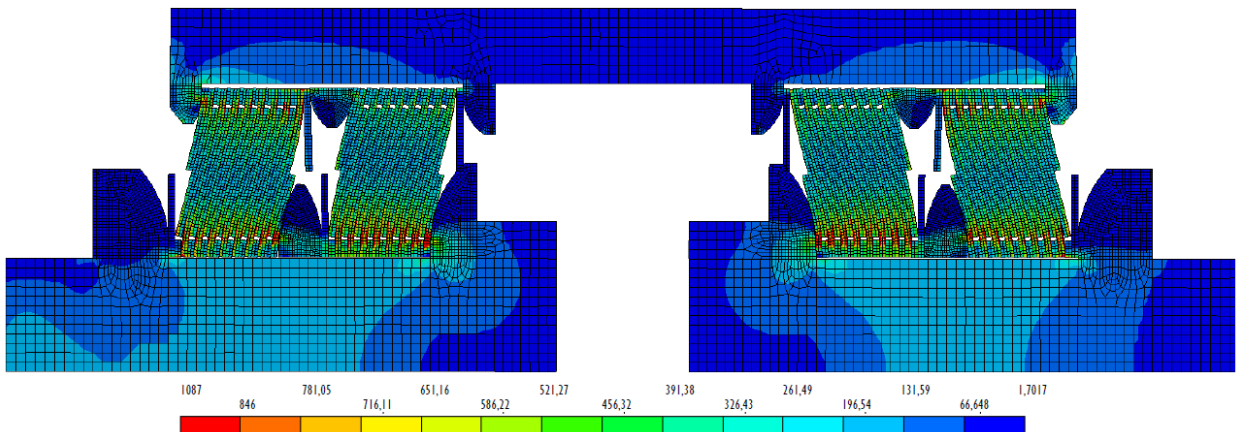


Fig. 4.8 Tensiunile Von Mises [MPa] la timpul $t = 80s$ și forța axială $F = 1000$ kN (întindere)

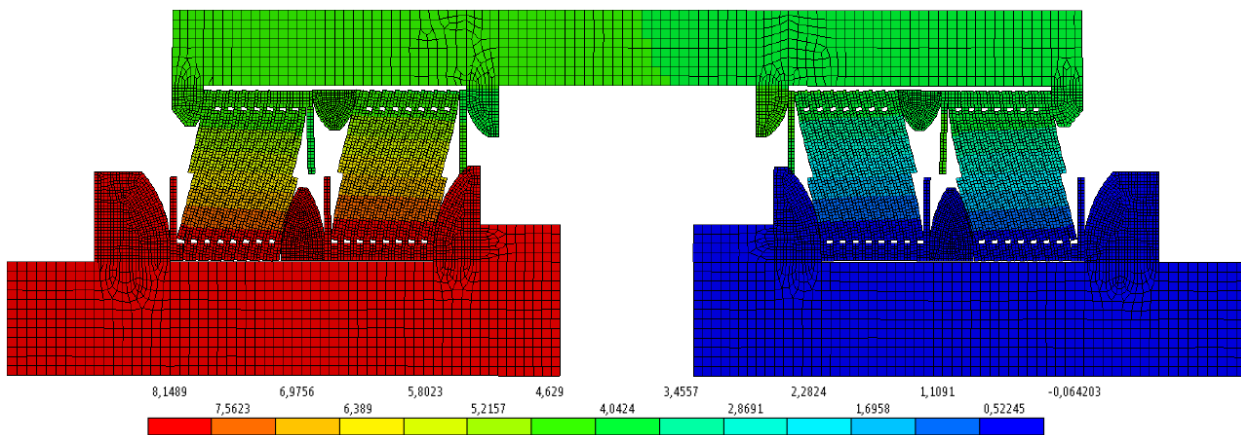


Fig. 4.9 Deplasările axiale [mm] la timpul $t = 80s$ și forța axială $F = 1000$ kN (întindere)

În figurile 4.6 și 4.8 sunt prezentate tensiunile echivalente Von Mises pe care le-am obținut în urma analizei în ANSYS, corespunzătoare valorilor maxime ale forțelor axiale de compresiune (fig. 4.6) și de întindere (fig. 4.8). Valorile maxime ale tensiunii echivalente nu depășesc valoarea maximă admisibilă de 1100 MPa corespunzătoare oțelului 11R51 din care sunt fabricate discurile metalice ale dispozitivului, ceea ce arată un comportament elastic.

În figurile 4.7 și 4.9 sunt prezentate deplasările axiale corespunzătoare valorilor maxime ale forțelor axiale de compresiune (fig. 4.7) și de întindere (fig. 4.9). Se observă că la forțele axiale de 1000 kN, prototipul dispozitivului ȘERB C-194 are o cursă de 8,1 mm atât la întindere cât și la compresiune.

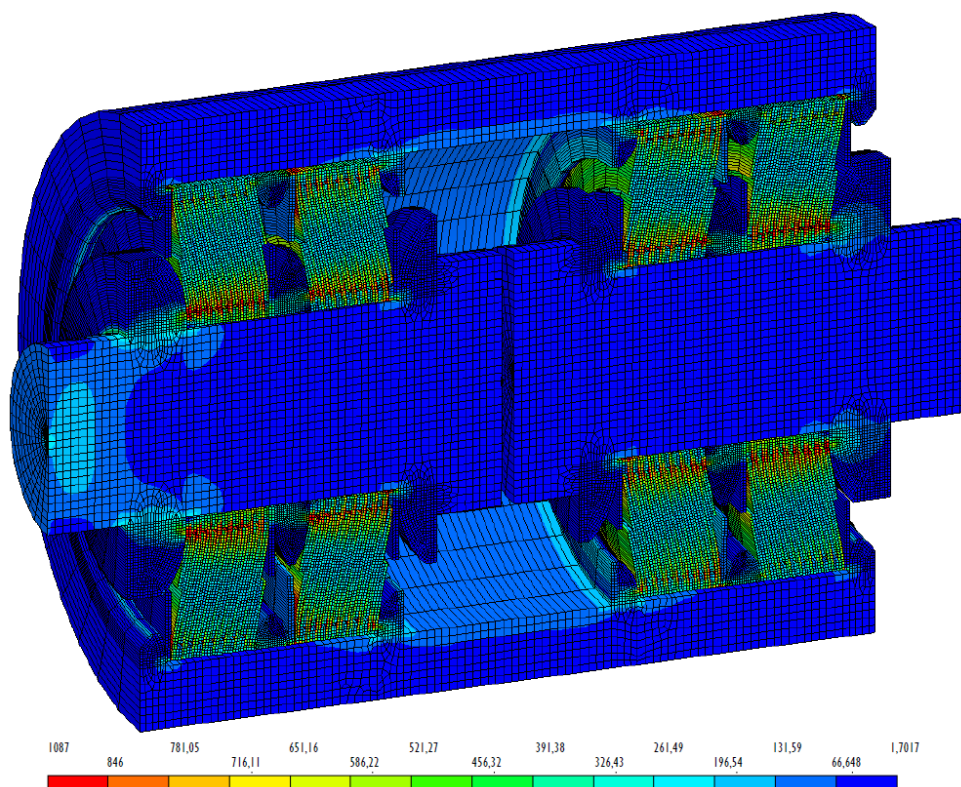


Fig. 4.10 Reprezentare 3D - Tensiunile Von Mises [MPa] la timpul $t = 70s$ și forța axială $F = -1000$ kN

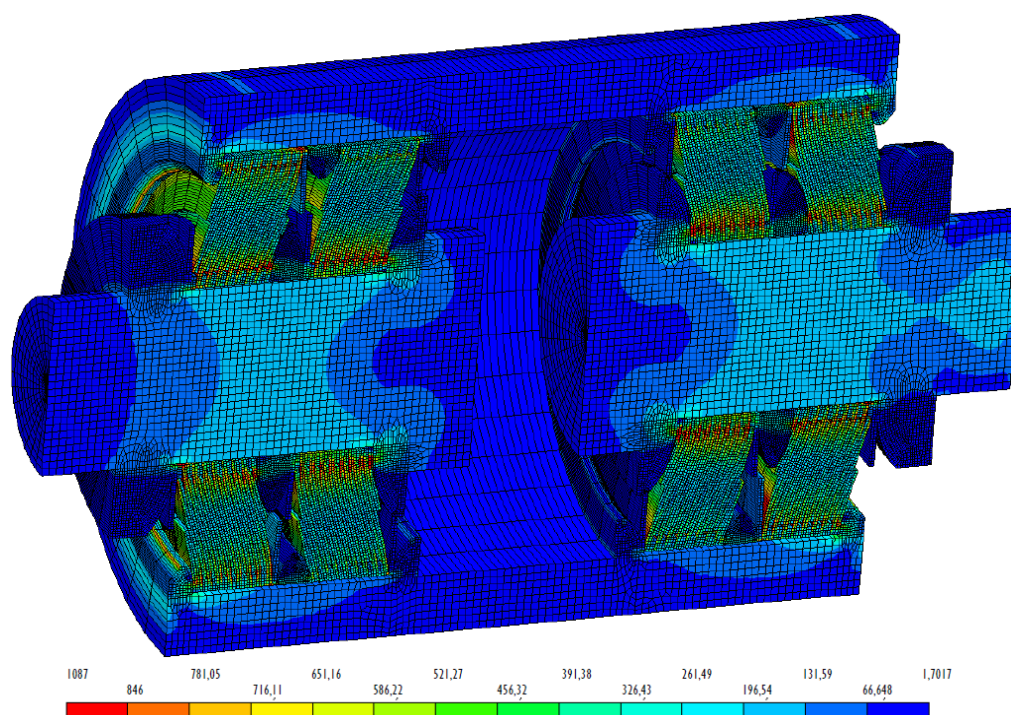


Fig. 4.11 Reprezentare 3D - Tensiunile Von Mises [MPa] la timpul $t = 80s$ și forța axială $F = 1000$ kN

Figurile 4.10 și 4.11 arată reprezentările 3D ale modelului cu elemente finite axi-simetrice multiplicat prin rotație cu 180° . Din aceste figuri, se observă că tensiunile echivalente maxime, în carcasa cilindrică și în arborii de susținere, nu depășesc valoarea de 260 MPa care este inferioară valorii maxime admisibile corespunzătoare oțelului OL52 din care sunt fabricate acestea. Valorile maxime, în aceste componente, apar în zonele de schimbare a secțiunii transversale, evidențiindu-se astfel, zonele cu concentratori de tensiune.

Din figurile 4.6, 4.8, 4.10 și 4.11 care conțin hărțile de tensiuni echivalente, se observă că:

- prezența inelelor profilate interioare și exterioare asigură o repartizare uniformă a tensiunii, care previne apariția zonelor cu concentratori de tensiune în discurile metalice;
 - datorită construcției simetrice a amortizorului ȘERB C-194, starea de tensiuni și deformații este asemănătoare în ambele cazuri de solicitare (întindere și compresiune).
- Datele pe care le-am obținut în urma analizei statice neliniare sunt sintetizate în tab. 4.1.

Tab. 4.1 Rezultate numerice la analiza cu elemente finite a prototipului dispozitivului ȘERB C-194

Timp [s]	Forța axială [kN]	Tensiune echivalentă maximă [MPa]	Deplasare axială [mm]
0	0	0	0
10	250	231	3
20	-250	221	-3
30	500	517	5,2
40	-500	511	-5,2
50	750	820	6,9
60	-750	809	-6,9
70	1000	1087	8,1
80	-1000	1087	-8,1

Pentru a trasa caracteristica de histerezis a amortizorului modelat am extras din *ANSYS*, în urma procesării, variațiile în timp ale forței de tracțiune F și ale deplasării punctului de aplicație a forței. Astfel, rezultă perechile de date forță-deplasare care alcătuiesc bucla de histerezis a amortizorului prezentată în fig. 4.12. Am realizat mai multe analize ale amortizorului în care am modificat doi parametri geometrici care influențează forma buclei de histerezis și anume, diametrul și grosimea discurilor de oțel. Au rezultat trei modele care au fost analizate:

- modelul A - modelul inițial, având bucla de histerezis numerică prezentată în fig. 4.12 A;
- modelul B - model cu diametrul discurilor mai mare cu 5 mm și grosimea acestora mai mare cu 0,2mm, având bucla de histerezis obținută numeric, prezentată în fig. 4.12 B;
- modelul C - model cu diametrul discurilor mai mare cu 6 mm și grosimea acestora mai mare cu 0,3mm, având bucla de histerezis obținută numeric, prezentată în fig. 4.12 C.

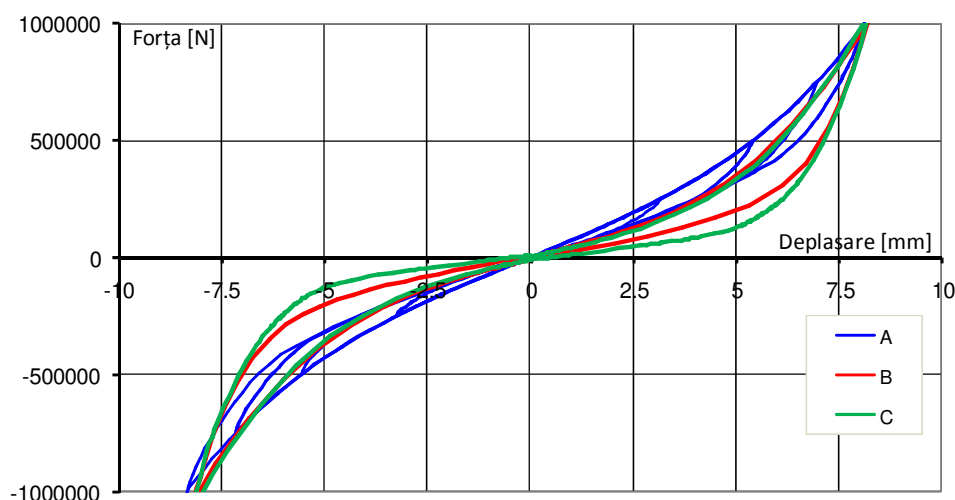


Fig. 4.12 Bucla de histerezis numerică a prototipului amortizorului ȘERB C-194 pentru cele 3 modele A, B, C

Modelul prototipului a fost realizat astfel încât să permită modificarea facilă a dimensiunilor elementelor componente (modelul B și C), în scopul de a evidenția modul în care influențează acești parametri geometrici (diametrul și grosimea discurilor de oțel), forma și dimensiunile buclei histeretice.

Din fig. 4.12 se observă:

- bucla de histerezis obținută este de tipul caracteristicilor elastice neliniare progresive;
- îmbunătățirea performanței histeretice pentru modelele B și C, prin creșterea ariei caracteristicii de histerezis, în cazul C obținându-se o creștere de 35% față de aria corespunzătoare modelului inițial A;
- modelele B și C au o rigiditate elastică mai mică decât a modelului A;
- buclele histeretice ale modelelor B și C au un caracterul progresiv mai pronunțat decât a modelului A;

Acest tip de bucla de histerezis poate fi modelat cu modelul de histerezis Bouc-Wen [99] prezentat în subcapitolul 5.2.5. Din fig. 4.12 se observă însă că, punctele forță-deplasare corespunzătoare amplitudinilor maxime ale forței axiale se află pe aceeași ramură a buclei de histerezis, fapt care nu se petrece la modelul clasic Bouc-Wen. Din acest motiv, în cadrul lucrării de față, am propus în subcapitolul 5.2.5.4 câteva variante modificate ale modelului de histerezis Bouc-Wen clasic, menite să aproximeze mai bine caracteristica de histerezis a acestor amortizori ȘERB pentru modelarea comportamentului la seism a clădirilor echipate cu aceste dispozitive.

4.2.3 Validarea modelului cu elemente finite a amortizorului ȘERB C-194

Pentru validarea modelului cu elemente finite am comparat bucla de histerezis numerică (modelul A) cu datele obținute experimental. Am realizat această comparație doar la nivel calitativ deoarece rezultatele numerice au fost obținute pe un prototip al amortizorului ȘERB C-194 testat experimental. În fig. 4.13 sunt prezentate cele două bucle de histerezis obținute în urma celor două studii.

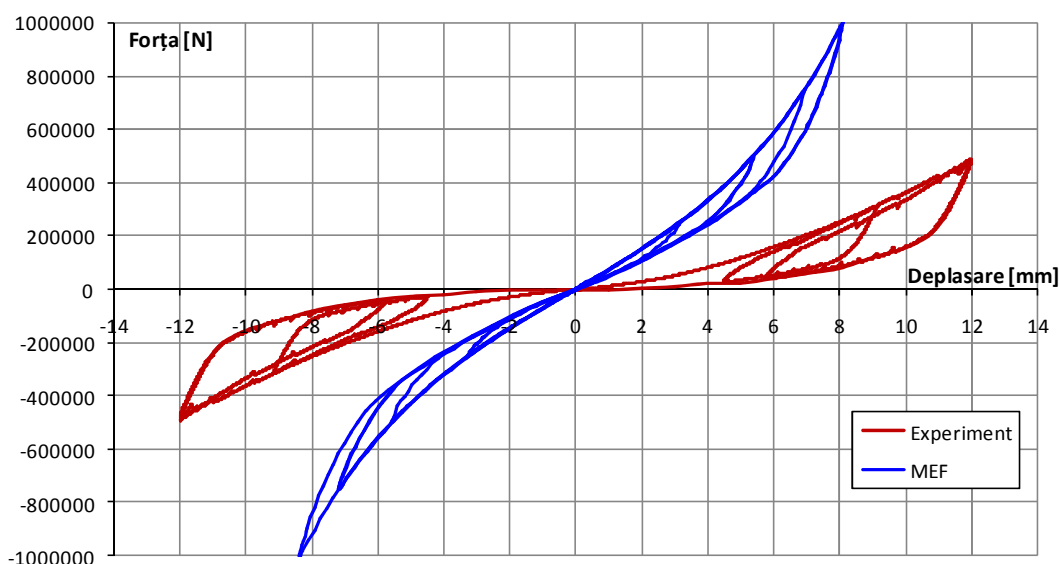


Fig. 4.13 Buclele de histerezis determinate numeric și experimental

Analizând calitativ cele două bucle de histerezis obținute experimental și numeric (fig. 4.13) se observă că:

- ambele bucle de histerezis au aceeași formă fiind caracteristici neliniar-elastice progresive;

- punctele forță-deplasare corespunzătoare amplitudinilor maxime ale forței de tracțiune se află pe aceeași ramură a buclei de histerezis în ambele tipuri de analiză.

Din punct de vedere calitativ, rezultatele oferite de analiza numerică sunt foarte asemănătoare cu rezultatele obținute experimental, fapt care validează procesul de modelare numerică a prototipului ȘERB folosind metoda elementelor finite.

În concluzie, acest model numeric poate fi folosit pentru dimensionarea parametrilor geometrici ai elementelor componente în scopul obținerii unor bucle de histerezis adecvate anumitor categorii de structuri.

4.2.4 Concluzii privind amortizorul ȘERB C-194

Prototipul amortizorului ȘERB C-194 poate fi modelat cu elemente finite axi-simetrice și elemente finite de contact *node-to line* care modelează contactul cu frecare uscată dintre discurile metalice componente. Modelul astfel obținut este supus unei analize statice neliniare.

Modelul prezentat în acest subcapitol reprezintă prima modelare numerică a acestor tipuri de dispozitive care sunt dificil de modelat cu alte metode sau cu alte programe software de analiză.

În urma analizei rezultatelor obținute la modelarea numerică în *ANSYS*, se pot concluziona următoarele:

- caracteristica de histerezis nu are o formă obișnuită și, din acest motiv, nu poate fi modelată cu programele uzuale de analiză la seism care nu conțin modele matematice de histerezis specifice acestei forme;
- rigiditatea discurilor metalice influențează caracterul progresiv al buclei de histerezis;
- forma și dimensiunile buclei de histerezis sunt influențate de numărul, diametrul și grosimea discurilor metalice, precum și de calitatea suprafețelor de frecare;
- valorile maxime ale tensiunilor Von Mises care apar în discurile metalice la valori ale forței axiale de 1000 kN sunt în jur de 1100 MPa, valori care sunt acceptabile pentru oțelul special 11R51 din care sunt fabricate acestea, situându-se sub limita de curgere, deformarea realizându-se în regim elastic;
- caracteristica de histerezis specifică acestor amortizori, prin caracterul elastic, neliniar și progresiv, permite o creștere accentuată a forței la creșterea deplasării relative de nivel, fenomen care accentuează limitarea acestor deplasări la seism;
- modelul cu elemente finite al prototipului ȘERB a fost validat pe baza comparării calitative a buclei de histerezis forță-deplasare obținută numeric cu cea obținută experimental pentru amortizorul ȘERB C-194.

4.3 Amortizorii telescopici pentru fundație ȘERB TEL-150

Amortizorii telescopici ȘERB sunt destinați montării în fundația clădirilor în paralel cu sistemul de izolare seismică. Aceste dispozitive histeretice există în mai multe variante constructive având curse mari de până la ± 30 cm și dezvoltă forțe axiale de până la 2000 kN, fiind de până la cinci ori mai ieftini decât amortizorii cu fluid vâscos cu aceeași destinație.

În acest subcapitol este prezentată modelarea cu metoda elementelor finite a amortizorului telescopic ȘERB TEL-150 pentru care inventatorul ne-a oferit documentația tehnică.

4.3.1 Principiul de funcționare

Amortizorii telescopici ȘERB TEL-150 (fig. 4.14) sunt construiți dintr-un ax longitudinal profilat (1) care, la deplasarea în timpul seismului, determină apariția fenomenului de frecare între suprafața sa profilată și o patină semicilindrică (2). Aceasta execută o mișcare de rotație în jurul axei sale însoțită de frecarea între suprafața sa cilindrică și un suport concav (5) care este presat de un set de lamele metalice (4). Acest set de lamele funcționează ca un resort a cărui rigiditate se poate controla printr-un sistem de șuruburi care determină tensionarea sau detensionarea lamelelor (4). Forța din acest resort este transmisă suportului concav (5) printr-un corp cu suprafață sferică convexă (3) care distribuie cât mai uniform această forță transmițând-o patinei semicilindrice (2).

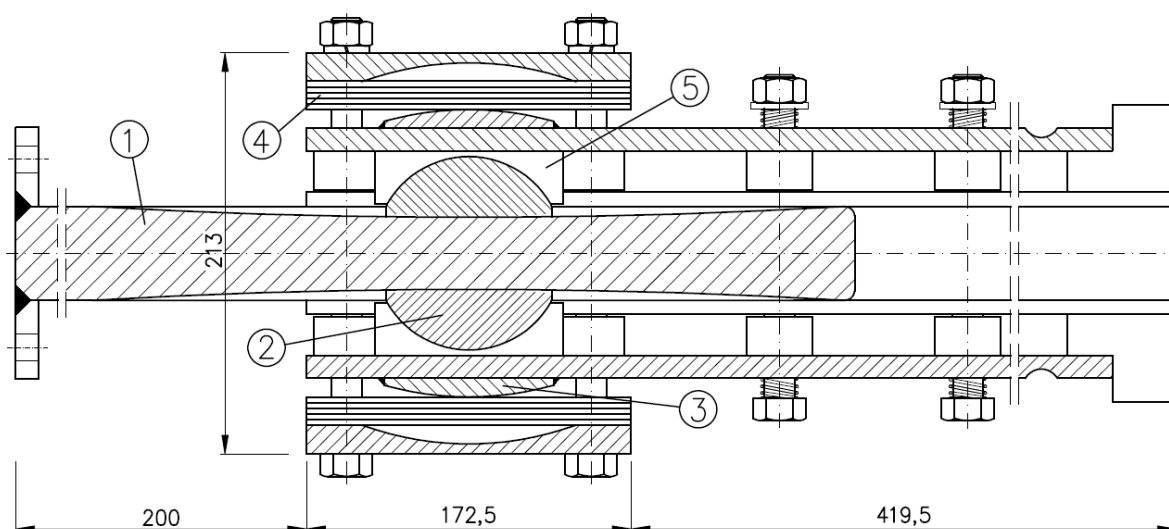


Fig. 4. 14 Amortizor telescopic pentru fundație ȘERB TEL-150 [136]

1-ax longitudinal profilat; 2-patină semicilindrică; 3-corp convex; 4-lamele metalice; 5-suport concav

Suportul concav (5) are rolul evitării apariției de concentratori de tensiuni în zonele de contact de pe suprafața patinei semicilindrice (2) și contribuie la distribuirea acestor tensiuni cât mai uniform de-a lungul acestei suprafețe. Suportul (5) determină și apariția unui fenomen de frecare suplimentar care contribuie la obținerea unei bucle de histerezis cât mai avantajoase.

4.3.2 Modelarea cu M.E.F. în ANSYS a amortizorului ȘERB TEL-150

Datorită simetriei față cele două planuri longitudinale a geometriei și încărcării amortizorului, în ANSYS a fost suficientă modelarea pe sfert a geometriei acestuia (fig. 4.15).

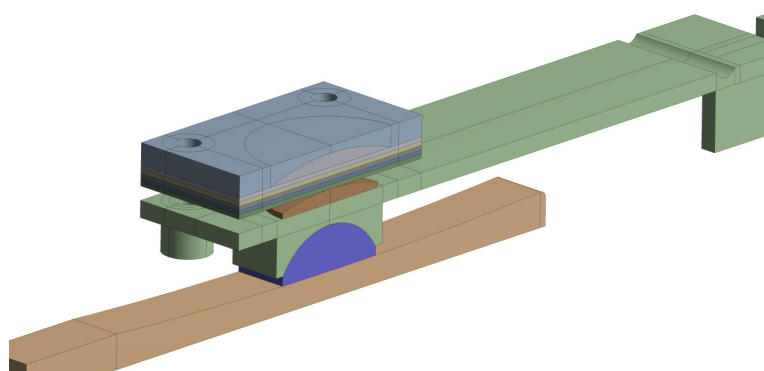


Fig. 4.15 Modelul geometric al amortizorului (un sfert din structura amortizorului ȘERB TEL-150)

Pentru discretizarea modelului geometric s-au folosit elemente finite 3D și elemente de contact *surface to surface* pentru suprafețele în contact. Modelul final cu elemente finite s-a obținut prin multiplicare *Mirror* față de planul xOz, a elementelor finite din modelul geometric

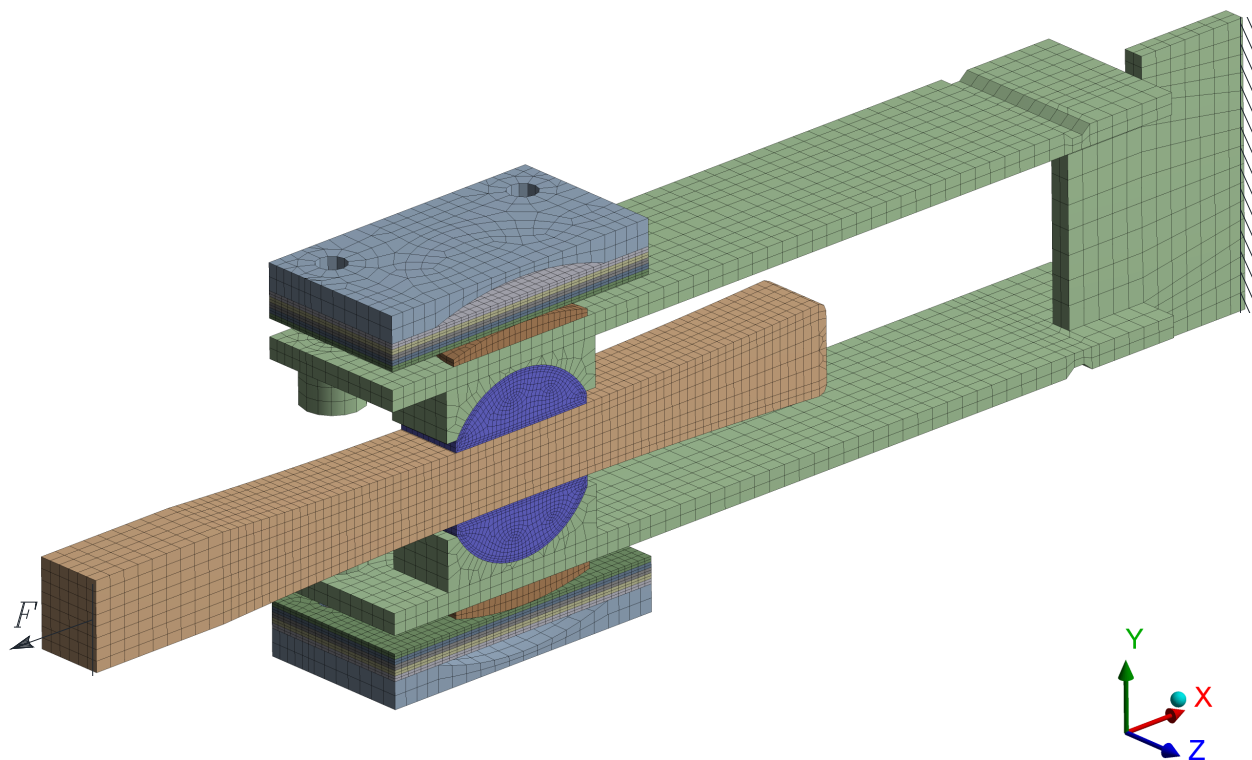


Fig. 4.16 Modelul cu elemente finite (jumătate din structura amortizorului ȘERB TEL-150)

Așa cum se observă din figurile 4.16 și 4.17, am ales opțiunea de discretizare *Mapped Mesh* care permite stabilirea numărului și a dimensiunilor elementelor finite ale fiecărui element de geometrie în parte. Frecarea între suprafețele de contact fiind uscată, iar elementele fiind toate din oțel am considerat valoarea coeficientului de frecare $\mu = 0,3$ în baza testelor experimentale realizate de inventator [136].

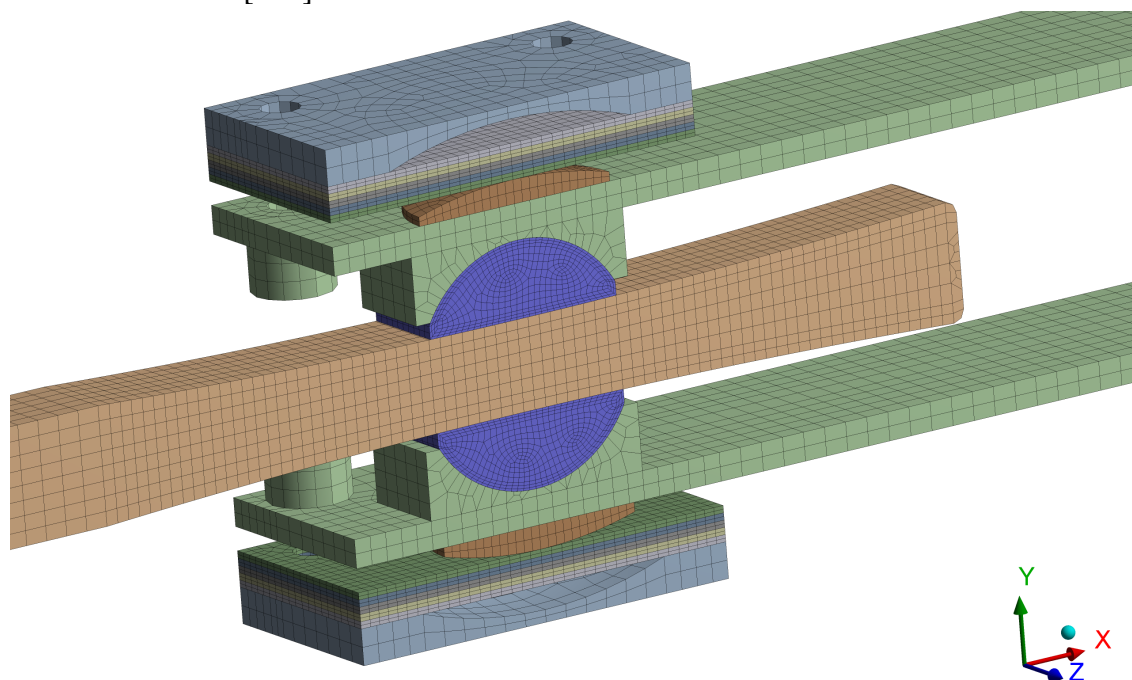


Fig. 4.17 Reprezentarea pe jumătate a modelului cu elemente finite în ANSYS – detaliu (ȘERB TEL-150)
Condițiile de contur pe care le-am considerat pentru analiză sunt:

- rezemarea structurii s-a realizat prin încastrarea unui capăt al tijei amortizorului și anume placuța verticală care unește cele două brațe longitudinale ale amortizorului (fig. 4.18);
- încărcarea structurii are loc prin deplasări impuse axului longitudinal (d_A), în mod analog condițiilor de testare experimentală, graficul variației deplasării în timp fiind prezentat în fig. 4.18. Forța axială din amortizor F , corespunzătoare deplasării impuse d_A , este egală cu reacțiunea din încastrare (fig. 4.18).

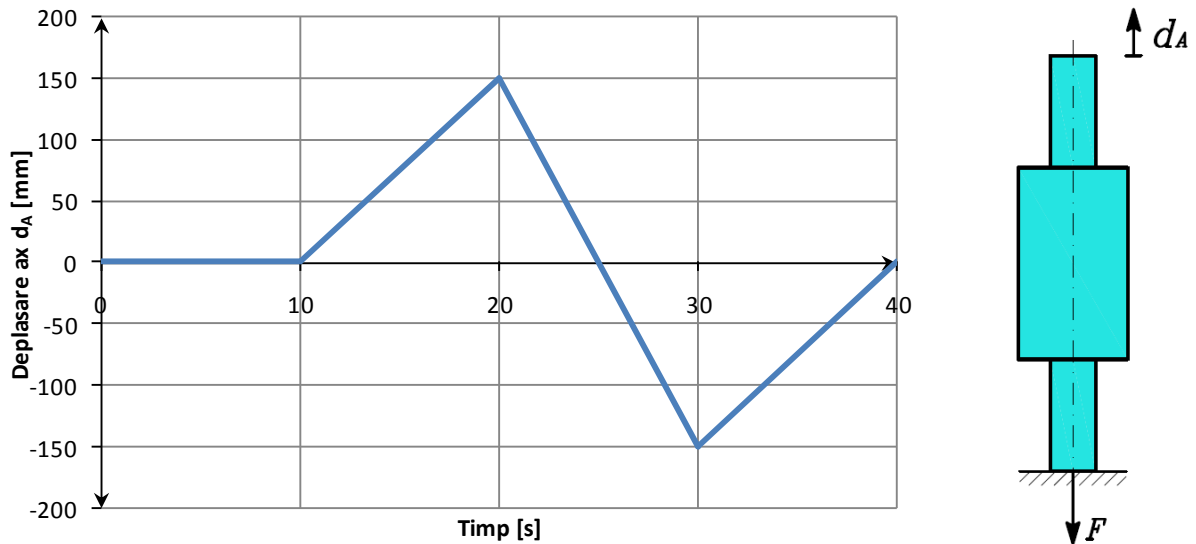


Fig. 4.18 Încărcarea și rezemarea modelului amortizorului ȘERB TEL-150

Așa cum se observă din fig. 4.18 în perioada 0s ÷ 10s axul stă în poziție centrală nemișcat, deoarece în această primă fază are loc tensionarea sistemului de lamele metalice prin deplasarea impusă corpurilor cu concavitate sferică, cu 5 mm spre axul longitudinal al amortizorului, modelându-se astfel strângerea șuruburilor care controlează tensionarea. Această tensionare a lamelor controlează mărimea forței de frecare între patina semicilindrică și axul longitudinal profilat, influențând astfel forma și dimensiunile caracteristicii histeretice forță-deplasare.

Materialul lamelor metalice și al elementului sferic convex este oțelul 11R51, cu limita de elasticitate 1100 MPa, iar pentru celelalte elemente cu excepția patinei semicilindrice, care este realizată din fontă Fc250, se utilizează un oțel OL52 cu limita elastică de 270 Mpa [136].

Am ales ca tipul analizei în ANSYS să fie analiza neliniară realizată în regim staționar, deoarece frecarea dintre suprafețele în contact este uscată, fără lubrifiianți.

Modelarea numerică a comportamentului amortizorului telescopic ȘERB în timpul seismului s-a realizat prin încărcarea modelului cu elemente finite în patru etape succesive:

- etapa 1 – cu durata de 10 s (intervalul de timp 0s ÷ 10s), în care axul longitudinal rămâne în poziție centrală și se tensionează lamelele prin impunerea unei deplasări de 5 mm pe direcția Oy celor două suporturi ale lamelor metalice, simetric către axul amortizorului;
- etapa 2 – cu durata de 10 s (intervalul de timp 10s ÷ 20s), în care are loc deplasarea impusă a axului profilat cu 150 mm pe direcția negativă a axei Ox;
- etapa 3 – cu durata de 10 s (intervalul de timp 20s ÷ 30s), în care are loc deplasarea impusă a axului profilat cu 300 mm pe direcția pozitivă a axei Ox, axul trecând prin poziția centrală;
- etapa 4 – cu durata de 10 s (intervalul de timp 30s ÷ 40s), în care are loc revenirea axului în poziție centrală prin deplasarea impusă a acestuia cu 150 mm pe direcția negativă a lui Ox.

Principalele rezultate pe care le-am obținut în urma analizei sunt prezentate în figurile 4.19÷4.23:

B: Static Structural

Type: Equivalent (von-Mises) Stress (Average Across Bodies)

Unit: MPa

Time: 2

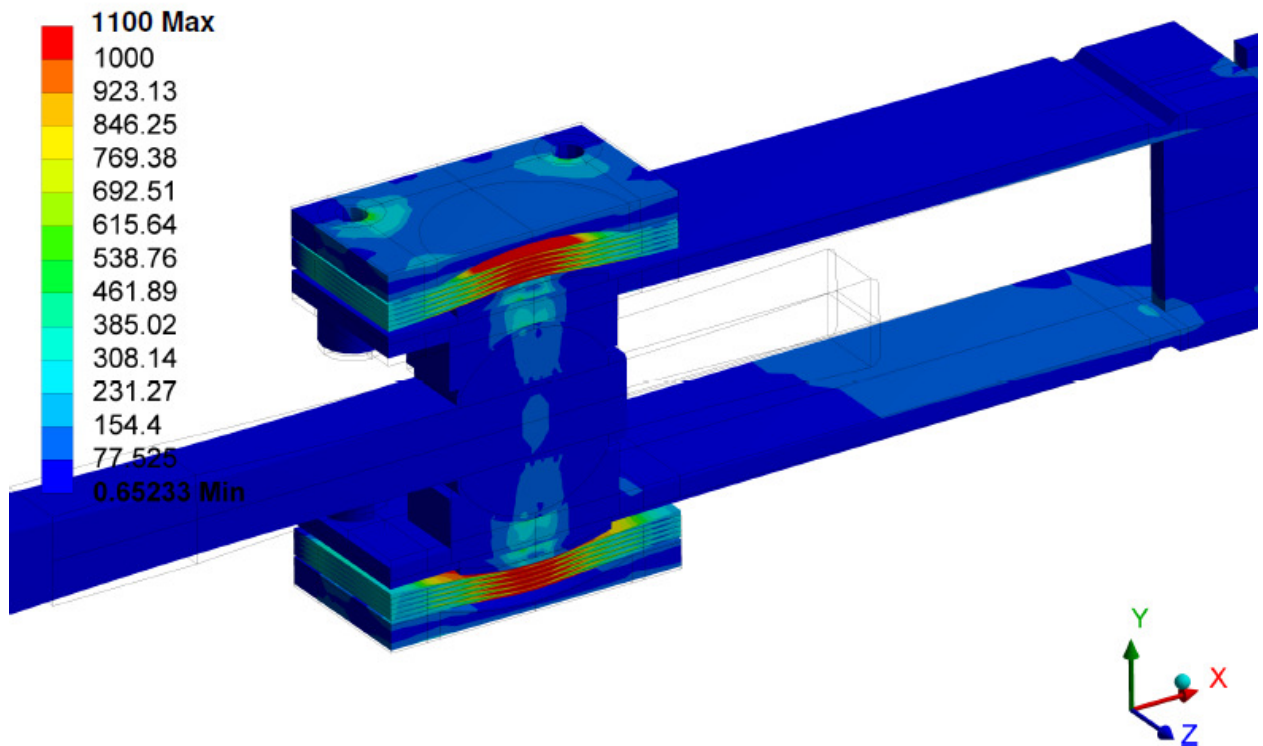


Fig. 4.19 Tensiuni Von Mises la sfârșitul etapei 2 - deplasare ax la 150 mm pe Ox

B: Static Structural

Type: Equivalent (von-Mises) Stress (Average Across Bodies)

Unit: MPa

Time: 3

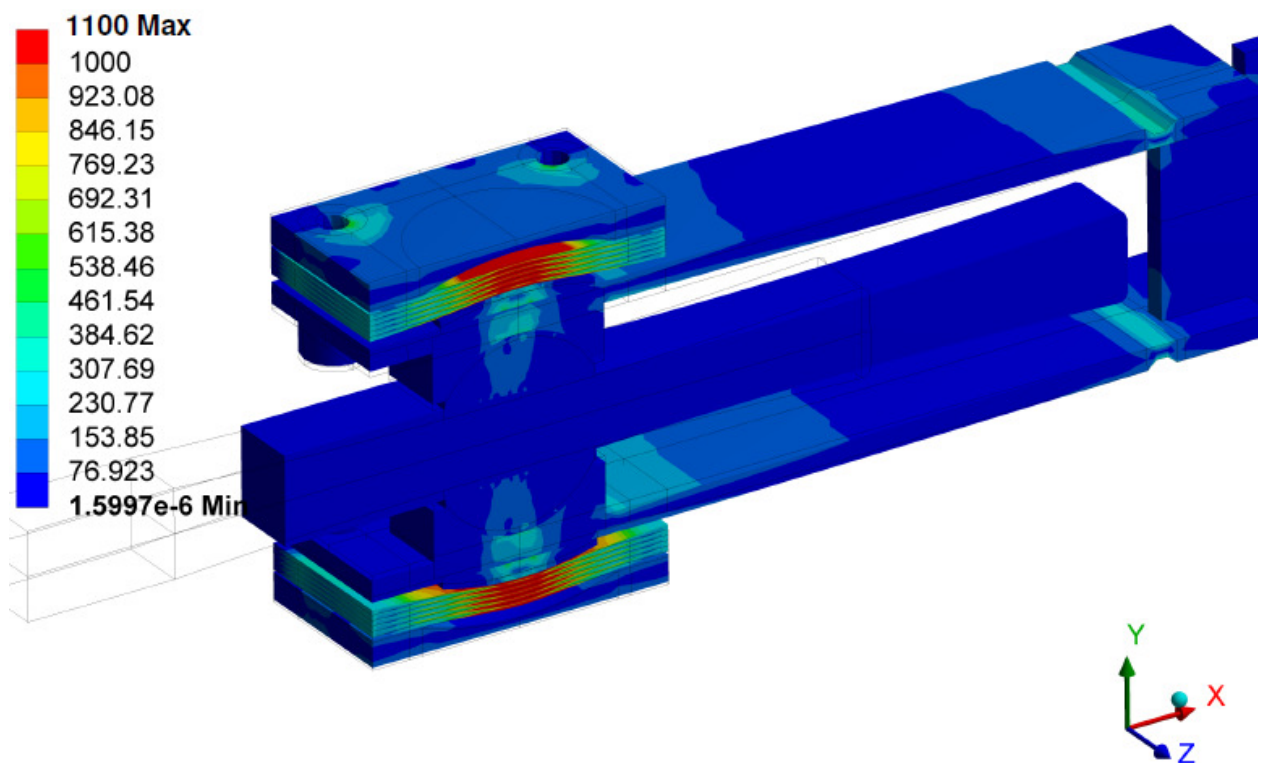


Fig. 4.20 Tensiuni Von Mises la sfârșitul etapei 3 - deplasare ax la -150 mm pe Ox

B: Static Structural

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 2

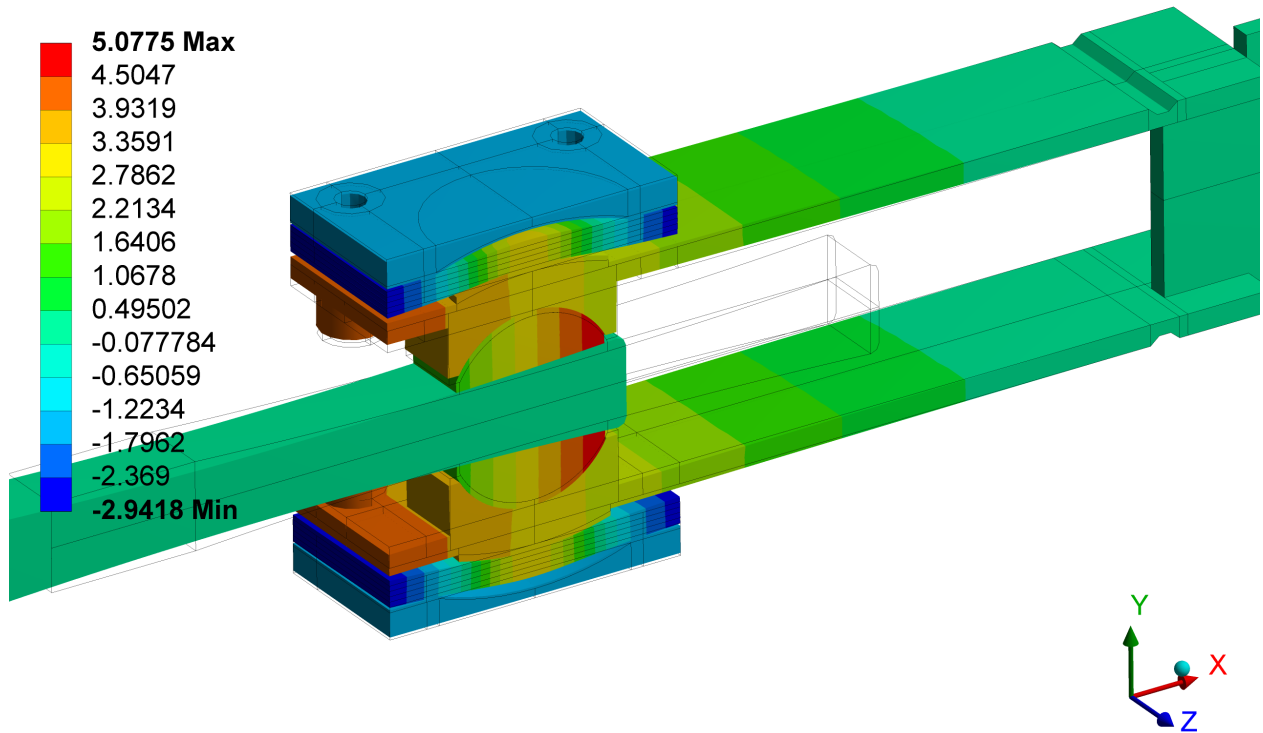


Fig. 4.21 Deplasarea de-a lungul axei Oy la sfârșitul etapei 2 de analiză

B: Static Structural

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 3

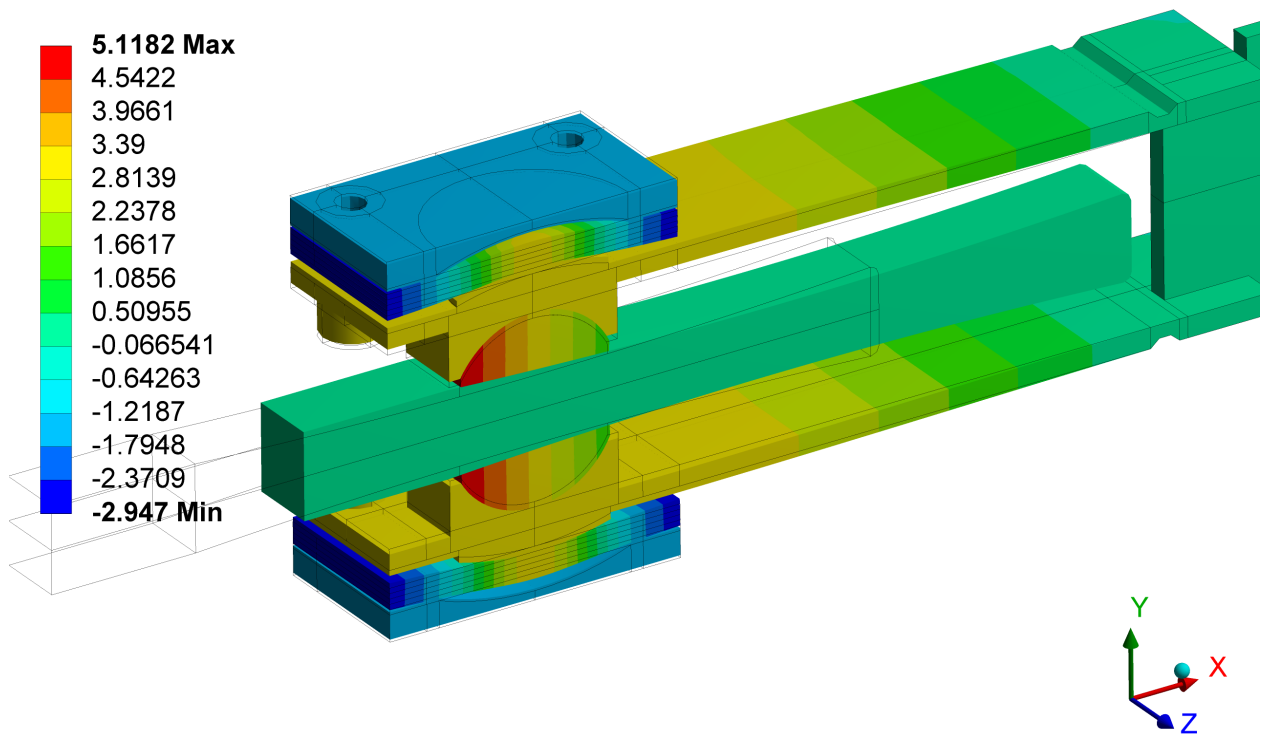


Fig. 4.22 Deplasarea de-a lungul axei Oy la sfârșitul etapei 3 de analiză

Din analiza rezultatelor pe care le-am obținut în urma postprocesării și pe care le-am prezentat parțial în figurile 4.19-4.22, se observă că valoarea maximă a tensiunilor echivalente Von Mises este 1100 Mpa și se atinge în materialul lamelelor metalice tensionate la capătul cursei amortizorului. Această valoare este egală cu tensiunea maximă admisibilă corespunzătoare oțelului 11R51 din care sunt acestea confecționate. Valoarea maximă a tensiunii echivalente în componentele realizate din OL52 este 265 MPa, care este inferioară tensiunii maxime admisibile, de unde rezultă că deformarea componentelor are loc în domeniul elastic.

Datele pe care le-am obținut în urma analizei statice neliniare sunt sintetizate în tab. 4.2.

Tab. 4.2 Rezultate numerice la analiza cu elemente finite a dispozitivului ȘERB TEL-150

Timp [s]	Forța axială [kN]	Tensiune echivalentă maximă [MPa]	Deplasare axială [mm]
0	0	0	0
10	0	346 (în lamele)	0
20	900	1100 (în lamele)	150
30	-900	1100 (în lamele)	-150
40	0	0	0

Pentru a trasa caracteristica de histerezis a amortizorului modelat am extras din ANSYS, în urma procesării, variațiile în timp ale reacțiunii din încastrare și ale deplasării împuse axului profilat d_A . Astfel, rezultă perechile de date forță-deplasare care alcătuiesc bucla de histerezis a amortizorului prezentată în fig. 4.23.

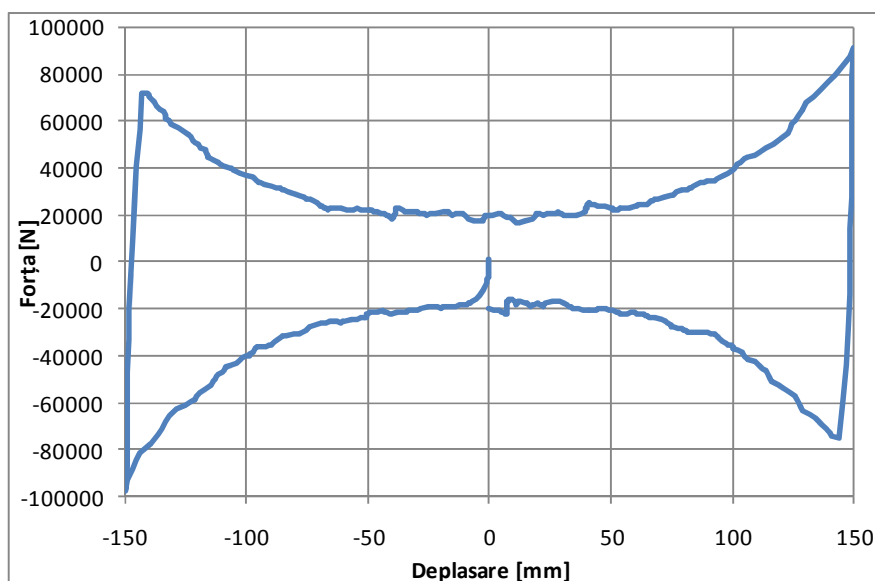


Fig. 4.23 Bucla de histerezis a amortizorului ȘERB TEL-150, obținută cu M.E.F. în ANSYS

Se observă că forma buclei de histerezis este o formă tip Papion care este extrem de utilă în procesul de disipare a energiei seismice a clădirii deoarece aria de histerezis se mărește la deplasări mari, fenomen care susține micșorarea deplasărilor și micșorarea energiei seismice preluate de clădire. De asemenea, se observă o mărire progresivă a forței de amortizare odată cu mărirea deplasării, fenomen care conduce și la limitarea deplasării maxime a clădirii față de sol. Forțele de amortizare maxime care se pot obține cu astfel de dispozitive pot ajunge până la 2000 kN la deplasări extreme de 30 cm [136].

Din analiza structurii amortizorului și a caracteristicii de histerezis se poate deduce că forma buclei de histerezis specifică acestor amortizori telescopici poate fi ușor influențată prin modificarea curburii profilului de pe axul longitudinal profilat. Astfel, prin micșorarea razei de curbura se obține o creștere rapidă a forței de amortizare odată cu deplasarea axului, iar o mărire a razei de curbura atrage după sine o creștere mai lentă a acesteia.

Acest tip de bucla de histerezis este dificil sau chiar imposibil de modelat cu modelele clasice de histerezis. Din acest motiv, în cadrul lucrării de față, am folosit un model Bouc-Wen modificat de inventator [136] și prezentat în subcapitolul 5.2.5.6, pentru modelarea comportamentului la seism a clădirilor echipate cu aceste dispozitive.

4.3.3 Validarea modelului cu elemente finite a amortizorului ȘERB TEL-150

Pentru a valida corectitudinea acestui model cu elemente finite am realizat compararea rezultatelor obținute în urma modelării numerice cu datele pe care le-am obținut experimental, prezentate în capitolul 3.

Variantele constructive ale amortizorului ȘERB TEL-150, pe care s-au realizat analiza experimentală și cea numerică au fost identice atât din punct de vedere al elementelor componente (forme și dimensiuni geometrice), cât și din punctul de vedere al forței de prestrângere din șuruburile care produc tensionarea lamelelor metalice. Datorită acestui motiv, condițiile de analiză în cele două cazuri, experimental și numeric, au fost identice. Cele două bucle de histerezis pe care le-am obținut numeric și experimental sunt prezentate în fig. 4.24.

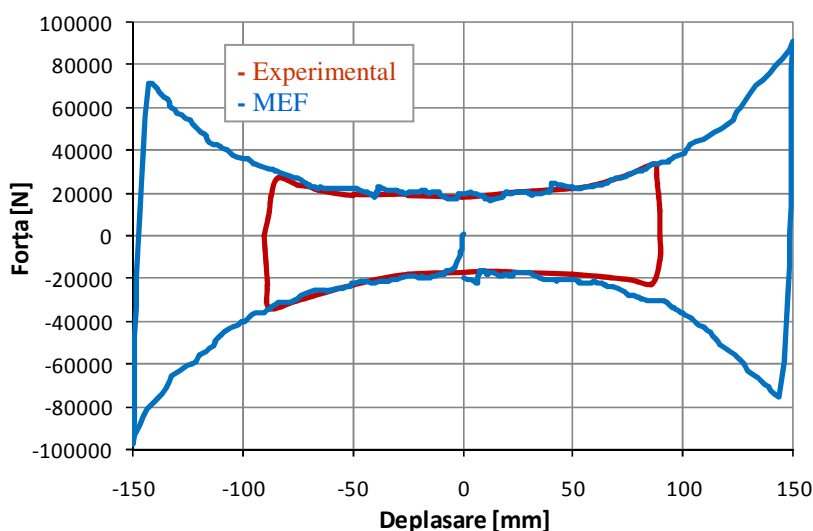


Fig. 4.24 Buclele de histerezis ale amortizorului ȘERB TEL-150 obținute numeric și experimental

Se observă că în domeniul de variație a deplasării cuprins între (-80 mm, +80 mm), specific analizei experimentale efectuate, graficele celor două bucle de histerezis se suprapun, fapt care validează modelul cu elemente finite realizat.

Acest fapt validează întregul proces de modelare numerică a amortizorului ȘERB TEL-150 folosind metoda elementelor finite.

În concluzie, acest model numeric poate fi folosit pentru dimensionarea parametrilor geometrici ai elementelor componente în scopul obținerii unor bucle de histerezis adecvate anumitor categorii de structuri.

4.3.4 Concluzii privind amortizorul ȘERB TEL-150

Dispozitivul ȘERB TEL-150 poate fi modelat cu elemente finite 3D și elemente finite de contact *surface-to-surface* care modelează contactul cu frecare uscată dintre elementele componente. Modelul astfel obținut este supus unei analize statice neliniare.

Modelul prezentat în acest subcapitol reprezintă prima modelare numerică a acestor tipuri de dispozitive care sunt dificil de modelat cu alte metode sau cu alte programe software de analiză.

În urma analizei rezultatelor obținute la modelarea numerică în *ANSYS*, se pot concludiona următoarele:

- caracteristica de histerezis are o formă tip Papillon, neobișnuită pentru dispozitivele histeretice, din acest motiv, neputând fi modelată cu programele uzuale de analiză la seism care nu conțin modele matematice de histerezis specifice acestei forme;
- rigiditatea lamelelor metalice influențează caracterul progresiv al buclei de histerezis;
- forma și dimensiunile buclei de histerezis sunt influențate de profilul axului longitudinal precum și de calitatea suprafețelor de frecare;
- valorile maxime ale tensiunilor Von Mises care apar în lamelele metalice sunt în jur de 1100 MPa, valori care sunt acceptabile pentru oțelul special 11R51 din care sunt fabricate acestea, situându-se sub limita de curgere, deformarea realizându-se în regim elastic;
- caracteristica de histerezis specifică acestor amortizori, prin caracterul elastic, neliniar și progresiv, permite o creștere accentuată a forței axiale la creșterea deplasării din amortizor, fenomen care accentuează limitarea deplasărilor în timpul seismului;
- modelul cu elemente finite al amortizorul ȘERB TEL-150 a fost validat pe baza comparării buclei de histerezis forță-deplasare obținută numeric cu cea obținută experimental.

4.4 Concluzii finale

Amortizorii ȘERB destinați echipării antiseismice a clădirilor, la suprastructură sau în fundație, sunt structuri relativ complexe care au în componența lor un număr mare de elemente în contact cu frecare, aflate în mișcare relativă. Fenomenele mecanice care apar în timpul seismului, sunt complexe și din acest motiv, aceste dispozitive nu au putut fi modelate până în prezent.

Cele două modele cu elemente finite pe care le-am propus în această lucrare sunt realizate în programul *ANSYS* care are posibilitatea modelării contactului cu frecare între componente deformabile în timp. În urma analizei neliniare în regim staționar în *ANSYS*, am obținut caracteristicile de histerezis ale celor doi amortizori, care sunt asemănătoare cu cele pe care le-am determinat experimental.

Ambele modele cu elemente finite, validate experimental, permit modificarea anumitor parametrii geometrici ai elementelor componente în vederea obținerii unor forme și dimensiuni diferite ale buclei de histerezis.

Buclele histeretice ale acestor dispozitive au forme mai puțin întâlnite la dispozitivele histeretice, fiind caracteristici neliniar elastice progresive. Avantajul principal al acestor caracteristici este că permit o limitare progresiv accentuată a deplasărilor relative iar dezavantajul constă în lipsa modelelor matematice clasice care să le modeleze corespunzător.

CAPITOLUL 5

CONTRIBUȚII PRIVIND MODELAREA STRUCTURILOR ECHIPATE ANTISEISMIC

5.1 Introducere

Un obiectiv principal al tezei de doctorat este realizarea unor aplicații software care să permită modelarea comportamentului la seism a structurilor echipate cu dispozitive de disipare a energiei seismice având caracteristici de histerezis cu forme geometrice speciale, așa cum sunt amortizorii românești ȘERB. În acest scop, acest capitol prezintă modele matematice adecvate pe care le-am implementat computațional pentru a obține ca rezultat parametrii dinamici ai clădirii în timpul seismului: deplasările, vitezele și accelerațiile la nivelul fiecărui planșeu în funcție de amortizarea specifică dispozitivelor histeretice cu care este echipată clădirea analizată.

În subcapitolul 5.2 sunt prezentate modelele de histerezis pe care le-am implementat în modelul matematic al structurii echipate antiseismic și anume: modelul Maxwell, modelul Kelvin-Voigt, modelul Zener și modelul de amortizare vâscoasă, care sunt definite printr-o expresie algebrică, dar și modelul Bouc-Wen clasic și adaptat care este definit printr-o forma diferențială. Sunt prezentate contribuțiile originale la modelarea amortizorilor românești ȘERB, prin adaptarea modelului clasic Bouc-Wen.

În subcapitolul 5.3 este prezentat modelul matematic pe care l-am conceput pentru un sistem unidimensional cu n grade de libertate, echipat antiseismic, care permite exprimarea forțelor axiale din amortizori atât în forma algebrică cât și în forma diferențială. Sistemul de ecuații diferențiale rezultat, a fost obținut într-o formă care să fie ușor de implementat software pentru a putea fi soluționat numeric. De asemenea sunt prezentate și elementele de calcul original pentru două noi configurații de amplasare a amortizorilor la suprastructură, în vederea determinării coeficienților de modificare a cursei amortizorului și a componentei orizontale a forței axiale din amortizor. Modelul matematic cuprinde și relațiile de calcul ale energiilor corespunzătoare bilanțului energetic, necesar determinării energiei seismice disipate de sistemul de echipare antiseismică ales.

În subcapitolul 5.4 este prezentată modalitatea de implementare computațională a modelelor matematice expuse în subcapitolele precedente, precum și descrierea opțiunilor și a modului de lucru a celor patru aplicații software pe care le-am realizat în mediul de programare *Embarcadero Delphi XE3*:

- Aplicația software *HistPlot* care permite alegerea parametrilor pentru 11 modele de histerezis folosite la modelarea dispozitivelor histeretice;
- Aplicația software *GenEcAm* care assemblează sistemul de ecuații diferențiale ale clădirii echipate antiseismic într-un format specific modului *DEE* al programului MatLab/Simulink, care soluționează acest sistem pentru o accelerogramă dată;
- Aplicația software *ProConfig* care calculează elementele necesare configurației de amplasare a amortizorilor la suprastructură;
- Aplicația software *ProAnim* care permite vizualizarea grafică și animată a deplasărilor, vitezelor, accelerațiilor, forțelor histeretice și a energiei seismice disipate.

5.2 Contribuții privind modelarea matematică a amortizorilor

5.2.1 Modelul amortizorului cu fluid vâcos

Acest model, care caracterizează comportarea celor mai mulți amortizori folosiți la ora actuală în echiparea antiseismică a clădirilor, are doar o componentă vâscoasă (fig. 5.1) [8].

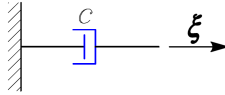


Fig. 5.1 Modelul mecanic al unui amortizor liniar cu fluid vâcos

Forța F produsă de un amortizor cu fluid vâcos se calculează cu relația [8]:

$$F(t) = c \cdot \dot{\xi}(t)^{\alpha_v} \quad (5.1)$$

unde: c - constanta de amortizare;

$\dot{\xi}(t)$ - viteza relativă pe direcția axială între capetele amortizorului;

α_v – exponentul vitezei.

Am adaptat relația (5.1) pentru a putea fi folosită la rezolvarea numerică a modelului matematic, adăugând termenul $\text{sign}(\dot{\xi}(t))$ care controlează semnul forței în funcție de semnul vitezei de deplasare axială a tijeii amortizorului cu fluid vâcos. Forța axială din amortizor devine:

$$F(t) = c \cdot \dot{\xi}(t)^{\alpha_v} \cdot \text{sign}(\dot{\xi}(t)) \quad (5.2)$$

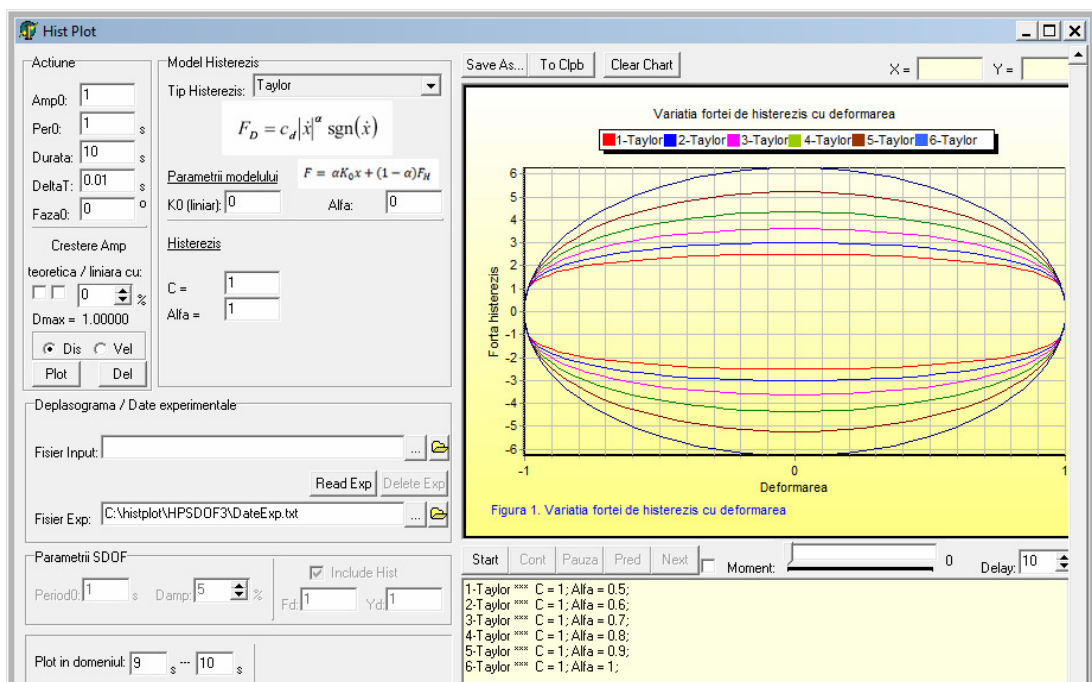


Fig. 5.2 Aplicația *HistPlot* - Bucle de histeresis adimensionale pentru $0.5 \leq \alpha_v \leq 1$ - amortizare vâscoasă

Curbele de histeresis caracterizate de această relație, au caracteristici grafice diferite funcție de valoarea coeficientului de amortizare c și a exponentului vitezei α_v și sunt prezentate exemplificativ, cu ajutorul programului *HistPlot* (detaliat în subcapitolul 5.4), în fig. 5.2, care evidențiază variabilitatea formei geometrice funcție de valorile asociate ale parametrilor c și α_v , pentru o mișcare armonică $\xi(t) = \sin(2 \cdot \pi \cdot t)$.

5.2.2 Modelul Maxwell

Modelul de histerezis Maxwell este un model vâscoelastic, fiind alcătuit dintr-o componentă vâscoasă legată în serie cu o componentă elastică și este prezentat în fig. 5.3.

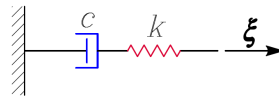


Fig. 5.3 Modelul mecanic Maxwell

Pentru modelul liniar vâscoelastic Maxwell forța de amortizare este [8]:

$$F = k \cdot \xi_1 = c \cdot \dot{\xi}_2 \quad (5.3)$$

în care: ξ_1, ξ_2 - deplasările corespunzătoare celor două componente (elastică și vâscoasă);

k - rigiditatea componentei elastice;

c - constanta de amortizare a componentei vâscoase.

Viteza totală pe direcția forței axiale F , este:

$$\dot{\xi}_t = \dot{\xi}_1 + \dot{\xi}_2 = \frac{\dot{F}}{k} + \frac{F}{c} \quad (5.4)$$

Notând $\tau_0 = c/k$, relația (5.4) devine:

$$\dot{F} + \frac{1}{\tau_0} \cdot F = k \cdot \dot{\xi}_t \quad (5.5)$$

Am implementat relația (5.5) în aplicațiile *HistPlot* și *GenEcAm* pentru găsirea valorilor parametrilor τ_0 și k specifici amortizorului vâscoelastic analizat în vederea modelării comportamentului la seism a clădirilor echipate cu amortizori vâscoelastici.

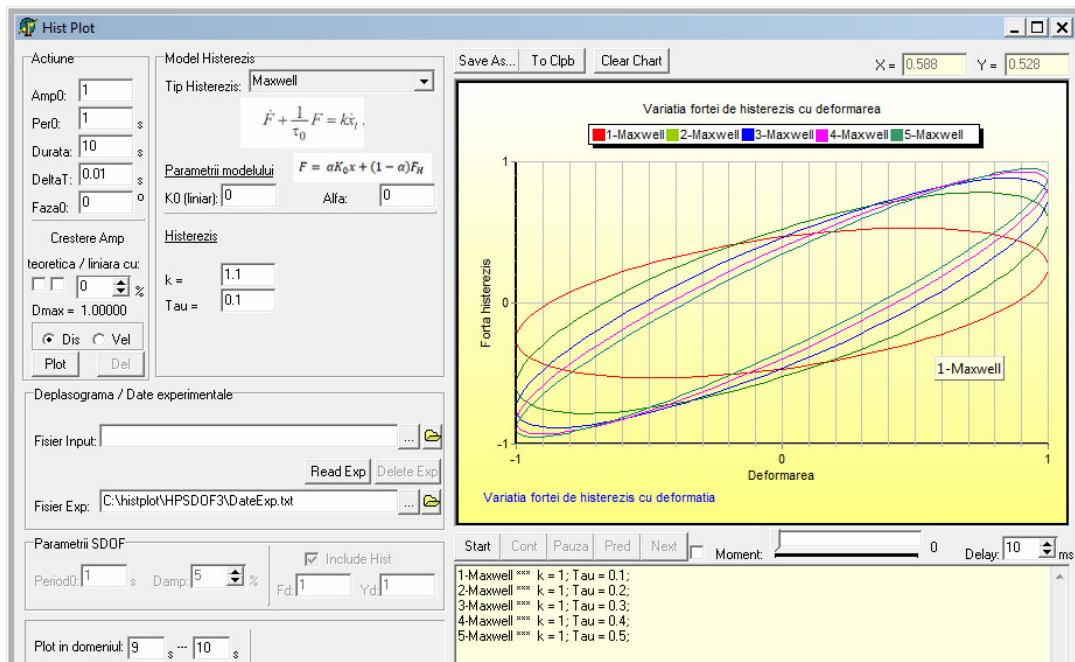


Fig. 5.4 *HistPlot* - Bucle de histerezis adimensionale pentru un amortizor tip Maxwell cu $0.1 \leq \tau_0 \leq 0.5$

Buclele de histerezis Maxwell, au forme diferite funcție de valoarea coeficientului de amortizare c și a rigidității elastice k și sunt exemplificate, cu ajutorul programului *HistPlot*, în fig. 5.4, pentru vizualizarea variației formei funcție de valorile parametrilor asociați.

5.2.3 Modelul Kelvin-Voigt

Acest model este alcătuit dintr-o componenta elastică și o componenta vâscoasă, legate în paralel (fig. 5.5) acționate simultan de forța exterioară $F = F(t)$.

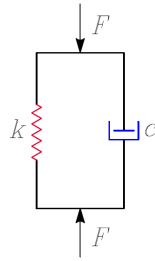


Fig. 5.5 Modelul mecanic Kelvin-Voigt

În acest caz forța de amortizare produsă de un astfel de amortizor este [8]:

$$F(t) = k \cdot \xi(t) + c \cdot \dot{\xi}(t) \quad (5.6)$$

Variabilitatea buclelor de histerezis Kelvin-Voigt funcție de parametrii k și c , am studiat-o cu aplicația *HistPlot* și este exemplificată în fig. 5.6.

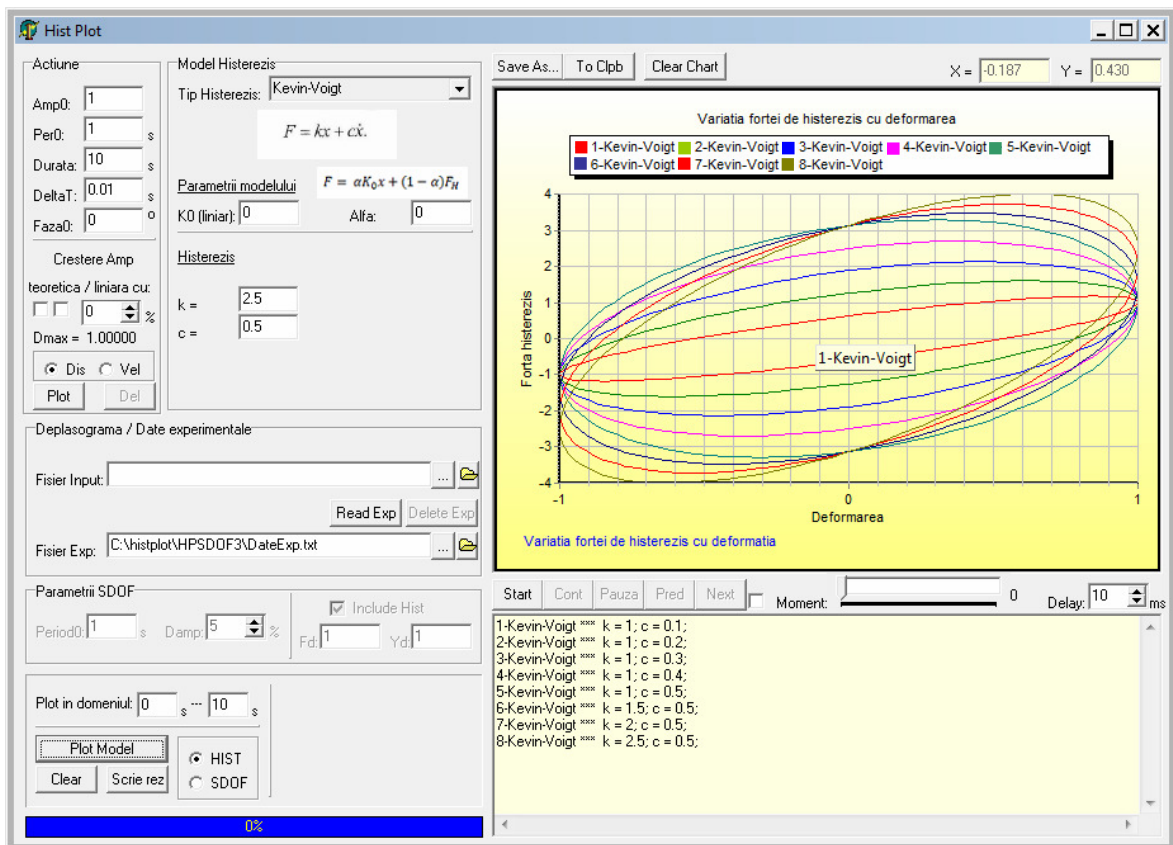


Fig. 5.6 *HistPlot* - Bucle de histerezis adimensionale - model Kelvin-Voigt cu $0.1 \leq c \leq 0.5$ și $1 \leq k \leq 2.5$

5.2.4 Modelul Zener

Acest model este de fapt modelul ereditar Hooke-Maxwell și este alcătuit dintr-un element elastic Hooke, având constanta elastică k_1 legat în paralel cu un element vâscoelastic de tip Maxwell, având caracteristicile k_2 și c (fig. 5.7).

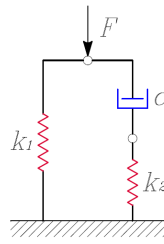


Fig. 5.7 Modelul mecanic Zener

Forța de amortizare în acest caz este [8]:

$$\dot{F} = -\frac{k_2}{c} \cdot F + (k_1 + k_2) \cdot \dot{\xi} + \frac{k_1 \cdot k_2}{c} \cdot \xi \quad (5.7)$$

în care: k_1 și k_2 – rigiditățile celor două componente elastice;

c – coeficientul de amortizare al componentei vâscoase.

Influența acestor parametri asupra formei și dimensiunilor buclei de histerzis Zener este prezentată exemplificativ în fig. 5.8 pe care am obținut-o cu aplicația *HistPlot*.

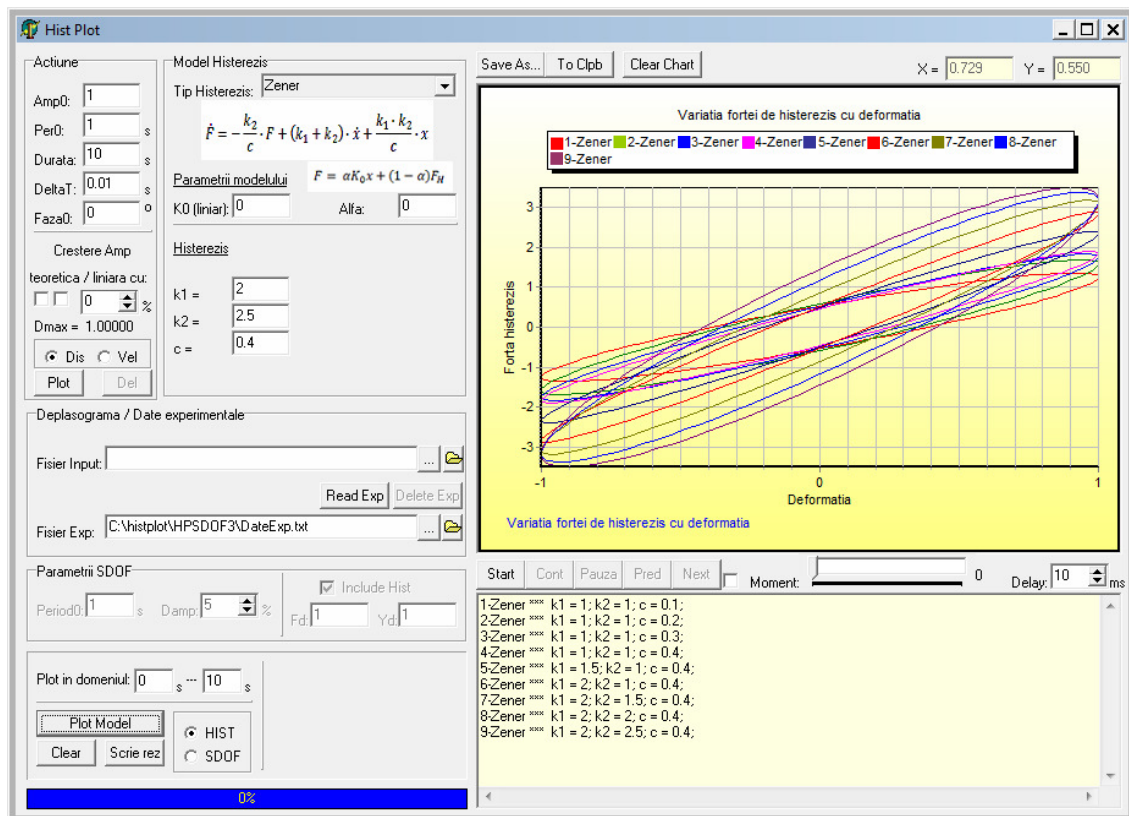


Fig. 5.8 Aplicația *HistPlot* - Bucle de histerzis adimensionale pentru un amortizor tip Zener

5.2.5 Modelul Bouc-Wen

5.2.5.1 Introducere

Răspunsul structurilor în regiuni seismice are o mare importanță și se bazează pe comportamentul histeretic individual al elementelor componente ale structurii. În literatura de specialitate s-au propus de-a lungul timpului diferite modele histeretice pentru a modela comportamentul neliniar al elementelor de amortizare antiseismică. O mare parte din aceste

modele matematice își modifică constant rigiditatea, permițând astfel o reprezentare reală a comportamentului elementelor și dispozitivelor de amortizare.

Printre aceste modele se numără și modelul propus la bază de Bouc [7] și extins mai târziu de Wen [151]. În literatura de specialitate [17] s-a arătat că modelul Bouc-Wen poate modela cu succes comportamentul materialelor, al elementelor portante și al dispozitivelor de amortizare care fac parte din componența unei clădiri supuse acțiunii seismice.

În cazul acestui model matematic, comportamentul histeretic este reprezentat printr-o ecuație diferențială neliniară care poate fi implementată computațional. Datorită versatilității sale modelul Bouc-Wen este foarte cunoscut. Este un model matematic concis, guvernat de o ecuație diferențială care se pretează modelării diferitelor dispozitive de amortizare antiseismică. Modelul a fost prima dată introdus de Bouc în 1967 [7] și de atunci este folosit cu succes cu diferite modificări și corecții la modelarea dispozitivelor de amortizare.

Forța $F(t)$ dezvoltată de modelul Bouc-Wen poate fi exprimată ca [115]:

$$F(t) = a \cdot \frac{F_y}{\xi_y} \cdot \xi(t) + (1-a) \cdot \frac{F_y}{\xi_y} \cdot z \quad (5.8)$$

unde: $\xi(t)$ – deplasarea;

F_y – forța la apariția fenomenului de fluaj;

ξ_y – deplasarea la fluaj;

a – raportul între rigiditatea post-fluaj și rigiditatea elastică (înainte de fluaj);

$z(t)$ – parametru histeretic echivalat cu forța histeretică dezvoltată la o deplasare ξ și exprimată printr-o ecuație diferențială neliniară cu condiții inițiale nule.

$$\dot{z} = \left[A - |z|^n \cdot (\beta + \text{sgn}(\dot{\xi} \cdot z) \cdot \gamma) \right] \cdot \dot{\xi} \quad (5.9)$$

în care:

A, β, γ și n – parametri adimensionali care controlează comportamentul modelului histeretic;

$\text{sgn}(\)$ – funcția signum care întoarce "1" când expresia căreia i se aplică este pozitivă sau întoarce "-1" când expresia este negativă.

Din ecuația (5.8) se observă că forța din modelul Bouc-Wen este compusă dintr-o componentă elastică și una histeretică:

$$F^{el} = a \cdot \frac{F_y}{\xi_y} \cdot \xi(t) \quad (5.10)$$

$$F^h = (1-a) \cdot \frac{F_y}{\xi_y} \cdot z \quad (5.11)$$

unde: F^{el} – forța elastică;

F^h – forța histeretică.

Cei patru parametri ai modelului Bouc-Wen (A, β, γ și n) sunt redundanți, în sensul că există mai multe seturi de valori care produc același răspuns pentru o excitație dată. De cele mai multe ori, pentru a înlătura această redundanță, se poate alege $A = 1$.

Datorită versatilității sale, modelul Bouc-Wen poate fi folosit la modelarea următoarelor tipuri de comportamente histeretice [99]:

- comportamente histeretice cu caracteristică elastică liniară;
- comportamente histeretice cu caracteristică neliniară degresivă;
- comportamente histeretice cu caracteristică neliniară progresivă.

5.2.5.2 Influența parametrilor Bouc-Wen asupra buclei de histerezis

Parametrii β și γ

Acești parametri nu au o interpretare fizică și afectează într-o mare măsură, într-o manieră neregulată forma și dimensiunile buclei hysteretice [99].

Pentru analiza influenței pe care o are variația parametrului γ asupra formei buclei de histerezis, am folosit aplicația software *HistPlot*, considerând valori constante pentru parametrii: $\beta = 0.1$, $n = 1$, $A = 1$ și mai multe valori pentru γ .

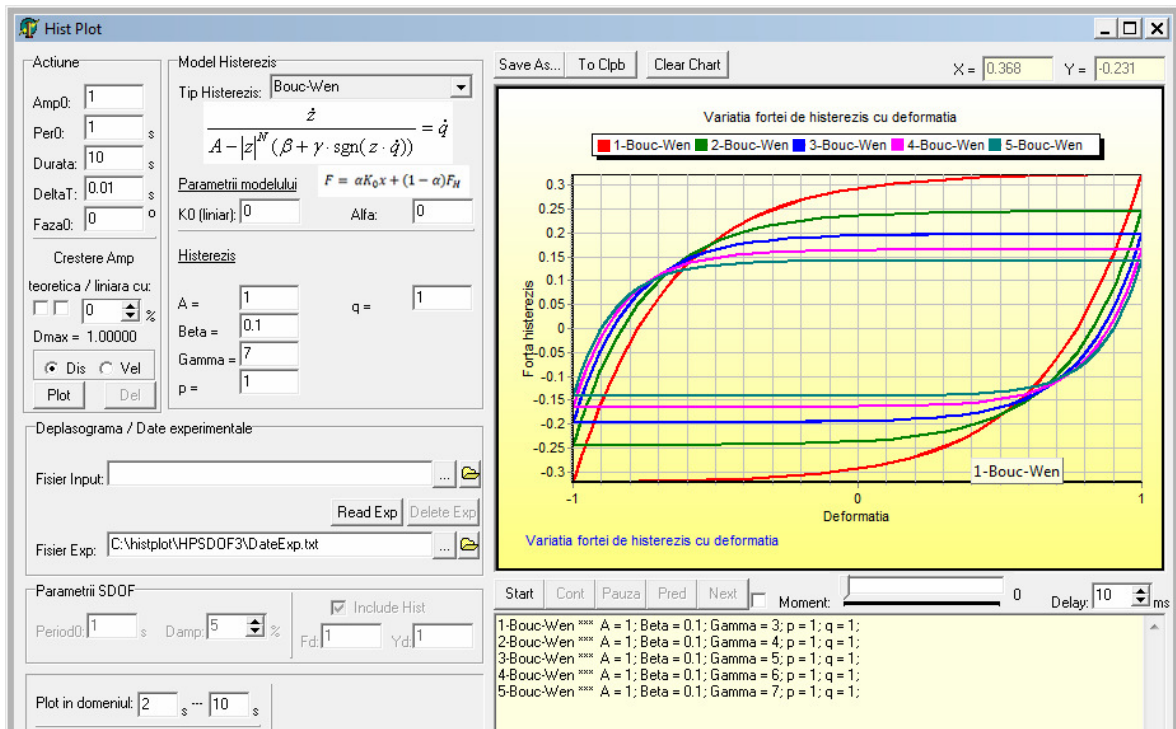


Fig. 5.9 *HistPlot* – Bucle de histerezis adimensionale, modelul Bouc-Wen, influența parametrului γ

Din fig. 5.9 se observă că variația parametrului γ are ca efect arcuirea curbei backbone a buclei de histerezis precum și rotirea acesteia.

Pentru a evidenția influența valorii parametrului β asupra formei și dimensiunilor buclei de histerezis s-a folosit aplicația software *HistPlot* în care am menținut constante următorii parametri: $\gamma = 2$, $n = 1$, $A = 1$.

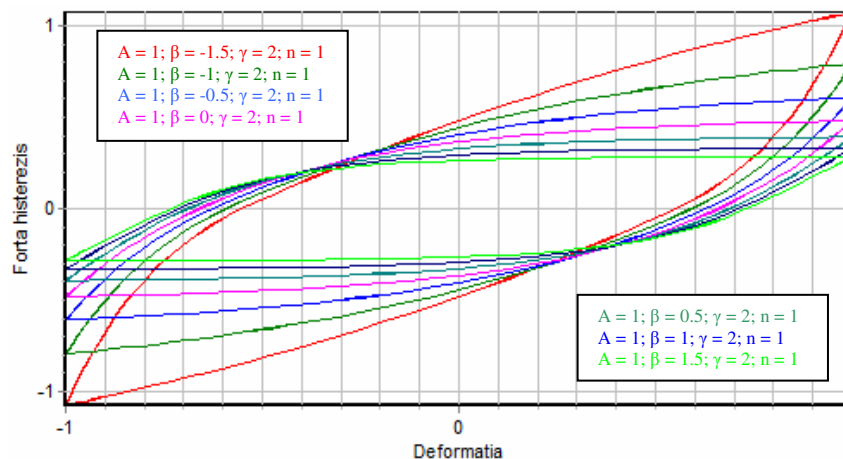


Fig. 5.10 *HistPlot* – Bucle de histerezis adimensionale, modelul Bouc-Wen, influența parametrului β

Se observă din fig. 5.10 că variația parametrului β are ca efect rotirea curbei backbone a buclei de histeresis simultan cu arcuirea acesteia în sens trigonometric pentru $\beta < 0$ și în sens invers trigonometric pentru $\beta > 0$.

Rezultă că, dacă se aleg parametrii β și γ astfel încât $\beta + \gamma > 0$, obținem astfel, condiția necesară și suficientă pentru ca bucla de histeresis să descrie un comportament neliniar degresiv. Dacă $\beta + \gamma < 0$, obținem o comportare histeretică cu caracteristică elastică progresivă [99].

De asemenea, se observă din fig. 5.11 că, dacă păstrăm condiția $\gamma \geq \beta$ bucla rezultă sub formă de elipsoid, pe când, dacă considerăm $\beta > \gamma$, bucla histeretică ia forma literei "S" [99].

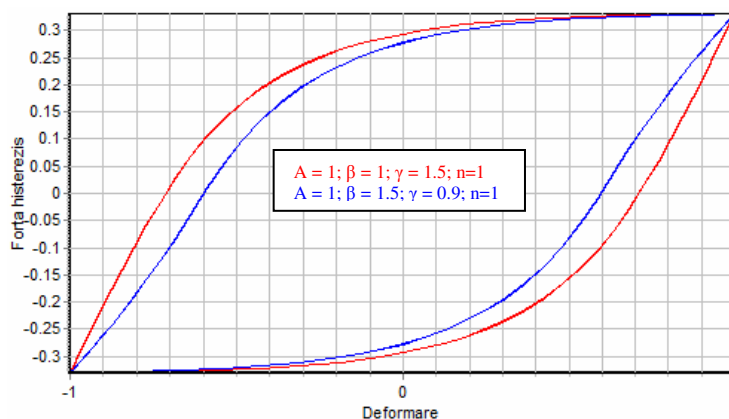


Fig. 5.11 *HistPlot* – Bucle de histeresis adimensionale Bouc-Wen, influența condiției $\gamma \geq \beta$ sau $\beta > \gamma$

Parametrul n

Parametrul n reprezintă exponentul din relația forței histeretice și controlează tranziția între ramura de încărcare și ramura de descărcare. Pentru a evidenția influența parametrului n asupra formei buclei de histeresis am realizat în *HistPlot* diferite testări în care parametrii β , γ și A au valori constante, iar n ia valori crescătoare.

Pentru diversificarea formelor buclelor de histeresis obținute cu modelul Bouc-Wen, Sireteanu [114] a propus o modificare a modelului clasic Bouc-Wen în care parametrul n este înlocuit cu doi parametri p și q care pot avea valori diferite:

$$\dot{z} = [A - \beta \cdot |z|^p - \gamma \cdot |z|^q \cdot \text{sgn}(z \cdot \dot{\xi})] \cdot \dot{\xi} \quad (5.12)$$

unde p și q sunt numere reale pozitive. Această relație am implementat-o în aplicațiile *HistPlot* și *GenEcAm* (detaliată în subcapitolul 5.4). Influența parametrului n este prezentată în fig. 5.12 în care am considerat $p = q = n$, iar pentru n am ales valori între 0,5 și 2,2.

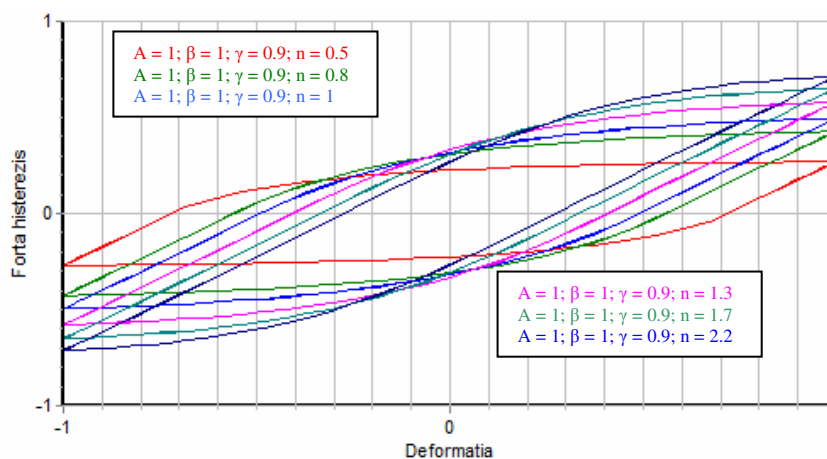


Fig. 5.12 Aplicația *HistPlot* – Bucle de histeresis adimensionale Bouc-Wen, influența parametrului n

Modelul Bouc-Wen extins, propus de Sireteanu [114], are o mai mare versatilitate decât modelul clasic, înglobându-l pe acesta din urmă, pentru cazul particular $p = q = n$. În figura 5.13 sunt exemplificate forme speciale ale buclelor histeretice obținute cu acest model extins, pe care l-am implementat în aplicațiile *HistPlot* și *GenEcAm*.

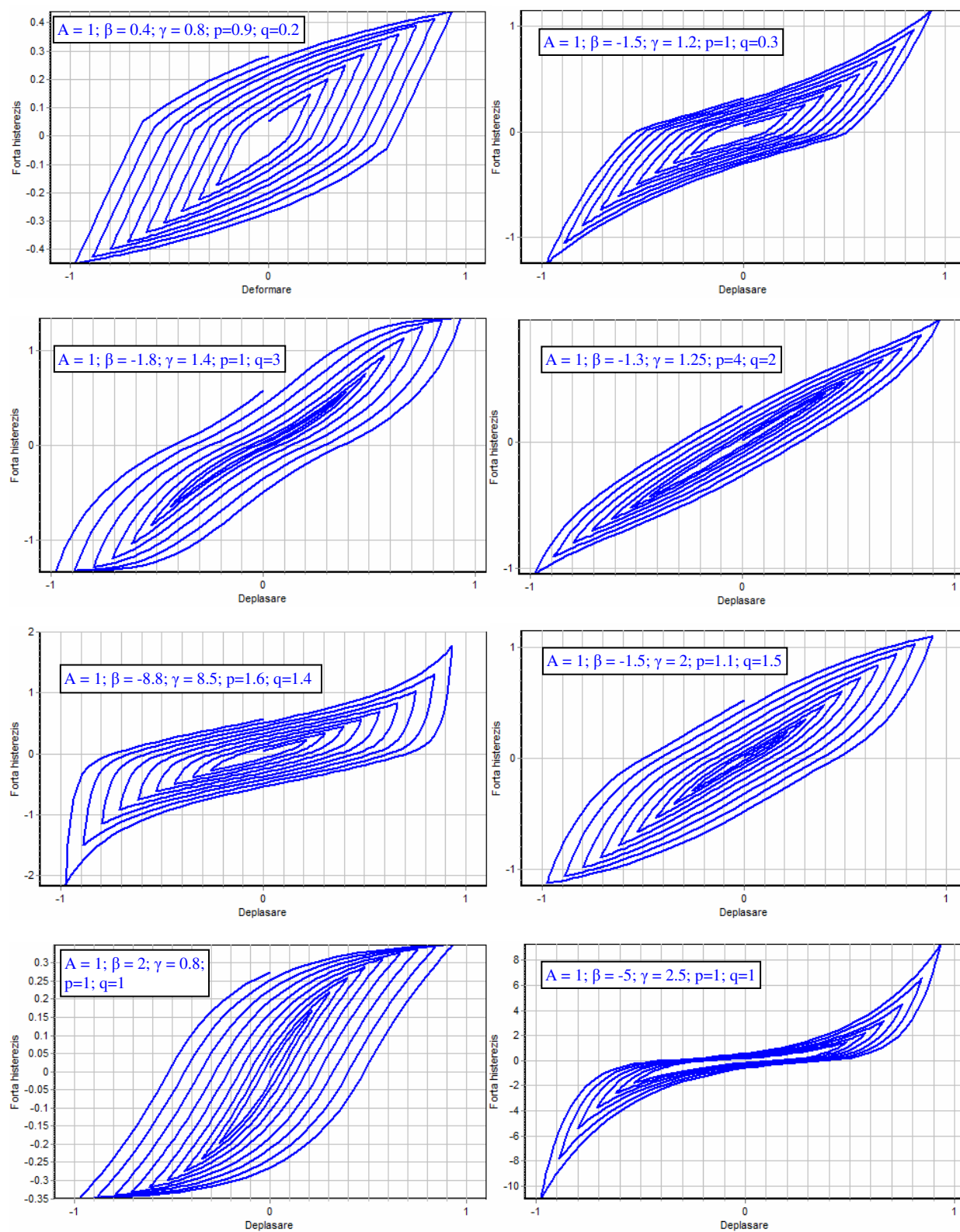


Fig. 5.13 Bucle histeretice adimensionale obținute cu modelul extins Bouc-Wen – aplicația *HistPlot*

Variabilitatea formelor buclelor histeretice exemplificate în fig. 5.13 demonstrează avantajele introduse de cei doi parametri independenți p și q , modelul Bouc-Wen extins dovedind astfel capacități avansate de modelare matematică și computațională a buclelor de histeresis specifice dispozitivelor de protecție antiseismică.

Parametrul A

Pentru a determina influența parametrului A asupra formei buclei de histeresis am utilizat aplicația software *HistPlot* în care am menținut constanți parametrii β , γ și n și am modificat valorile parametrului A .

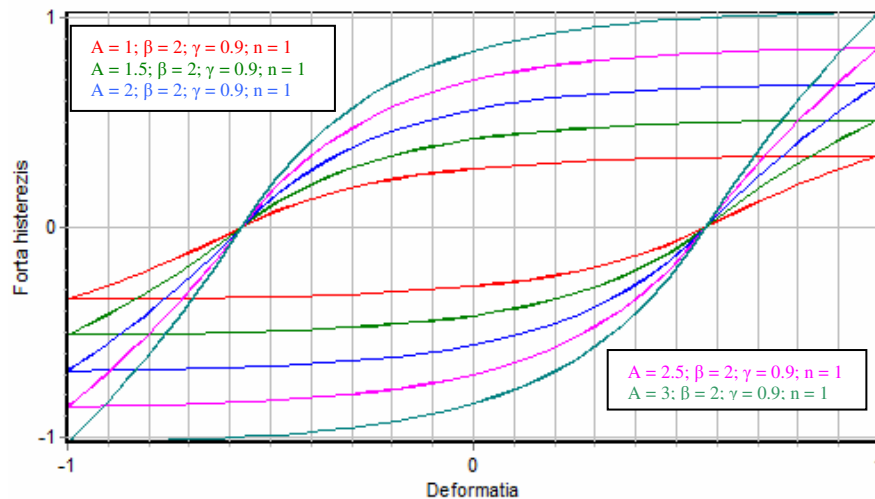


Fig. 5.14 Aplicația *HistPlot* – Bucle de histeresis adimensionale Bouc-Wen, influența parametrului A

Din fig. 5.14 se observă că variația parametrului A are ca efect rotația buclei de histeresis și implicit o creștere a ariei buclei histeretice odată cu mărirea valorii parametrului.

Parametrul a

Parametrul a reprezintă raportul între rigiditatea post-elastică și cea elastică [99]. Pentru a studia influența valorilor acestui parametru asupra formei buclei de histeresis, folosind programul *HistPlot* am considerat mai multe valori pentru parametrul a , păstrând constanți parametrii A , β , γ și n . Din fig. 5.15 se observă că mărirea parametrului a are ca efect înclinarea buclei de histeresis

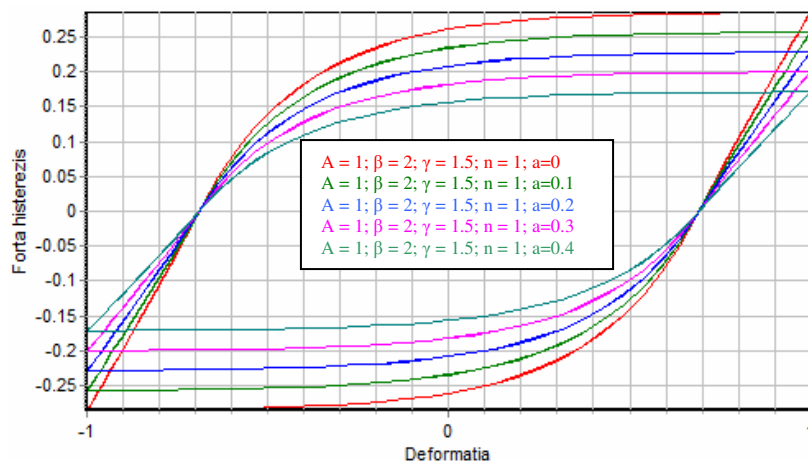


Fig. 5.15 Aplicația *HistPlot* – Bucle de histeresis adimensionale Bouc-Wen, influența parametrului a

5.2.5.3 Componentele buclei de histerezis Bouc-Wen

Bucla de histerezis Bouc-Wen poate fi împărțită în patru segmente în funcție de semnul vitezei și al forței hysteretice z . Aceste patru segmente sunt cuprinse între abscisă și dreapta corespunzătoare răspunsului perfect elastic [99]. În fig. 5.16 punctele A și C reprezintă punctele în care viteza își schimbă semnul, iar punctele B și D reprezintă punctele în care forța hysteretică își schimbă semnul.

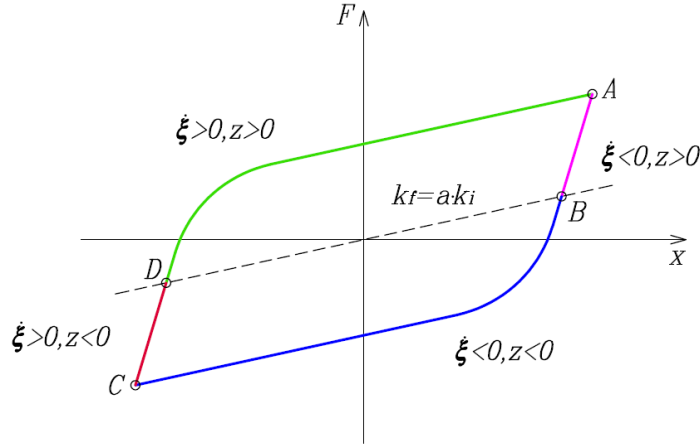


Fig. 5.16 Segmentele buclei de histerezis Bouc-Wen

Modelul Bouc-Wen din relația (5.9) mai poate fi scris și sub forma:

$$d\xi = \frac{1}{1 - |z|^n \cdot (\beta + \text{sign}(\xi \cdot z)) \cdot \gamma} \cdot dz \quad (5.13)$$

Această ecuație poate fi rezolvată analitic pentru $n = 1$ și $n = 2$. Pentru $n = 1$, z este [99]:

$$z = \frac{\text{sign}(z) + (q \cdot z_0 - \text{sign}(z)) \cdot e^{-\text{sign}(z) \cdot q \cdot (\xi - \xi_0)}}{q} \quad (5.14)$$

unde $q = \beta + \text{sign}(\xi \cdot z) \cdot \gamma$.

În funcție de valoarea lui q se diferențiază cele patru curbe care caracterizează bucla de histerezis Bouc-Wen (fig. 5.16) [99]:

- segmentul AB pe care $q = \beta - \gamma$ și $\text{sign}(z) = 1$;
- segmentul BC pe care $q = 1$ și $\text{sign}(z) = -1$;
- segmentul CD pe care $q = \beta - \gamma$ și $\text{sign}(z) = -1$;
- segmentul DA pe care $q = 1$ și $\text{sign}(z) = 1$.

Pentru $n = 2$, valoarea lui z este dată de expresia [20]:

$$z = \frac{\tanh(\sqrt{q} \cdot (\xi - \xi_0) + \text{arctanh}(\sqrt{q} \cdot z_0))}{\sqrt{q}} \quad (5.15)$$

unde: ξ_0 și z_0 sunt valorile inițiale ale deplasării și forței hysteretice;

$\tanh()$ – tangenta hiperbolică;

$\text{arctanh}()$ – inversul tangentei hiperbolice.

În cazul modelului matematic pe care l-am realizat, am considerat cazul general când n poate avea orice valoare, rezolvarea ecuației diferențiale a modelului Bouc-Wen realizându-se, în acest caz, prin metode numerice.

5.2.5.4 Contribuții privind adaptarea modelului Bouc-Wen

Modelul Bouc-Wen clasic reușește în mare măsură să modeleze comportamentul histeretic al amortizorilor ȘERB, însă nu suficient de precis, fiind necesare modificări sau adaptări ale acestuia. Deși pentru deplasarea maximă, bucla forță-deplasare oferită de modelul clasic, se suprapune cu bucla de histerezis obținută experimental sau cu M.E.F., în cazul în care deplasarea variază armonic în timp, modelul teoretic Bouc-Wen clasic nu mai modelează corect comportamentul real al amortizorilor ȘERB.

Am evidențiat acest inconvenient în fig. 5.17 cu ajutorul aplicației *HistPlot* în care am ales pentru deplasare o variație sinusoidală cu amplitudine crescătoare liniar.

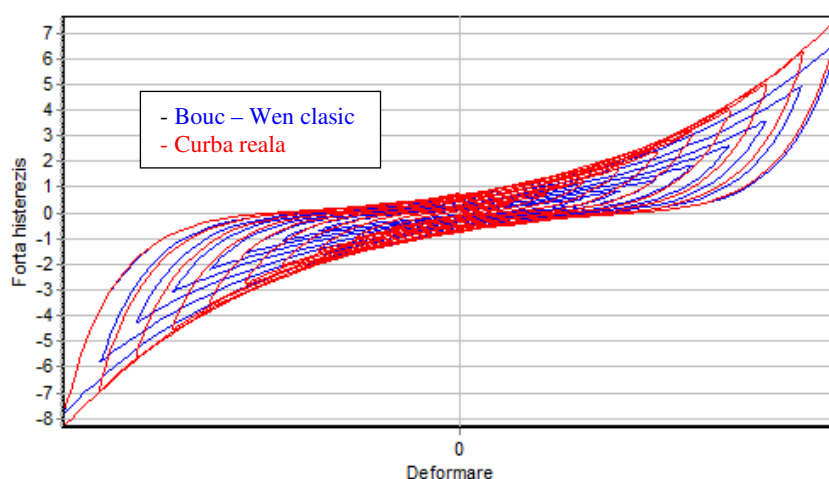


Fig. 5.17 Diferența între curba reală (roșu) și modelul Bouc-Wen (albastru) – coordonate adimensionale

Se observă, din fig. 5.17, că la modificarea amplitudinii deplasării, forța corespunzătoare amplitudinii maxime locale este mai mare în realitate decât forța histeretică care rezultă folosind modelul Bouc-Wen clasic.

Odată cu mărirea amplitudinii se observă că modelul Bouc-Wen clasic oferă valori ale forței histeretice din ce în ce mai apropiate de valorile reale (cele obținute experimental prezentate în fig. 3.7), astfel încât, la amplitudinea maximă a deplasării, valorile forțelor coincid.

Așa cum se observă din fig. 5.17, la amplitudini mici ale deplasării pentru modelul teoretic clasic, apare așa numitul fenomen de relaxare a forței care conduce la forțe mai mici decât cele reale, obținându-se astfel bucle histeretice care nu se suprapun cu buclele de histerezis reale însă aproximează într-o anumită măsură comportamentul real al dispozitivelor ȘERB.

În literatura de specialitate se propun câteva metode de adaptare a modelului clasic Bouc-Wen pentru diferite forme ale buclei de histerezis [24], modele pe care le-am implementat în cele două aplicații *HistPlot* și *GenEcAm*, în scopul extinderii posibilităților de modelare cât mai fidelă a comportamentului dispozitivelor de amortizare ȘERB C-194, dar și a altor amortizori.

5.2.5.4.1 Contribuții la adaptarea modelului Bouc Wen privind relaxarea rigidității

Dispozitivul de amortizare de tip ȘERB C-194, așa cum se observă din buclele histeretice obținute experimental (figurile 3.7 și 3.9) și cu metoda elementului finit (fig. 4.19) sunt sisteme care își măresc rigiditatea odată cu creșterea amplitudinii deplasării datorită comportamentului elastic al discurilor din oțel de arc care intră în componența amortizorului.

Modelul Bouc-Wen clasic este un model care modelează bucle histeretice cu păstrarea constantă a rigidității. De aceea, pentru modelarea dispozitivelor de amortizare cu întărirea rigidității este necesară adaptarea modelului Bouc-Wen clasic.

Pentru modelarea comportamentului real al amortizorilor ȘERB C-194 este deci necesară modelarea unei bucle histeretice la care rigiditatea la amplitudini mici să fie mai mare decât cea oferită de modelul Bouc-Wen clasic și să scadă pe măsură ce crește amplitudinea deplasării astfel încât la amplitudine maximă, forța histeretică obținută cu modelul Bouc-Wen clasic să coincidă cu forța obținută cu modelul Bouc-Wen adaptat. Practic, trebuie modelat un amortizor mai puternic care să prezinte fenomenul de relaxare a rigidității.

Adaptarea modelului Bouc-Wen pentru relaxarea rigidității (stiffness degradation) a fost propusă de Sivaselvan și Reinhorn [115] pentru prima dată în 2001.

Astfel, ei propun pentru expresia rigidității histeretice K_h următoarea formă:

$$K_h = (1 - \alpha) \cdot K_0 \cdot \left(1 - (\gamma \cdot \text{sgn}(z \cdot \dot{\xi}) + \beta) \cdot \left| \frac{z}{F_y^*} \right|^N \right) \quad (5.16)$$

unde: K_0 – rigiditatea inițială totală;

α – raportul între rigiditatea postfluaj și rigiditatea inițială;

N – exponent care controlează tranziția de la domeniul elastic la domeniul elasto-plastic;

β și γ – parametrii care controlează forma buclei histeretice;

z – forța axială din amortizor;

F_y^* – forța la fluaj calculată așa cum s-a propus de către Wang și Foliente în 2001 [149]:

$$F_y^* = (1 - \alpha) \cdot \left[\left(\frac{1 + \text{sgn}(z)}{2} \right) \cdot F_y^+ + \left(\frac{1 - \text{sgn}(z)}{2} \right) \cdot F_y^- \right] \quad (5.17)$$

Conform acestei reguli, ramura de descărcare a buclei histeretice se presupune că se îndreaptă către un punct numit pivot situat pe ramura inițială elastică la distanța $\alpha \cdot F_y$ situat pe partea opusă a ramurii descrescătoare în care α este parametrul de relaxare a rigidității [115]. Conform studiilor lui Sivaselvan, fenomenul de relaxare a rigidității modelului Bouc-Wen clasic este controlat cu ajutorul unui factor de relaxare a rigidității R_k dat de formula [24]:

$$R_k = \frac{F_c + \alpha_1 \cdot F_y}{K_0 \cdot d_c + \alpha_1 \cdot F_y} \quad (5.18)$$

unde: K_0 – rigiditatea inițială totală;

F_c – forța curentă;

d_c – deplasarea curentă;

$F_y = F_y^+$ sau F_y^- în funcție de partea în care se află punctul de coordonate (d_c, F_c) față de ramura inițială elastică definită de panta K_0 ;

α_1 – parametru de relaxare a rigidității.

Introducând R_k în formula rigidității histeretice rezultă astfel [24]:

$$K_h = (R_k - \alpha) \cdot K_0 \cdot \left(1 - (\gamma \cdot \text{sgn}(z \cdot \dot{\xi}) + \beta) \cdot \left| \frac{z}{F_y^*} \right|^N \right) \quad (5.19)$$

Wang și Foliente în anul 2001 [149] au propus, pentru îmbunătățirea suplimentară a adaptării relaxării rigidității, folosirea valorii d_{max} în loc de valoarea d_c , d_{max} corespunzând valorii maxime a deplasării într-un ciclu sau a mediei ponderate între d_{max} și d_c . În acest caz, se poate folosi pentru R_k , valoarea minimă. Charalampakis în 2013 [23] propune pentru optimizarea valorii lui R_k , minimizarea valorii sale. Astfel, dacă notăm cu R_k^{trial} valoarea obținută cu ecuația lui R_k , valoarea minimă a lui R_k calculată în fiecare pas este [23]:

$$R_k^{min} = \min\{R_k^{min}, R_k^{trial}\} \quad (5.20)$$

Astfel, valoarea parametrului R_k este o valoare interpolată între R_k^{min} și R_k^{trial} [23]

$$R_k = R_k^{trial} + (1 - \alpha_2) \cdot (R_k^{min} - R_k^{trial}) \quad (5.21)$$

unde α_2 – parametru de recuperare a rigidității.

În studiul acestei îmbunătățiri a modelului Bouc-Wen clasic din considerente de rigiditate, am observat că metoda propusă de Sivaselvan și ulterior îmbunătățită de Wang, este utilă în cazul buclelor de histerezis cu caracteristica neliniară progresivă specifică amortizorilor ȘERB C-194, doar în condițiile în care amplitudinea deplasării este crescătoare în timp (fig. 5.18 și 5.19), caz în care R_k^{min} are o variație corectă de-a lungul întregii perioade de excitație a amortizorului. În caz contrar, rezultatele obținute sunt identice cu cele obținute cu modelul Bouc-Wen clasic, adică improprii modelării comportamentului real al amortizorilor ȘERB (fig. 5.21). Aplicația *HistPlot* permite vizualizarea variației în timp a parametrilor R_k^{trial} și R_k^{min} în funcție de variația în timp a deplasării relative de nivel. În figurile 5.18 și 5.20 se prezintă variația celor doi parametri pentru două cazuri ale variației deplasării relative de nivel: amplitudine crescătoare liniar și amplitudine variabilă tip ovoid, pe care le-am studiat cu ajutorul aplicației *HistPlot*.

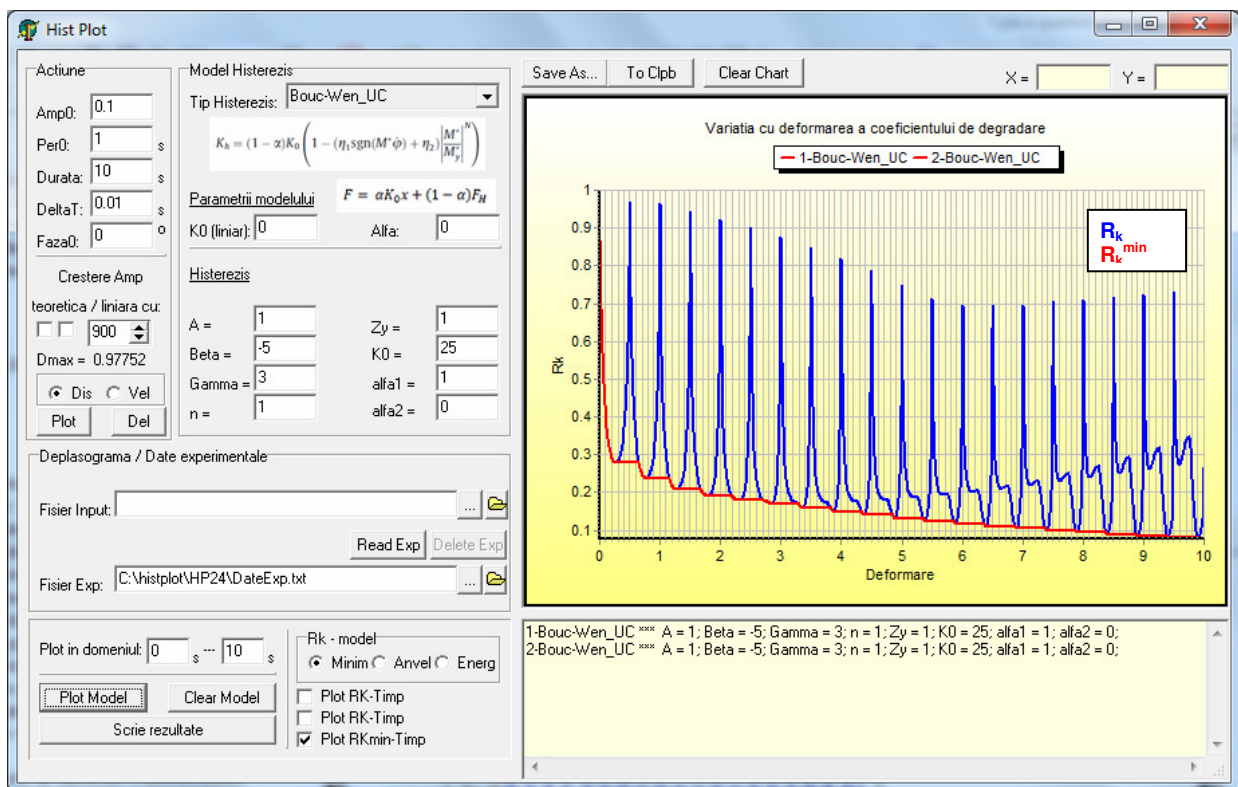


Fig. 5.18 *HistPlot* – Variația în timp a lui R_k (albastru) și R_k^{min} (roșu) pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine crescătoare în timp (coordonate adimensionale)

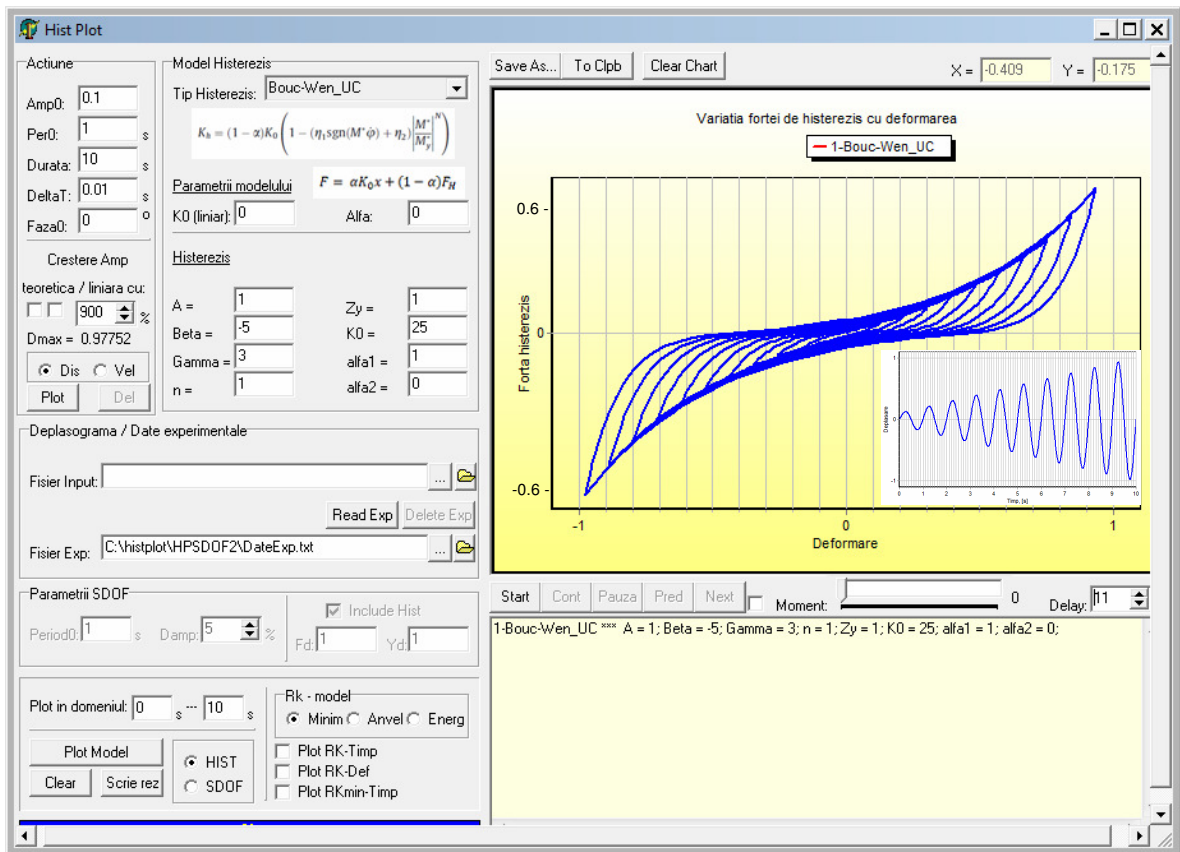


Fig. 5.19 *HistPlot* – bucla de histerezis folosind modelul Bouc-Wen_UC pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine crescătoare în timp (coordonate adimensionale)

Se observă din fig. 5.19 că bucla histeretică corespunzătoare modelului Bouc-Wen îmbunătățit (pe care l-am denumit Bouc-Wen_UC) modelează corect forma buclei histeretice reale a amortizorilor ȘERB C-194, în cazul particular al deplasării relative de nivel cu amplitudine crescătoare în timp.

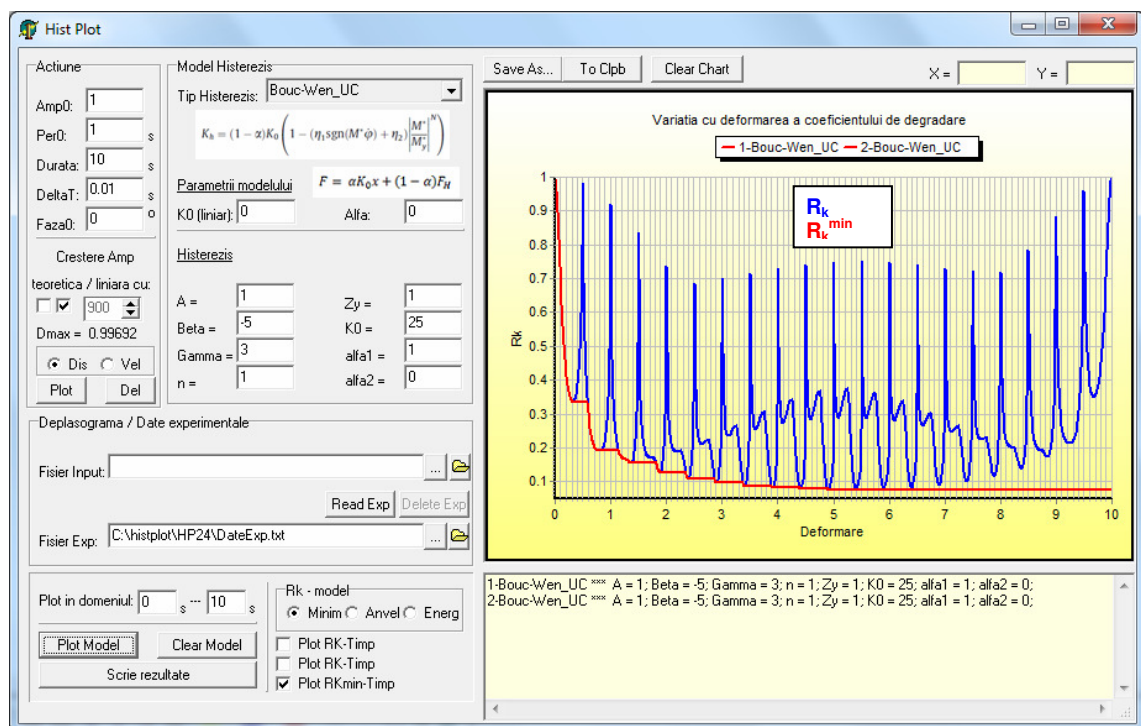


Fig. 5.20 *HistPlot* – R_k^{trial} (albastru) și R_k^{min} (roșu) pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine variabilă în timp sub formă de ovoid (coordonate adimensionale)

Se observă în fig. 5.20 că în cazul deplasării relative de nivel având amplitudinea variabilă în timp sub formă ovoidală, când amplitudinea crește în prima jumătate a perioadei de excitație, după care scade la zero în a doua jumătate, forma buclei histeretice nu mai modelează corect comportamentul amortizorului ȘERB C-194 (fig. 5.21) deoarece variația lui R_k^{min} nu poate fi determinată corect în cazul micșorării amplitudinii excitației.

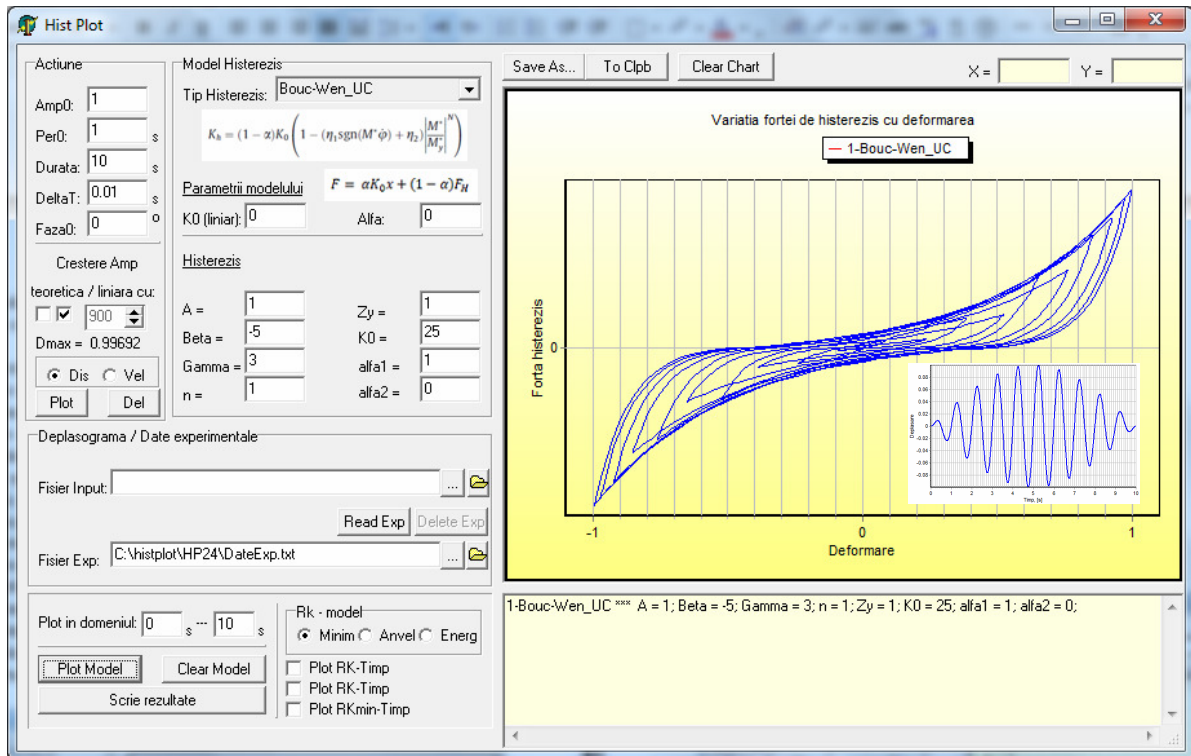


Fig. 5.21 Aplicația *HistPlot* – bucla de histeresis folosind Modelul Bouc-Wen_UC pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine variabilă în timp sub formă de ovoid (coordonate adimensionale)

Aceste situații particulare în care se poate aplica cu succes modelul Bouc-Wen îmbunătățit din punct de vedere al rigidității, au fost semnalate de Sivaselvan [115] și Wang [149]. Concluzia la care au ajuns este că mai sunt necesare studii și modalități numerice și computaționale care să completeze studiile lor pentru a lărgi domeniul de aplicație a îmbunătățirii pe care au adus-o modelului Bouc-Wen clasic.

În continuarea studiilor lui Sivaselvan, Wang și Charalampakis, am urmărit să găsim o metodă de a adapta această îmbunătățire și la alte situații decât cele menționate și verificate în aceste studii.

Una din aceste metode pe care le-am propus în această lucrare, care oferă rezultate corecte ale aplicării îmbunătățirilor propuse și în alte cazuri decât cele menționate, este aproximarea unei înfășurătoare pentru valorile minime ale curbei de variație a factorului de relaxare a rigidității R_k^{trial} . Această înfășurătoare a valorilor minime este ușor de determinat pentru un domeniu foarte larg de variație a deplasării relative de nivel și deci a deplasării din amortizori.

Gradul de corectare a relaxării rigidității este direct proporțional cu gradul de aproximare a înfășurătorii valorilor minime ale variației factorului R_k . Acest fapt este util doar în măsura în care se cunoaște dinainte variația deplasării relative de nivel în timp, lucru care este perfect posibil în destul de multe situații întâlnite în studiul teoretic, experimental sau numeric pentru a realiza studii comparative sau de validare a rezultatelor obținute.

Am implementat această nouă metodă în aplicația software *HistPlot* (opțiunea “Anvel”) pentru a verifica corectitudinea compensării relaxării rigidității de către modelul Bouc-Wen_UC, și pentru alte situații decât cele care implică creșterea amplitudinii deplasării.

Astfel, în figurile 5.22 și 5.23 sunt prezentate rezultatele pe care le-am obținut în urma a două studii de aproximare a valorilor minime ale curbei R_k^{trial} când curba de variație a deplasării relative de nivel este crescătoare în prima jumătate a perioadei de excitație și descrescătoare în cea de-a doua jumătate.

Rezultatele pe care le-am obținut cu această metodă care îmbunătățește metoda propusă de Sivaselvan, Wang și Charalampakis, sunt prezentate pentru o variație sinusoidală ovoidală a cărei amplitudine crește de la 0 până la o valoare maximă după care scade iar la 0. Cele două exemple analizate au amplitudinea maximă a deplasării relative de nivel, diferită.

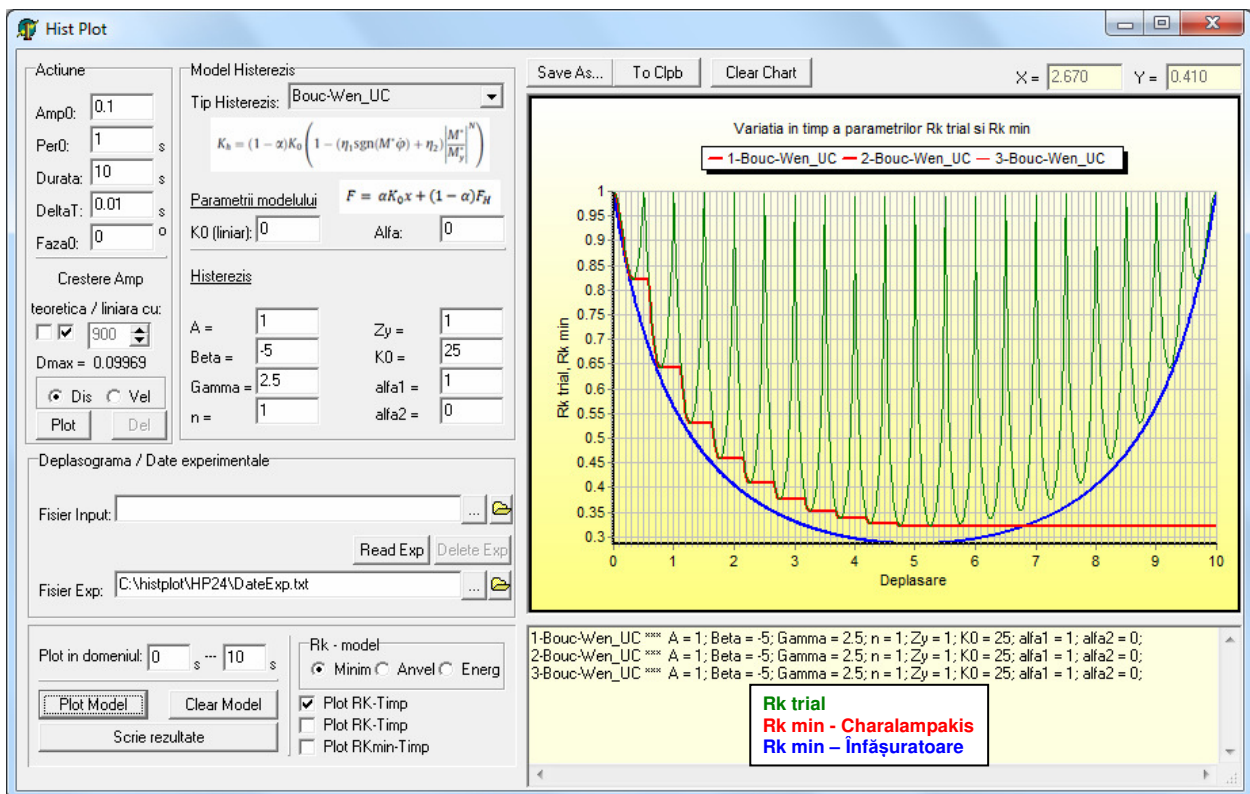


Fig. 5.22 Aplicația *HistPlot* – R_k^{trial} și R_k^{min} modelul Bouc-Wen_UC pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine variabilă în timp sub formă de ovoid (coordonate adimensionale)

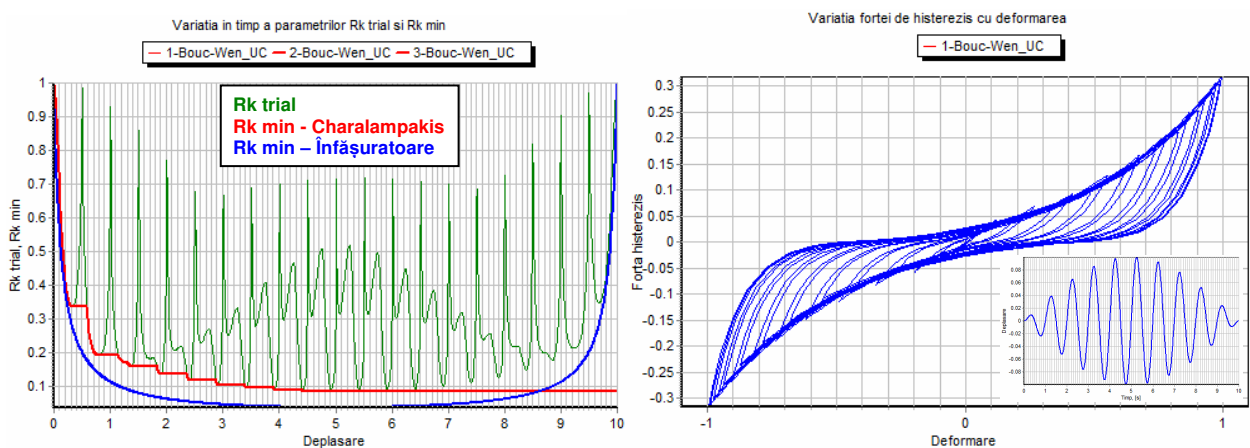


Fig. 5.23 Aplicația *HistPlot* – R_k^{trial} , R_k^{min} și bucla histeretică - modelul Bouc-Wen_UC, pentru deplasare relativă de nivel cu amplitudine variabilă în timp sub formă de ovoid (coordonate adimensionale)

Această nouă adaptare, pe care am propus-o, rezolvă într-o anumită măsură limitările metodei propuse de Sivaselvan, extinzând domeniul de aplicație și la alte tipuri de variație a amplitudinii deplasării relative de nivel pentru care se poate aproxima curba R_k^{min} . Am denumit noua adaptare, modelul Bouc-Wen_UC, acesta permițând o modelare analitică și computațională cu un grad de adecvare mai ridicat a amortizorilor ȘERB, parametrii acestui model adaptat putând fi determinați cu ajutorul aplicației *HistPlot* pentru o anumită formă a buclei histeretice.

5.2.5.4.2 Contribuții la adaptarea modelului Bouc-Wen privind pierderea rezistenței

Modelul Bouc-Wen clasic modelează bucle de histerezis care își păstrează rezistența și rigiditatea și la deplasări mari, deci nu sunt caracterizate de o pierdere a rezistenței (Strength degradation) [20].

Dispozitivul de amortizare de tip ȘERB C-194, așa cum se observă din buclele histeretice obținute experimental și cu metoda elementului finit sunt sisteme care își întăresc rezistența pe măsură ce apare creșterea amplitudinii deplasării datorită rigidității discurilor din oțel de arc care intră în componența amortizorului. De aceea, pentru modelarea dispozitivelor de amortizare cu întărirea rezistenței și implicit a amortizorilor ȘERB C-194, este necesară adaptarea modelului Bouc-Wen clasic folosit la modelarea buclei de histerezis.

Pentru modelarea comportamentului real al amortizorilor ȘERB C-194 este deci necesară modelarea unei bucle histeretice la care rezistența la amplitudini mici să fie mai mare decât cea oferită de modelul Bouc-Wen clasic și să scadă pe măsură ce crește amplitudinea deplasării astfel încât la amplitudine maximă, forța histeretică obținută cu modelul Bouc-Wen clasic să coincidă cu forța obținută cu modelul Bouc-Wen adaptat din punctul de vedere al pierderii rezistenței. Practic, trebuie modelat un amortizor mai puternic care prezintă fenomenul de pierdere a rezistenței.

În afara acestei situații particulare a amortizorilor ȘERB C-194, în practică apare necesitatea modelării unor bucle de histerezis care își pierd rezistența pe măsură ce amplitudinile deplasărilor cresc în timp. În aceste cazuri modelul Bouc-Wen clasic trebuie adaptat folosind reguli de corectare a rezistenței.

Pierderea rezistenței odată cu mărirea amplitudinii deplasării apare datorită prezenței a două fenomene distincte care se manifestă în timpul funcționării amortizorului. Acestea sunt:

- disiparea energiei histeretice;
- creșterea amplitudinii deplasării de la un ciclu la altul.

Astfel de reguli de corectare a modelului Bouc-Wen clasic din punct de vedere al pierderii rezistenței au fost realizate de Sivaselvan [115] și Mostaghel [103]. Conform acestor studii, în cadrul acestor îmbunătățiri ale modelului teoretic Bouc-Wen pierderea rezistenței este modelată prin reducerea capacității curbei backbone specifică histerezisului respectiv. Aceasta este echivalent cu specificarea unei legi de variație pentru forța de fluaj F_y . Sivaselvan a propus următoarea formulă pentru modificarea a forței de fluaj F_y [115]:

$$F_y^{+/-} = F_{y0}^{+/-} \cdot \left(1 - \left(\frac{\xi^{+/-}}{\xi_{\max}^{+/-}} \right)^{1/\beta_1} \right) \cdot \left(1 - \frac{\beta_2}{1 - \beta_2} \cdot \frac{H}{H_{cap}} \right) \quad (5.22)$$

unde: $F_{y0}^{+/-}$ - forța de fluaj inițială pe ramura pozitivă sau negativă;

ξ_{\max} - deplasarea corespunzătoare amplitudinii maxime a ciclului curent;

ξ_{cap} - deplasarea maximă care poate fi atinsă în timpul funcționării amortizorului;

H – energia histeretică disipată;

H_{cap} – energia histeretică disipată în ciclul cu deplasarea maximă;

β_1 – parametru de pierdere a rezistenței datorat ductilității;

β_2 - parametru de pierdere a rezistenței datorat disipării energiei.

Din relația (5.22) se observă că forța F_y se calculează pe baza valorii sale inițiale F_{y0} compensată cu doi factori prezenți în cei doi termeni din ecuație. Așa cum arată Sivaselvan [115], acești doi termeni reprezintă :

- pierderea rezistenței datorate creșterii amplitudinii deplasării;
- pierderea rezistenței datorat disipării energiei histeretice.

Relația pentru H determinată de Sivaselvan este [115]:

$$\dot{H} = z \cdot \dot{\xi} \cdot \left(1 - \frac{K_{el} + R_k \cdot K_h}{R_k \cdot K_0} \right) \quad (5.23)$$

unde: z - forța histeretică;

$\dot{\xi}$ – viteza de deplasare;

K_{el} - rigiditatea elastică a componentei elastice a amortizorului;

R_k – factorul de relaxare a rigidității (Stiffness degradation);

K_h – rigiditatea histeretică.

Implementând această modificare adusă modelului Bouc-Wen clasic în aplicația software *HistPlot* am observat limitările acestei metode propuse de Sivaselvan în cazul buclelor histeretice cu caracteristică neliniară progresivă specifică amortizorilor ȘERB C-194. Am implementat acest model modificat din punctul de vedere al corectării rezistenței în aplicația *Histplot* în cadrul modelului Bouc-Wen_UC cu opțiunea “*Energ*”. Efectele folosirii acestui model sunt exemplificate în fig. 5.24, pentru o creștere liniară a amplitudinii deplasării relative de nivel.

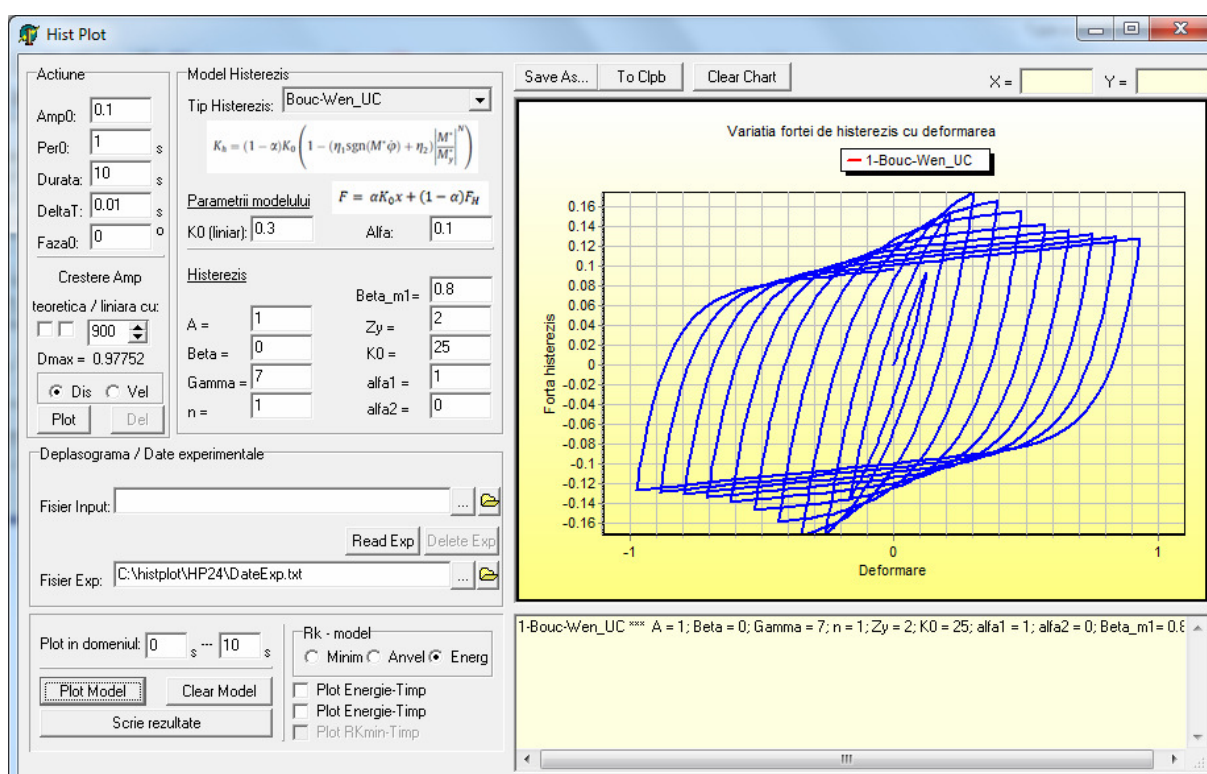


Fig. 5.24 Aplicația *HistPlot* - bucla histeretică obținută cu modelul Bouc-Wen_UC, opțiunea “*Energ*”

Modificarea propusă funcționează foarte bine pentru bucle histeretice cu caracteristică liniară sau cu caracteristică degresivă. În aceste cazuri variația valorilor lui H , energia histeretică disipată, are o formă logică și corectă. În figurile 5.25 și 5.26 am prezentat exemple ale efectului acestei adaptări a modelului Bouc-Wen asupra buclelor histeretice cu caracteristică liniară și neliniară degresivă, studiate cu ajutorul aplicației *HistPlot*. În aceste cazuri adaptarea modelului oferă rezultate corecte în condițiile creșterii amplitudinii deplasării.

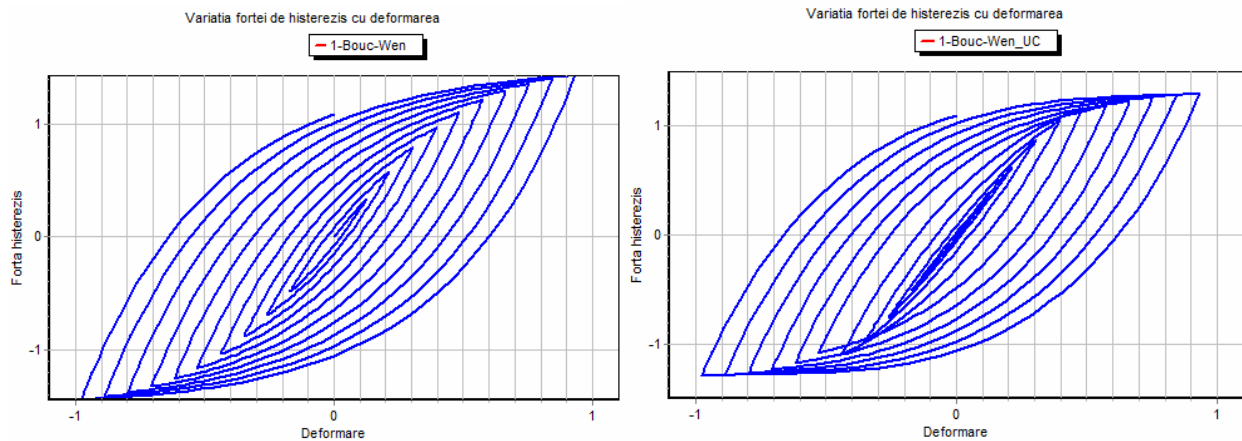


Fig. 5.25 Aplicația *HistPlot* – Bucle de histeretis cu caracteristica liniară obținute cu modelele Bouc Wen clasic (stânga) și Bouc-Wen_UC-Energ (dreapta)

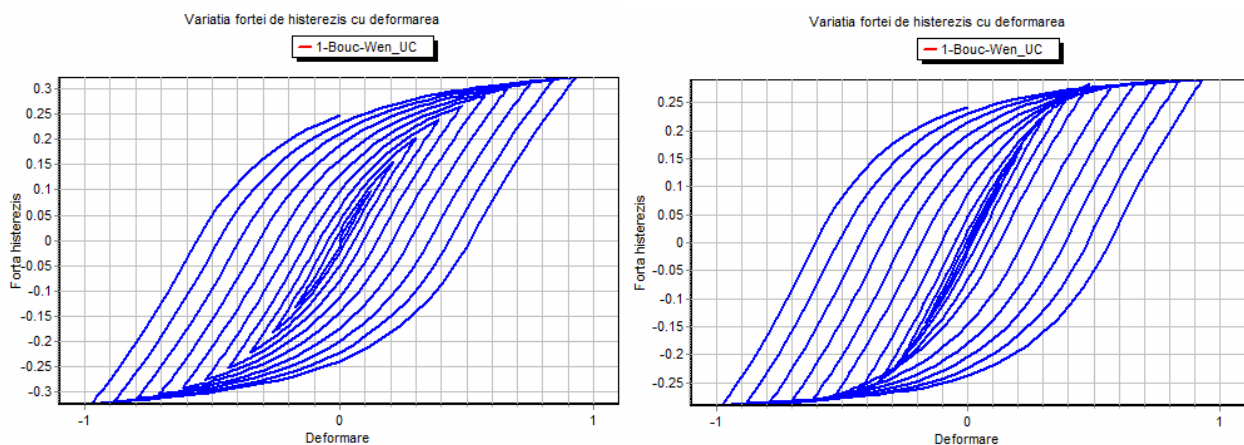


Fig. 5.26 Aplicația *HistPlot* – Bucle de histeretis cu caracteristica neliniară degresivă obținute cu modelele Bouc Wen clasic (stânga) și Bouc-Wen_UC-Energ (dreapta)

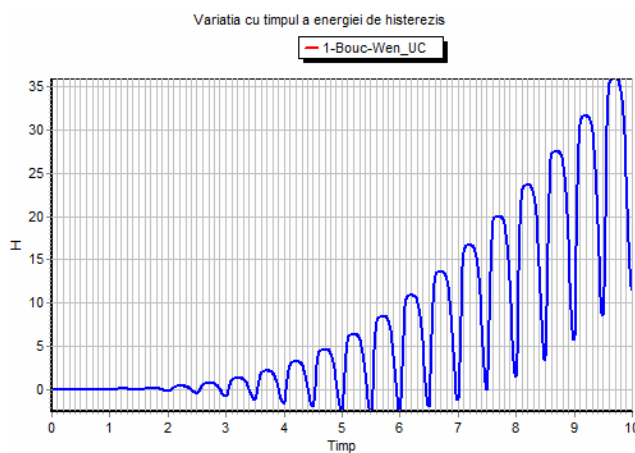


Fig. 5.27 Variația energiei H în timp

În cazul buclelor histeretice cu caracteristică elastică neliniară progresivă specifică amortizorilor ȘERB C-194, variația energiei histeretice H , calculată cu ecuația (5.23) propusă de Sivaselvan rezultă în anumite cazuri, negativă, fapt care denotă imposibilitatea aplicării acestei metode de adaptare a modelului Bouc-Wen clasic, la modelarea comportamentului amortizorilor ȘERB. În fig. 5.27 se observă că variația energiei H în timp are în anumite intervale, valori negative.

În vederea aplicării metodei de îmbunătățire a modelului Bouc-Wen clasic din punctul de vedere al corectării rezistenței (Strength degradation), pentru modelarea cât mai fidelă a buclei de histerezis a amortizorilor ȘERB, am propus o altă ecuație care ține cont de fenomenul de pierdere a rezistenței doar datorită creșterii amplitudinii deplasării.

Deși Sivaselvan [115] propune ca ecuație care modelează acest fenomen relația:

$$F_y^{+/-} = F_{y0}^{+/-} \cdot \left(1 - \left(\frac{\xi^{+/-}}{\xi_{cap}^{+/-}} \right)^{1/\beta_1} \right) \quad (5.24)$$

aceasta nu permite o suficientă modificare a forței hysteretice care să asigure modelarea corectă a buclei hysteretice reale a amortizorilor ȘERB C-194, fapt rezultat în urma verificărilor pe care le-am realizat. De aceea, în lucrarea de față am propus o nouă relație matematică pentru calculul lui F_y , pe care am dedus-o comparând geometria buclei de histerezis reale cu cea obținută cu modelul Bouc-Wen clasic.

În urma acestei comparații am observat următoarele caracteristici specifice modelării buclelor amortizorilor ȘERB C-194 cu ajutorul modelului Bouc-Wen clasic:

- la amplitudini mici (până la 10% din deplasarea maximă) modelul Bouc-Wen clasic oferă valori ale forței de histerezis de până la de patru ori mai mici decât valorile reale;
- la amplitudini medii (între 40% și 60% din deplasarea maximă) cu modelul Bouc-Wen clasic obținem valori ale forței hysteretice de 1,4 până la de 1,8 ori mai mici decât valorile reale;
- la amplitudini mari (între 90% și 100% din deplasarea maximă) cu modelul Bouc-Wen clasic obținem valori ale forței hysteretice foarte apropiate de valorile reale;
- factorul de pierdere a rezistenței în cazul amortizorilor de tip ȘERB C-194 trebuie să scadă de la valoarea 4 la valoarea 1 odată cu creșterea amplitudinii deplasării.

Analizând aceste concluzii rezultate în urma comparației între cele două tipuri de bucle de histerezis, am considerat necesar găsirea unui factor de adaptare a modelului Bouc-Wen clasic, a cărui relație matematică să depindă de amplitudinea deplasării și să scadă de la valoarea 4 la valoarea 1, neliniar, odată cu creșterea amplitudinii deplasării.

Noua relație pe care am propus-o pentru adaptarea modelului Bouc-Wen clasic din considerente de pierdere a rezistenței, pentru modelarea cu succes a amortizorilor de tip ȘERB, este:

$$F_y^{+/-} = F_{y0}^{+/-} \cdot \left(\frac{\beta_1}{1 + \left(\frac{|\xi_{max}|}{\xi_{cap}} \right)^{\beta_2}} - \left(\frac{|\xi_{max}|}{\xi_{cap}} \right)^{\beta_3} \right)^{\beta_4} \quad (5.25)$$

în care:

ξ_{max} – cea mai recentă amplitudine a deplasării la care viteza își schimbă semnul;

ξ_{cap} – amplitudinea maximă a deplasării pe care o poate suporta amortizorul în timpul funcționării normale;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – parametrii variabili funcție de forma și dimensiunile buclei de histerezis.

Rezultă astfel, pe lângă Bouc-Wen_UC și Bouc-Wen_UC-Energ, un al treilea model Bouc-Wen modificat pe care l-am implementat în aplicația *HistPlot* cu numele Bouc-Wen_Strength.

Se observă că factorul de adaptare propus pentru obținerea modelului Bouc-Wen_Strength, depinde de patru parametri ale căror valori influențează corectarea forțelor hysteretice oferite de modelul Bouc-Wen clasic în maniera prezentată în figurile 5.28 – 5.30.

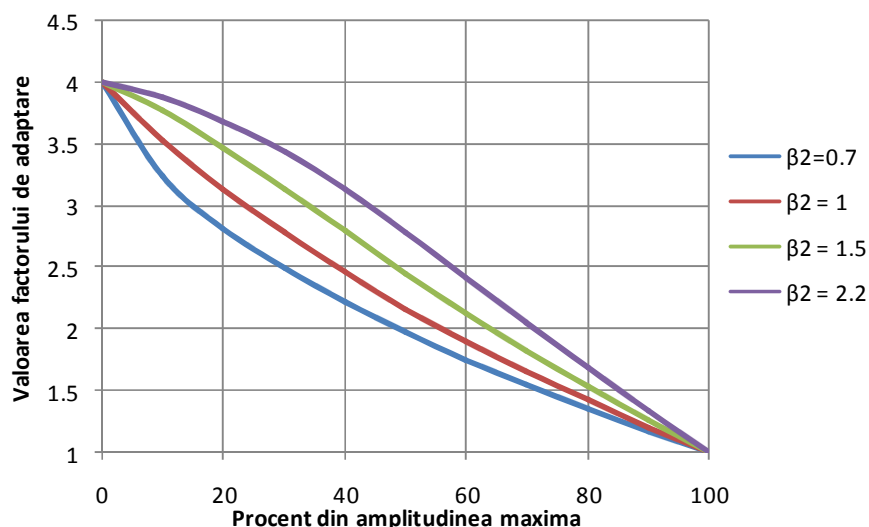


Fig. 5.28 Influența modificării parametrului β_2 asupra variației factorului de adaptare propus

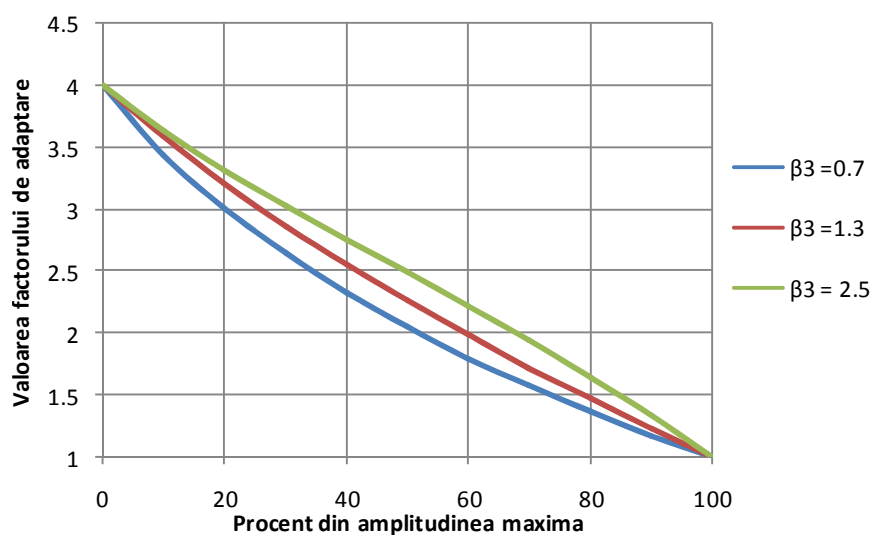


Fig. 5.29 Influența modificării parametrului β_3 asupra variației factorului de adaptare propus

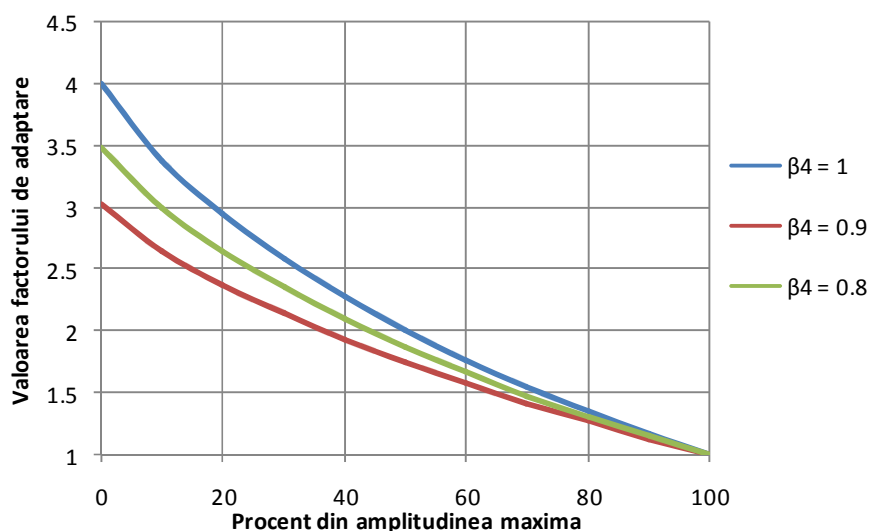


Fig. 5.30 Influența modificării parametrului β_4 asupra variației factorului de adaptare propus

Am implementat acest factor de adaptare în aplicația software *HistPlot* și s-au obținut rezultate corecte pentru buclele de histerzis modelate cu modelul Bouc-Wen adaptat cu relația matematică propusă, pentru orice variație a deplasării care prezintă amplitudini simetrice ale forței histeretice.

În fig. 5.31 este prezentată bucla de histerzis pe care am obținut-o cu modelul adaptat Bouc-Wen_Strength care modelează adecvat comportamentul real al amortizorilor ȘERB.

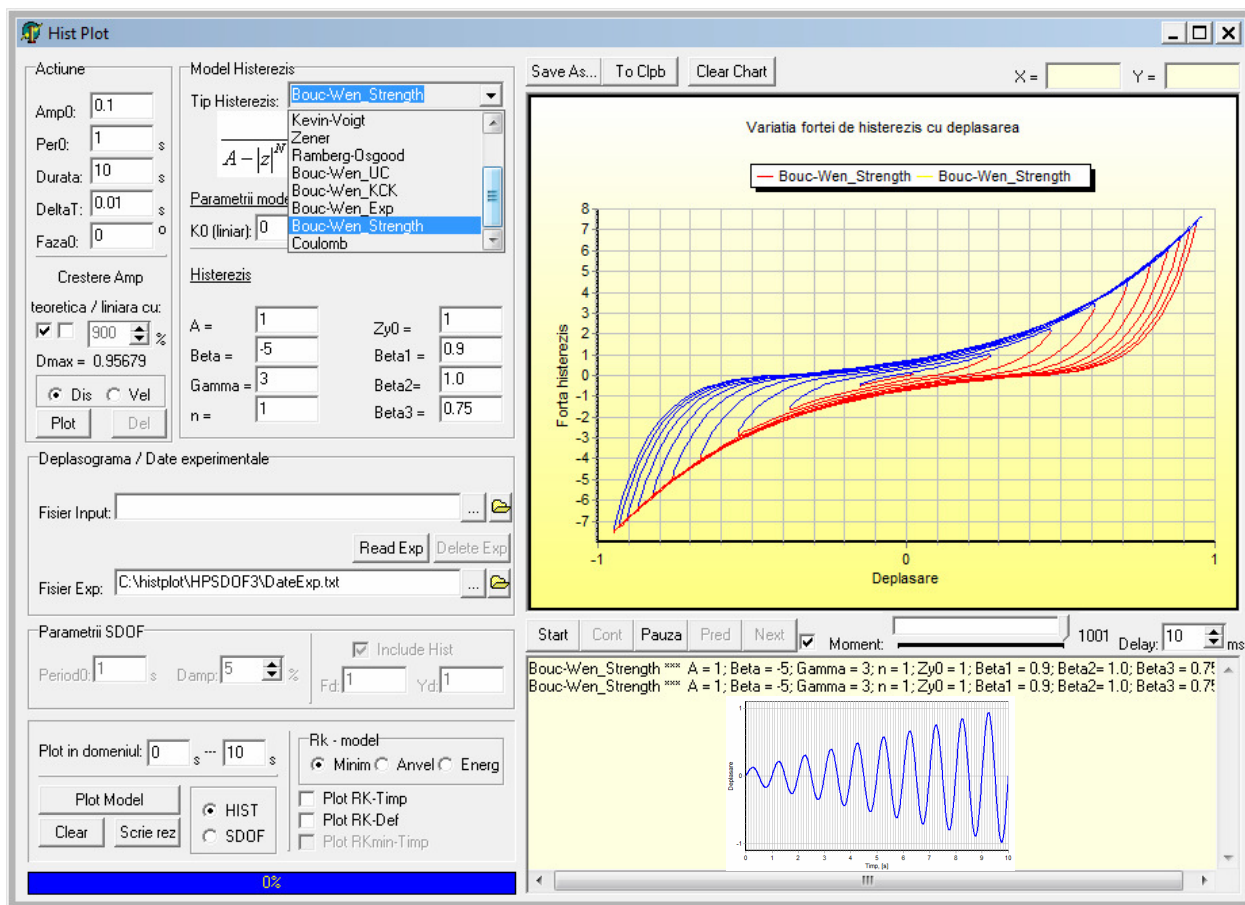


Fig. 5.31 Aplicația *HistPlot*, bucla histeretică obținută cu modelul Bouc-Wen_Strength la modelarea amortizorilor ȘERB

Acest nou model Bouc-Wen destinat în special modelării comportamentului amortizorilor de suprastructură ȘERB are următoarele avantaje:

- modelează adecvat bucla histeretică a amortizorilor de tip ȘERB C-194;
- are aceeași versatilitate ca a modelului clasic Bouc-Wen având însă în plus și posibilitatea corectării rezistenței (Strength degradation);
- este ușor de implementat computațional deoarece constă doar în înmulțirea lui $F_y^{+/-}$ cu un nou termen;
- se aplică pentru variații ale deplasării relative de nivel cu amplitudini succesive relativ egale, element foarte des întâlnit în studiile teoretice și computaționale. Amplitudinile pot să crească sau să scadă însă diferența între două amplitudini succesive trebuie să fie suficient de mică deoarece influențează în mod direct corectitudinea modelării buclei histeretice reale;
- are patru parametri de formă care permit o facilă adaptare a buclei histeretice rezultate la datele particulare ale amortizorului modelat.

5.2.5.5 Contribuții originale la modelarea matematică a amortizorilor ȘERB C-194

Așa cum am prezentat în cadrul îmbunătățirilor aduse modelului Bouc-Wen clasic de Sivaselvan, Wang, Charalampakis pe care le-am modificat pentru a le adapta modelării amortizorilor ȘERB C-194, buclele de histerezis obținute cu aceste modele teoretice sunt corecte în anumite ipoteze:

- variația deplasării în timp este sinusoidală;
- amplitudinea deplasării este relativ simetrică pe ramura pozitivă cu cea de pe ramura negativă;
- se cunoaște dinainte cu aproximație variația deplasării în timp.

Aceste ipoteze, în care modelarea amortizorilor ȘERB C-194 folosind modelul Bouc-Wen îmbunătățit este corectă, sunt suficiente unui calcul comparativ al efectelor produse asupra structurii de echiparea cu amortizori ȘERB față de echiparea structurii cu alte tipuri de amortizori folosiți în practica curentă.

Însă, pentru realizarea unei comparații mai generale, am propus adaptarea modelului Bouc-Wen clasic astfel încât să realizăm această comparație în condițiile unor seisme reale sau a unor accelerograme de proiectare cu T_c și a_g diferite de la caz la caz.

Datorită limitărilor modelului Bouc-Wen clasic, acesta, deși a mai fost aplicat pentru modelarea amortizorilor SERB C-194, nu oferă rezultate corecte datorită motivelor expuse anterior, iar îmbunătățirile aduse nu sunt valabile în condițiile unei accelerograme reale sau de proiectare, conform studiilor pe care le-am realizat și prezentat.

În cadrul acestui proces de adaptare a modelului Bouc-Wen clasic, am analizat buclele histeretice ale amortizorului ȘERB 194-C pe care le-am obținut experimental (fig 3.7 și fig. 3.9), în cadrul ICECON București. Aceste teste de laborator au implicat mărirea forței de tracțiune aplicată amortizorului în trepte urmate de o relaxare a forței. În urma analizei grafice a buclei de histerezis se pot observa următoarele:

- când se ajunge la un capăt al ramurii de încărcare a buclei de la care apare micșorarea deplasării și scăderea forței de tracțiune, forța histeretică scade destul abrupt către ramura de descărcare a buclei de histerezis;
- când se ajunge la un capăt al ramurii de descărcare a buclei de la care apare mărirea deplasării și creșterea forței de tracțiune, forța histeretică crește destul de abrupt către ramura de încărcare a buclei de histerzis.

Am concluzionat astfel, că trecerile de pe o ramură a buclei pe cealaltă ramură se fac destul de repede și deci abrupt. Acest fenomen nu se observă și pe bucla de histerezis obținută cu M.E.F. în ANSYS pentru amortizorul ȘERB C-194 prototip, din mai multe cauze, una dintre ele fiind faptul că s-a considerat constant coeficientul de frecare pe durata întregului ciclu de încărcare a amortizorului. În realitate coeficientul de frecare este de până la de trei ori mai mare la trecerea din repaus în mișcare, situație care apare la fiecare trecere de pe o ramură pe cealaltă a buclei histeretice, adică exact acolo unde se observă diferențe între buclele histeretice determinate numeric și experimental. Din acest motiv bucla de histerezis obținută experimental este cea care trebuie considerată în cadrul acestui studiu de adaptare a modelului Bouc-Wen.

Pentru a construi un model teoretic și computațional care să poată fi aplicat în orice condiții de variație a deplasării relative de nivel, am simplificat acest fenomen de trecere abruptă de pe ramura de încărcare pe cea de descărcare a buclei și invers, considerând ipoteza simplificatoare că aceasta se face la limită printr-o linie verticală.

Această ipoteză necesară modelării amortizorilor ȘERB C-194, modelează destul de adecvat bucla de histerezis experimentală, deoarece cele două bucle sunt destul de apropiate între ele și de aceeași parte a axei Ox , deci forța histeretică își păstrează semnul în timpul trecerii de pe o ramură a buclei pe cealaltă.

În acest caz, pentru implementarea teoretică și computațională a acestui model Bouc-Wen adaptat, ar trebui să avem definite ecuațiile celor două ramuri ale buclei de histerezis, iar trecerile de la una din ramuri la cealaltă să se realizeze la schimbarea semnului vitezei de deplasare a amortizorului (la trecerea de la întindere la compresiune și invers).

Plecând de la această idee, este evident că cele două ramuri ale buclei trebuie să rămână constante în timpul funcționării amortizorului, deci nu putem folosi expresia derivată a forței histeretice specifice modelului Bouc-Wen clasic. De aceea, am folosit pentru această adaptare a modelului Bouc-Wen, expresia integrată a ecuației Bouc-Wen (ecuația (5.26)), considerând $n = 1$.

Astfel, ecuația modelului Bouc-Wen clasic prezentată în ecuația (5.9) este:

$$\dot{z} = \left[A - |z|^n \cdot (\beta + \operatorname{sgn}(\dot{\xi} \cdot z) \cdot \gamma) \right] \cdot \dot{\xi}$$

Considerând $n = 1$, rezultă:

$$dz = \left[A - \operatorname{sgn}(z) \cdot (\beta + \gamma \cdot \operatorname{sgn}(z \cdot \dot{\xi})) \cdot z \right] \cdot d\xi \quad (5.26)$$

Notăm cu w expresia: $w = \operatorname{sgn}(z) \cdot (\beta + \operatorname{sgn}(\dot{\xi} \cdot z) \cdot \gamma)$

Relația Bouc-Wen devine astfel:

$$dz = (A - w \cdot z) \cdot d\xi \text{ sau } \frac{dz}{A - w \cdot z} = d\xi \quad (5.27)$$

Aplicând integrala, rezultă:

$$\ln(A - w \cdot z) = \ln C - w \cdot \xi \quad (5.28)$$

în care pentru ușurința calculului am exprimat constanta de integrare sub formă logaritmică $\ln(C)$

Notăm $\xi = D_{\max}$, $z = F_{\max}$, în care D_{\max} și F_{\max} sunt deplasarea și forța histeretică maxime specifice amortizorului modelat, aceste valori determinându-se experimental pentru fiecare tip de amortizor ȘERB în parte.

Atunci:

$$\ln(A - w \cdot F_{\max}) = \ln C - w \cdot D_{\max} \quad (5.29)$$

de unde rezultă expresia constantei de integrare pentru punctele din cadranul 1 și 3 al buclei de histerezis când forța histeretică și deplasarea au același semn:

$$\ln \frac{A - w \cdot F_{\max}}{C} = -w \cdot D_{\max} \Rightarrow C_B = (A - w \cdot F_{\max}) \cdot e^{w \cdot D_{\max}} \quad (5.30)$$

Pentru cazul când deplasarea este nulă, considerăm: $\xi_0 = D_0 = 0$, $z = F_0$.

Expresia constantei de integrare pentru punctele din cadranul 2 și 4 al buclei de histerezis când forța histeretică și deplasarea au semne contrare este:

$$\ln \frac{(A - w \cdot F_0)}{C} = -w \cdot D_0 \Rightarrow C_C = (A - w \cdot F_0) \cdot e^{w \cdot D_0} \quad (5.31)$$

Ecuația (5.31) se mai poate scrie:

$$\ln \frac{A - w \cdot z}{C} = -w \cdot \xi_0 \quad ; \quad A - w \cdot z = C \cdot e^{-w \cdot \xi_0} \quad ; \quad z = \frac{A - C \cdot e^{-w \cdot \xi_0}}{w} \quad (5.32)$$

Cu notațiile: $C_B \equiv ct_1$, $C_C \equiv ct_2$, rezultă expresia forței hysteretice pentru ambele ramuri ale buclei de histererezis:

$$C = \frac{[1 + \text{sign}(z) \cdot \text{sign}(\xi_0)] \cdot ct_1 + [1 - \text{sign}(z) \cdot \text{sign}(\xi_0)] \cdot ct_2}{2}$$

$$\begin{cases} ct_1 = [A - w \cdot F_{\max} \cdot \text{sign}(z)] \cdot e^{w \cdot D_{\max} \cdot \text{sign}(\xi_0)} \\ ct_2 = [A - w \cdot F_0 \cdot \text{sign}(z)] \cdot e^{w \cdot D_0 \cdot \text{sign}(\xi_0)} \end{cases}, \quad (D_0 = 0) \quad (5.33)$$

Această ecuație este unică pentru ambele ramuri și este ușor de aplicat computațional. Constanta C poate lua valoarea corespunzătoare ramurii de încărcare sau de descărcare iar w ia valori diferite în funcție de ramura buclei.

Rezultă astfel cazurile :

- cazul 1 – când forța hysteretică și deplasarea au același semn (cadrantul 1 și 3) $C = ct_1$;
- cazul 2 – când forța hysteretică și deplasarea au semne contrare (cadrantul 2 și 4) $C = ct_2$.

Astfel am obținut o expresie matematică unică, originală, care descrie întreaga buclă de histererezis adaptată amortizorilor de tip ȘERB C-194 și care prezintă avantajul că are o formă ușor de implementat computațional.

Am implementat această expresie a forței hysteretice în aplicația software *HistPlot* adăugând astfel opțiunea *Bouc-Wen_Exp* cu ajutorul căreia am trasat buclele hysteretice din figurile 5.32 și 5.33. De asemenea, am implementat acest nou model și în aplicația *GenEcAm*.

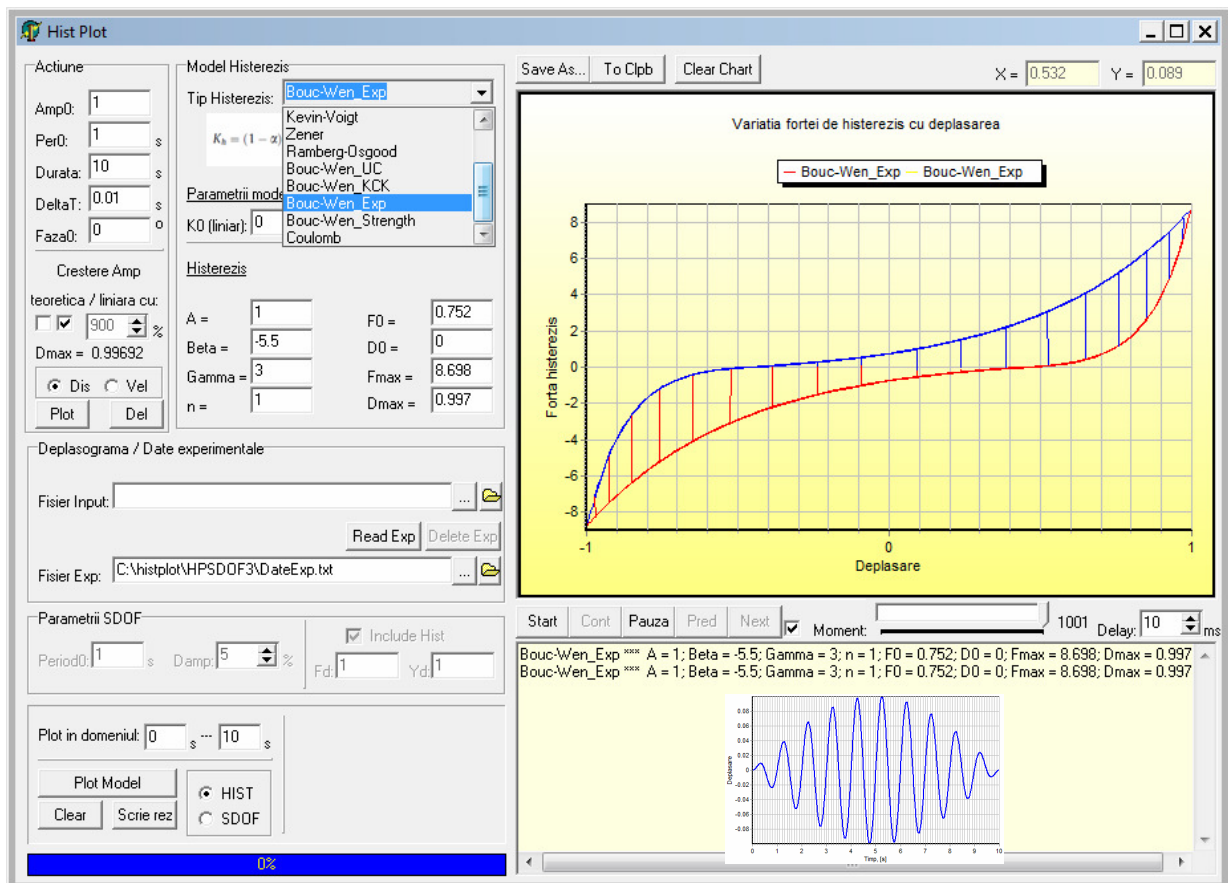


Fig. 5.32 Aplicația *HistPlot*, bucla hysteretică obținută cu modelul *Bouc-Wen_Exp*

Avantajul major al noului model Bouc-Wen realizat în cadrul acestui studiu este că forma și dimensiunile buclei de histerezis obținute se păstrează indiferent de cum variază deplasarea în amortizor.

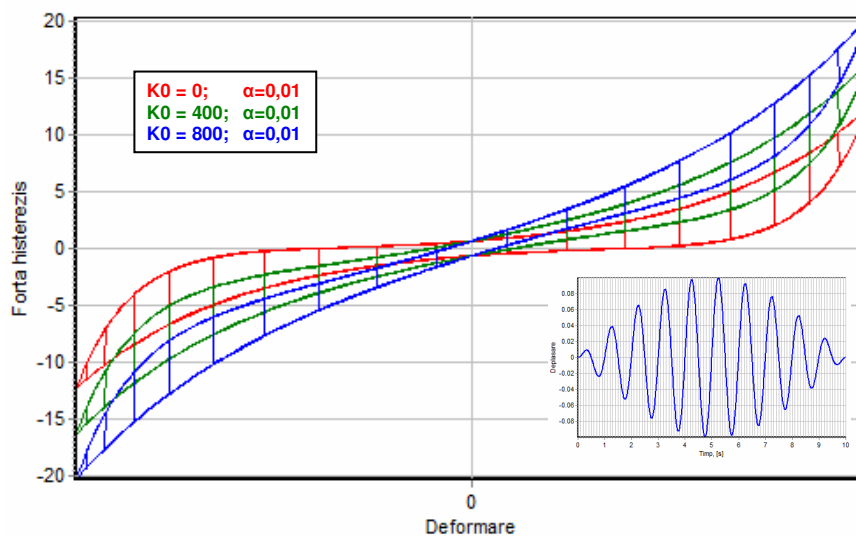


Fig. 5.33 Aplicația *HistPlot*, bucla histeretică obținută cu modelul Bouc-Wen_Exp la diferite valori ale lui K_0

Din analiza buclelor de histerezis pe care le-am obținut cu aplicația *HistPlot* (figurile 5.32, 5.33) se observă că indiferent de variația deplasării în timp bucla de histerezis își păstrează forma și dimensiunile, pretându-se astfel la modelarea comportamentului histeretic al amortizorilor tip ȘERB C-194 la variații ale deplasării relative de nivel specifice unei accelerograme seismice reale sau de proiectare.

Se observă în fig. 5.32 că aplicația software *HistPlot* determină valorile F_0 și F_{max} pentru fiecare bucla de histerezis. Acestea sunt necesare determinării celor două constante de integrare C_1 și C_2 care reprezintă date de input pentru implementarea acestui model Bouc-Wen îmbunătățit în aplicațiile software de modelare a răspunsului seismic al clădirilor echipate cu dispozitive ȘERB C-194, cum este aplicația software *GenEcAm* realizată în cadrul acestui studiu.

În concluzie, avantajele modelului Bouc-Wen_Exp pe care l-am realizat pentru modelarea amortizorilor tip ȘERB C-194 sunt următoarele:

- pentru a fi aplicat avem nevoie doar de bucla de histerezis experimentală a amortizorului de tip ȘERB C-194 folosit din care se preiau valorile parametrilor F_0 , F_{max} , D_{max} .
- este caracterizat de o singură expresie matematică permițând folosirea facilă a ei în studiul computațional și implementarea rapidă în aplicații software;
- modelează adecvat bucla histeretică obținută experimental pentru amortizorul ȘERB C-194 păstrându-și stabile forma și dimensiunile în timpul variației deplasării;
- se poate folosi pentru orice variație a deplasării în timp, deci și în modele computaționale ale clădirilor echipate cu amortizori ȘERB având ca input, orice accelerogramă de proiectare sau reală;
- se adaptează ușor oricărui tip de amortizor ȘERB de suprastructură, prin modificarea parametrilor β , γ , A , F_0 , F_{max} și D_{max} , folosind în acest proces aplicația *HistPlot* care ajută la fitarea buclei de histerezis teoretice cu bucla de histerezis experimentală.

5.2.5.6 Modelul Bouc-Wen Papion

Dispozitivele telescopice de tip ȘERB TEL destinate echipării antiseismice a clădirilor în fundație în paralel cu sistemul de izolare seismică au o buclă de histerezis de tip Papion pentru care nu există un model teoretic clasic de modelare.

Șerban și Androne [136] au găsit o relație matematică pentru modelarea buclei de histerezis de tip Papion care s-a obținut din modelul clasic Bouc-Wen folosindu-se decât curba din cadranul I care a fost apoi folosită pentru toate cele patru cadrane. Forma finală a acestui model Bouc-Wen modificat este [136]:

$$\frac{dz}{A + \beta \cdot z} = \text{sign}(\xi) \cdot d\xi \quad (5.34)$$

cu $A, \beta > 0$.

Se observă că relația matematică (5.34) este o relație diferențială putându-se folosi ca atare în programul *GenEcAm* pentru modelarea dispozitivelor telescopice ȘERB. Introducerea acestui tip de histerezis în programul *GenEcAm* permite astfel comparația între performanțele antiseismice ale acestor dispozitive ȘERB și amortizorii cu fluid vâcos care se folosesc în prezent în mod curent și care s-au folosit și în România.

Acest model matematic l-am implementat în aplicația *HistPlot*, cu numele Papion, pentru a determina valorile parametrilor A , β și F_0 ale buclei histeretice teoretice necesari modelării cât mai adecvate a buclei de histerezis obținută experimental cu amortizorii telescopici ȘERB reali. În fig. 5.34 este prezentat un exemplu care poate modela adecvat forma buclei de histerezis obținută experimental pe amortizorii telescopici ȘERB, pentru care am ales $A=-70$, $\beta=4$, $F_0=20$.

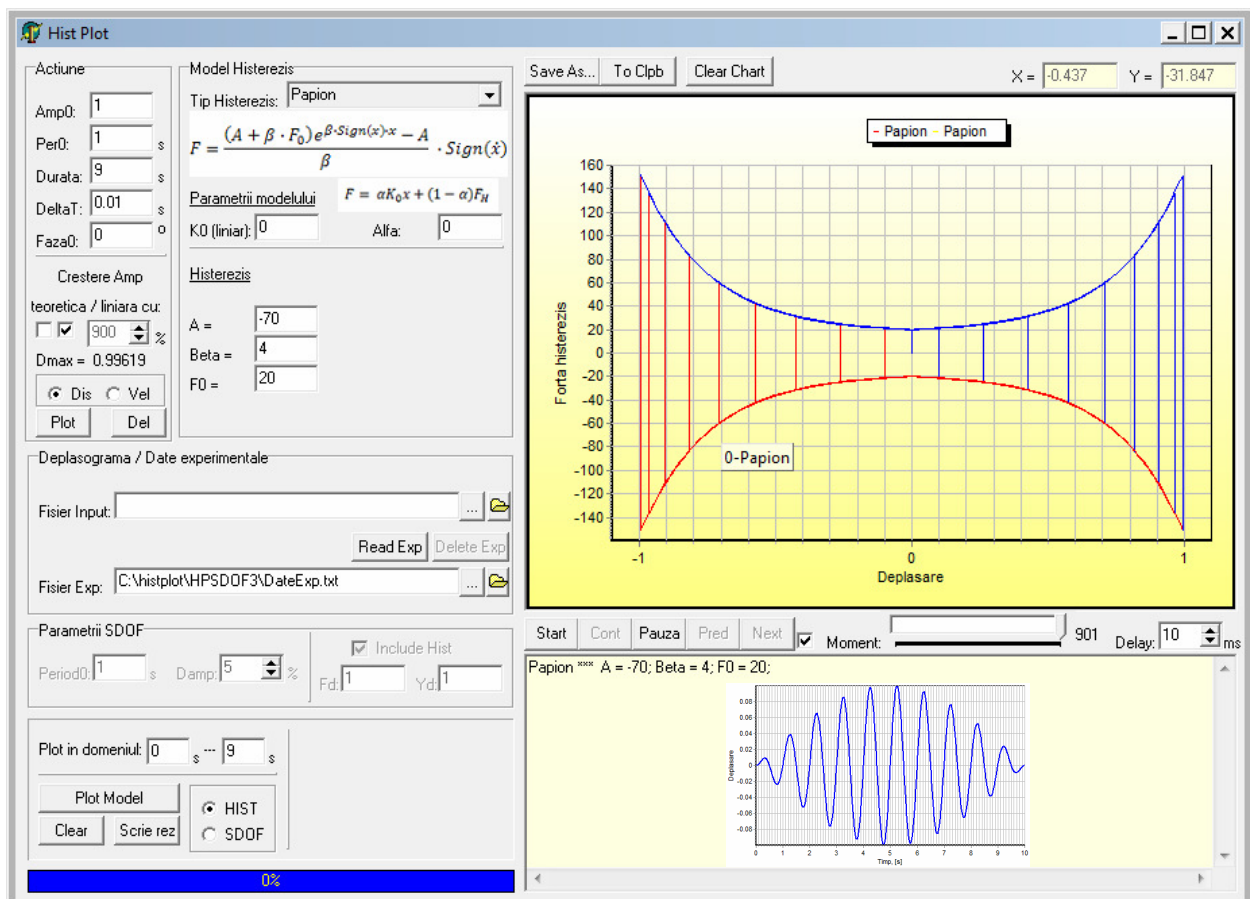


Fig. 5.34 Aplicația *HistPlot*, bucla histeretică - modelul Bouc-Wen Papion (coordonate adimensionale)

În figurile 5.35 și 5.36 este prezentată variația formei buclei histeretice în funcție de valorile parametrilor modelului Bouc-Wen Papion: A , β , F_0 , α și K_0 , pe care am obținut-o cu aplicația *HistPlot*.

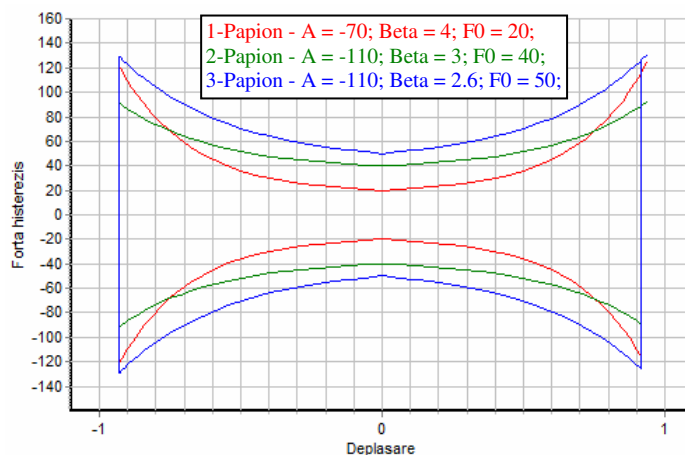


Fig. 5.35 Aplicația *HistPlot*, modelul Bouc-Wen Papion, variația formei buclei histeretice funcție de A , β și F_0 (coordonate adimensionale)

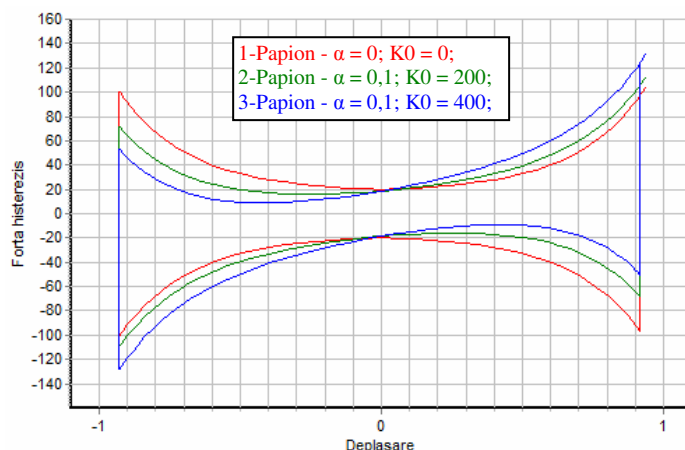


Fig. 5.36 *HistPlot*, modelul Bouc-Wen Papion, variația formei buclei histeretice funcție de α și K_0 (coordonate adimensionale)

În programul *GenEcAm* acest tip de amortizor telescopic ȘERB poate fi folosit în două situații:

- la primul nivel când se consideră interacțiunea sol-fundație ca fiind perfect rigidă. În această situație primul nivel va avea două tipuri de dispozitive antiseismice: izolatorii seismici și dispozitivele telescopice ȘERB. În programul *GenEcAm* se pot adăuga oricâte astfel de dispozitive cu parametrii diferiți care vor lucra în paralel în timpul modelării seismului;
- la al doilea nivel, caz în care, la primul nivel se introduce modelul buclei de histerezis pentru interacțiunea sol-fundație. În acest caz, la fel ca și în primul, se pot folosi mai multe dispozitive cu parametrii diferiți care vor lucra în paralel în timpul modelării computaționale la seism.

Se observă că forța de amortizare specifică acestui model este nenulă când deplasarea este zero. Forma buclei tip Papion depinde foarte mult de valoarea forței inițiale F_0 . De aceea, această valoare trebuie specificată, în programul *GenEcAm*, de către utilizatorul programului în secțiunea de condiții inițiale a blocului *DEE* din aplicația *Simulink* asociată.

Avantajele acestui model de histerezis sunt asemănătoare modelului anterior Bouc-Wen_Exp, pentru că provin din același model teoretic clasic.

5.2.6 Alte modele de histerezis

Pentru creșterea domeniului de aplicație a programului *GenEcAm*, este utilă folosirea și a altor modele matematice pentru bucle de histerezis specifice dispozitivelor de amortizare sau izolare antiseismică. Pentru a implementa și alte modele de histerezis, am definit în programul *GenEcAm* opțiunea *User Function* care permite scrierea sistemului de ecuații diferențiale al structurii în funcție de parametrii $u(3), u(4) \dots u(n)$, unde n este numărul de etaje la care s-au montat amortizori.

Modulul *Differential Equation Editor* din aplicația *Simulink* asociată programului *GenEcAm* va avea în acest caz, mai mult de două intrări. Primele două intrări standard valabile pentru toate modelele teoretice anterioare sunt: $u(1)$ care este accelerația în timp și $u(2)$, viteza în timp asociate accelerogramelor seismice de proiectare introduse. Celelalte intrări sunt $u(3), u(4) \dots u(n)$, care reprezintă forțele de amortizare de la primul nivel până la nivelul " $n-2$ ".

Opțiunea *User Function* permite introducerea expresiei forței de amortizare în modulul *MatLab Embedded Function* din aplicația *Simulink* asociată. În acest caz, modelele matematice ale buclelor de histerezis nu pot fi introduse în formă diferențială, ci doar în formă algebrică. Aceste modele pot fi definite pe mai multe ramuri și pot fi oricât de complexe. Valoarea forței de amortizare la fiecare nivel, va fi astfel calculată în afara modului de rezolvare a sistemului de ecuații diferențiale și introdusă la fiecare pas al modelării ca dată de intrare printr-un artificiu permis de aplicația *Simulink* de a transfera aceste forțe ca parametrii ai unor module de tip *Gain* care furnizează direct datele de intrare în modulul *DEE*. În acest fel, s-a evitat apariția unor blocaje software în aplicația *Simulink* care ar fi creat dificultăți de rezolvare computațională.

Transferul valorii forțelor de amortizare în parametrii modulelor *Gain* s-a realizat din modulul *MatLab Embedded Function* care definește relațiile matematice pentru fiecare forță de amortizare.

Prin introducerea acestei opțiuni, pot fi introduse practic orice modele teoretice de histerezis cu condiția să aibă o formă algebrică pentru variația forței din amortizor în timp.

5.2.7 Concluzii

În acest subcapitol am prezentat modelele matematice pe care le-am implementat în aplicația *HistPlot* și în aplicația *GenEcAm* în vederea modelării comportamentului unei clădiri echipată antiseismic solicitată la seism.

Actualele aplicații comerciale destinate modelării comportamentului la seism al clădirilor echipate antiseismic au un număr limitat de modele teoretice pentru modelarea buclelor de histerezis ale dispozitivelor de amortizare folosite. Din această cauză, multe tipuri de bucle de histerezis sunt approximate pe baza modelelor teoretice implementate în aceste aplicații, cu un grad mai mic sau mai mare de aproximare.

Deoarece amortizorii românești ȘERB nu au o buclă de histerezis clasică, a fost necesară realizarea unor aplicații software (*HistPlot* și *GenEcAm* – detaliate în subcapitolul 5.4) care să permită evaluarea justă a performanțelor antiseismice ale acestora, prin implementarea unor modele teoretice mai puțin uzuale.

Pe lângă modelele clasice de histerezis (Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener și amortizare vâscoasă), am implementat software încă cinci variante ale modelului Bouc-Wen dintre care două sunt contribuții originale care nu au mai fost prezentate în literatura de specialitate și care

sunt extrem de utile în modelarea dispozitivelor de amortizare tip ȘERB montate la suprastructură. Cele cinci modele Bouc-Wen pe care le-am implementat sunt:

- Modelul Bouc-Wen clasic – model foarte versatil, definit printr-o ecuație diferențială, care nu modelează corect comportamentul amortizorilor ȘERB de suprastructură;
- Modelul Bouc-Wen_UC permite modificarea rigidității care caracterizează bucla histeretică;
- Modelul Bouc-Wen_Strength permite modificarea rezistenței care caracterizează bucla histeretică, model cu contribuții originale în definirea coeficientului de adaptare;
- Modelul Bouc-Wen_Exp, model nou, original, care permite modelarea comportamentului amortizorilor ȘERB de suprastructură pentru orice variație a deplasării relative de nivel (specifice accelerogramelor reale sau de proiectare);
- Modelul Bouc-Wen Papion permite modelarea comportamentului amortizorilor telescopici care se montează în fundație.

Avantajele celor două modele originale pe care le-am propus, Bouc-Wen_Strength și Bouc-Wen_Exp, derivate din modelul Bouc-Wen clasic sunt:

- au o formă matematică care poate fi foarte ușor implementată în programe de modelare computațională a sistemelor de amortizare pentru clădiri la seism;
- modelează adecvat forma buclei de histerezis a amortizorilor de tip ȘERB C-194;
- se aplică pentru un domeniu larg de variație a deplasării relative de nivel în timp.
- ambele modele teoretice noi, au mai mulți parametri care pot fi ușor identificați cu ajutorul aplicației *HistPlot*, în care acestea au fost implementate, pe baza datelor experimentale obținute pe amortizorii ȘERB C-194 reali, printr-un proces de fitare grafică a curbei teoretice cu cea obținută experimental;
- deoarece modelează fidel buclele de histerezis experimentale, aceste modele permit o comparație justă între performanțele antiseismice ale amortizorilor ȘERB C-194 și ale altor dispozitive de amortizare folosite în mod curent pentru eficientizarea raportului preț-performanță în amortizarea unei clădiri.

5.3 Contribuții privind modelarea matematică a structurilor echipate antiseismic

Structurile construcțiilor echipate antiseismic în fundație sau la suprastructură pot fi reprezentate printr-un sistem oscilant unidimensional cu n grade de libertate dinamică care reprezintă deplasările pe orizontală ale fiecărui planșeu.

5.3.1. Stabilirea ecuațiilor de mișcare pentru sisteme cu n grade de libertate dinamică la acțiuni seismice

În fig. 5.37 este reprezentat un sistem cu n grade de libertate dinamică echipat antiseismic în care: n - numărul de niveluri ale structurii; $k_i, i = 1, n$ - rigiditățile relative de nivel; $m_i, i = 1, n$ - masele concentrate corespunzătoare fiecărui nivel; u - deplasarea terenului; $c_i, i = 1, n$ - caracteristicile de amortizare aferente fiecărui nivel; $F_i, i = 1, n$ - suma proiecțiilor pe orizontală a forțelor axiale din dispozitivele de disipare a energiei seismice montate pe nivelul respectiv (z_{Ai}); $x_i, i = 1, n$ - deplasările relative ale maselor pe direcția gradelor de libertate.

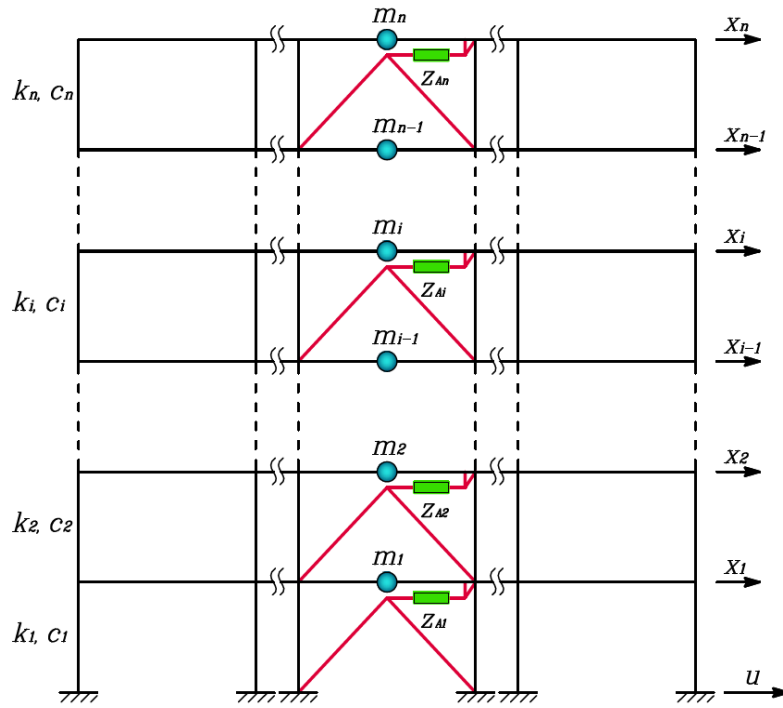


Fig. 5.37 Sistem cu n grade de libertate dinamică echipat antiseismic

Acestui sistem i se poate asocia modelul mecanic din fig. 5.38.

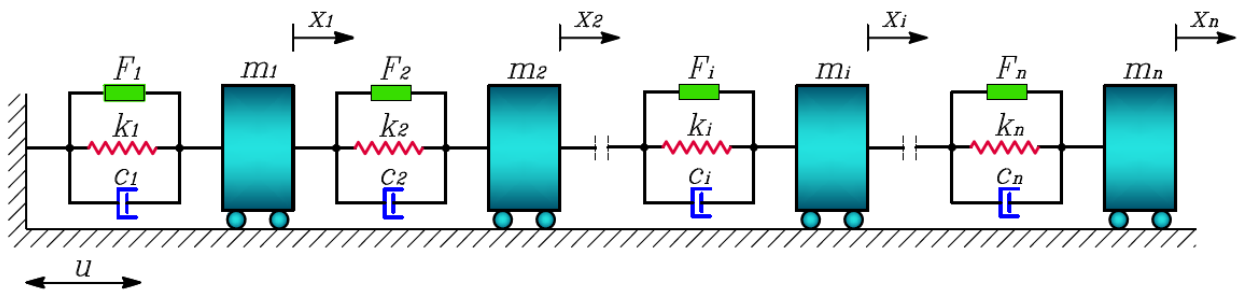


Fig. 5.38 Modelul mecanic asociat sistemului oscilant cu n grade de libertate dinamică echipat antiseismic

Acest sistem simplu și eficient de reprezentare a structurii unei clădiri echipate antiseismic are avantajul că poate modela atât izolarea antiseismică în bază a clădirii, cât și elasticitatea solului (interacțiunea sol-fundație), folosind pentru aceasta primele două niveluri ale sistemului: nivelul I pentru modelarea comportamentului solului și nivelul II pentru modelarea sistemului de izolare antiseismică în fundația clădirii.

Pentru acest sistem ecuația de mișcare, sub formă matriceală, este cunoscută în literatura de specialitate și are forma [100]:

$$[M] \cdot \{\ddot{X}\} + [C] \cdot \{\dot{X}\} + [K] \cdot \{X\} + \{F_H\} = -[M] \cdot \{1\} \cdot \ddot{u} \quad (5.35)$$

- unde: - \ddot{u} - accelerația terenului;
 - $\{1\}$ - vectorul unitate;
 - $[M]$ - matricea maselor:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix}; \quad (5.36)$$

-[K] – matricea de rigiditate:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & k_3 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -k_i & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix}; \quad (5.37)$$

-[C] – matricea de amortizare:

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -c_i & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -c_n & c_n \end{bmatrix}; \quad (5.38)$$

-{F_H} - vectorul forțelor hysteretice:

$$\{F_H\} = \begin{Bmatrix} F_1 - F_2 \\ F_2 - F_3 \\ \dots \\ F_{n-1} - F_n \\ F_n \end{Bmatrix}; \quad (5.39)$$

-{X} – vectorul deplasări relative x_i ;

-{\dot{X}} - vectorul vitezelor relative \dot{x}_i ;

-{\ddot{X}} - vectorul accelerațiilor relative \ddot{x}_i :

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix}, \quad \{\dot{X}\} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix}, \quad \{\ddot{X}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix} \quad (5.40)$$

Ecuția diferențială de mișcare pentru nivelul i este [100]:

$$m_i \ddot{x}_i - c_i \dot{x}_{i-1} + (c_{i+1} + c_i) \dot{x}_i - c_{i+1} \dot{x}_{i+1} - k_i x_{i-1} + (k_{i+1} + k_i) x_i - k_{i+1} x_{i+1} + F_i - F_{i+1} = -m_i \ddot{u} \quad (5.41)$$

Pentru a pregăti ecuațiile diferențiale de ordinul II ale acestui sistem într-o formă necesară rezolvării computaționale cu ajutorul programului *Matlab / Simulink*, este necesară exprimarea acestora sub forma unui sistem de ecuații diferențiale de ordinul I. În acest sens, am împărțit ecuațiile sistemului la m_i și grupând corespunzător termenii, relația (5.41) devine:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i - \frac{c_{i+1}}{m_{i+1}} \cdot \frac{m_{i+1}}{m_i} \cdot \dot{x}_{i+1} + \left(\frac{c_{i+1}}{m_{i+1}} \cdot \frac{m_{i+1}}{m_i} + \frac{c_i}{m_i} \right) \cdot \dot{x}_i - \frac{c_i}{m_i} \cdot \dot{x}_{i-1} - \\ - \frac{k_{i+1}}{m_{i+1}} \cdot \frac{m_{i+1}}{m_i} \cdot x_{i+1} + \left(\frac{k_{i+1}}{m_{i+1}} \cdot \frac{m_{i+1}}{m_i} + \frac{k_i}{m_i} \right) \cdot x_i - \frac{k_i}{m_i} \cdot x_{i-1} + \frac{F_i}{m_i} - \frac{F_{i+1}}{m_i} = -\ddot{u} \end{aligned} \quad (5.42)$$

Notând: $\frac{m_{i+1}}{m_i} = \mu_{i+1,i}$ și știind că $\frac{k_i}{m_i} = \omega_i^2$ și $c_i = 2\beta_i \cdot \omega_i \cdot m_i \neq 0$,

unde: ω_i – pulsația locală a nivelului i ;

β_i - fracțiunea amortizării critice,

rezultă:

$$\frac{c_i}{m_i} = 2\beta_i \cdot \omega_i ; \quad \frac{c_{i+1}}{m_i} = \frac{c_{i+1}}{m_{i+1}} \cdot \frac{m_{i+1}}{m_i} = \mu_{i+1,i} \cdot 2\beta_{i+1} \cdot \omega_{i+1} \quad (5.43)$$

Înlocuind aceste expresii în relația (5.42), ecuația corespunzătoare nivelului i se scrie:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i = \mu_{i+1,i} \cdot 2\beta_{i+1} \cdot \omega_{i+1} \cdot \dot{x}_{i+1} - (\mu_{i+1,i} \cdot 2\beta_{i+1} \cdot \omega_{i+1} + 2\beta_i \cdot \omega_i) \cdot \dot{x}_i + 2\beta_i \cdot \omega_i \cdot \dot{x}_{i-1} + \\ + \mu_{i+1,i} \cdot \omega_{i+1}^2 \cdot x_{i+1} - (\mu_{i+1,i} \cdot \omega_{i+1}^2 + \omega_i^2) \cdot x_i + \omega_i^2 \cdot x_{i-1} - \frac{F_i}{m_i} + \frac{F_{i+1}}{m_i} - \ddot{u} \end{aligned} \quad (5.44)$$

Notăm $\dot{\psi}_i = \dot{\psi}_{n+i}$ și $\dot{\psi}_{n+i} = \dot{x}_i$, pentru $i = 1, n$. Rezultă astfel, un sistem de $2n$ ecuații diferențiale de ordinul I, ale căror necunoscute principale sunt deplasările relative x_i și vitezele relative \dot{x}_i :

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_i = \dot{\psi}_{n+i} ; \\ \dot{\psi}_{n+i} = \mu_{i+1,i} \cdot 2\beta_{i+1} \cdot \omega_{i+1} \cdot \dot{x}_{i+1} - (\mu_{i+1,i} \cdot 2\beta_{i+1} \cdot \omega_{i+1} + 2\beta_i \cdot \omega_i) \cdot \dot{x}_i + 2\beta_i \cdot \omega_i \cdot \dot{x}_{i-1} + \\ + \mu_{i+1,i} \cdot \omega_{i+1}^2 \cdot x_{i+1} - (\mu_{i+1,i} \cdot \omega_{i+1}^2 + \omega_i^2) \cdot x_i + \omega_i^2 \cdot x_{i-1} - \frac{F_i}{m_i} + \frac{F_{i+1}}{m_i} - \ddot{u} \end{aligned} \quad (5.45)$$

Termenii F_i din sistemul de ecuații (5.45) care alcătuiesc matricea forțelor hysteretice $\{F_H\}$ prezentată în relația (5.39) reprezintă suma proiecțiilor pe orizontală a tuturor forțelor de amortizare specifice dispozitivelor hysteretice de disipare a energiei montate la nivelul i . F_i depinde de tipul și numărul acestor dispozitive de pe nivelul i precum și de configurația de amplasare a acestora.

Din considerente de mărire a posibilităților de modelare a buclelor de histerezis specifice diferitelor tipuri de amortizori am ales ca variantă de exprimare a forței z_A din aceste dispozitive hysteretice, următoarea formă propusă de Charalampakis [16]:

$$z_A(\xi) = \alpha \cdot k_0 \cdot \xi + (1 - \alpha) \cdot z(\xi) \quad (5.46)$$

unde: α – coeficient de rigiditate post-fluaj;

k_0 – rigiditate elastică;

ξ – deplasarea axială din dispozitivul de disipare a energiei;

$z(\xi)$ - forța histeretică din amortizor definită printr-un model matematic de histerezis.

Se observă din relația (5.46) că expresia forței sub forma z_A este formată din doi termeni: primul fiind caracteristic unei componente elastice, iar al doilea fiind caracteristic componentei histeretice definite cu unul din modelele matematice de histerezis.

Adăugarea termenului specific componentei elastice are ca efect rotirea buclei de histerezis în funcție de valoarea coeficienților α și k_0 , mărindu-se astfel posibilitățile de modelare a buclelor de histerezis specifice dispozitivelor histeretice folosite.

În cazul în care modelul de histerezis folosit se exprimă printr-o formă algebrică a forței de amortizare $z(\xi)$, aceasta se introduce direct în sistemul de ecuații (5.45) în forma:

$$F_i(x_{ri}) = a_i \cdot \mu_{F_i} \cdot z_{Ai}(x_{ri} \cdot \mu_{x_i}) = a_i \cdot \mu_{F_i} \cdot [\alpha_i \cdot k_{0i} \cdot x_{ri} \cdot \mu_{x_i} + (1 - \alpha_i) \cdot z_i(x_{ri} \cdot \mu_{x_i})] \quad (5.47)$$

unde: x_{ri} – deplasarea relativă de nivel la nivelul i : $x_{ri} = x_i - x_{i-1}$, pentru $i = 1, n$.

a_i – numărul de amortizori montați pe nivelul i pe direcția acțiunii seismului;

μ_{F_i} - coeficient de multiplicare a forței de amortizare specifică configurației de amplasare a amortizorului;

μ_{x_i} - coeficient de multiplicare a cursei amortizorului specifică configurației de amplasare a amortizorului;

z_{Ai} – forța de amortizare specifică unui amortizor montat la nivelul i .

Acesta este cazul amortizării vâscoase sau al modelelor clasice de histerezis: Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener precum și al combinațiilor dintre acestea.

În cazul în care se alege pentru bucla de histerezis a amortizorilor folosiți un model matematic care implică o formă diferențială a expresiei forței din amortizor, cum este cazul modelului de histerezis Bouc-Wen definit de ecuația (5.9), expresiile z_i devin:

$$\dot{z}_i(x_{ri} \cdot \mu_{x_i}) = \left\{ A - |z_i(x_{ri} \cdot \mu_{x_i})|^N \cdot \left[\beta + \gamma \cdot \operatorname{sgn} \left(z_i(x_{ri} \cdot \mu_{x_i}) \cdot \dot{x}_{ri} \cdot \frac{\mu_{x_i}}{x_m} \right) \right] \right\} \cdot \dot{x}_{ri} \cdot \frac{\mu_{x_i}}{x_m}. \quad (5.48)$$

Deoarece pentru modelul Bouc-Wen am ales exprimarea adimensională din ecuația (5.9), pentru reprezentarea corectă a buclei histeretice reale este necesară scalarea forței și cursei amortizorului cu factorii de scalare F_m și x_m , în acest caz suma proiecțiilor pe orizontală a forțelor din dispozitivele histeretice montate la nivelul i , devenind:

$$F_i(x_{ri}) = a_i \cdot \mu_{F_i} \cdot \frac{F_m}{x_m} \cdot [\alpha_i \cdot k_{0i} \cdot x_{ri} \cdot \mu_{x_i} + (1 - \alpha_i) \cdot z_i(x_{ri} \cdot \mu_{x_i})], \text{ pentru } i=1, n; \quad (5.49)$$

unde: F_m – factor de scalare a forței de amortizare în cazul buclelor de histerezis definite adimensional (modelul Bouc-Wen);

x_m – factor de scalare a cursei amortizorului în cazul buclelor de histerezis definite adimensional (modelul Bouc-Wen).

În cazul folosirii modelului Bouc-Wen, sistemul de ecuații (5.45) în care se înlocuiesc relațiile (5.49), se completează cu un nou set de ecuații diferențiale definit prin relația (5.48). Noul sistem are $3n$ ecuații diferențiale de ordinul I, iar necunoscutele sunt deplasările relative x_i , vitezele relative \dot{x}_i și forțele din dispozitivele histeretice z_i , pentru fiecare nivel i :

$$\left\{ \begin{array}{l}
\dot{\psi}_i = \psi_{n+i}; \\
\dot{\psi}_{n+i} = \mu_{i+1,i} \cdot 2\beta_{i+1} \cdot \omega_{i+1} \cdot \dot{x}_{i+1} - (\mu_{i+1,i} \cdot 2\beta_{i+1} \cdot \omega_{i+1} + 2\beta_i \cdot \omega_i) \cdot \dot{x}_i + 2\beta_i \cdot \omega_i \cdot \dot{x}_{i-1} + \\
+ \mu_{i+1,i} \cdot \omega_{i+1}^2 \cdot x_{i+1} - (\mu_{i+1,i} \cdot \omega_{i+1}^2 + \omega_i^2) \cdot x_i + \omega_i^2 \cdot x_{i-1} - \\
- \frac{1}{m_i} \cdot a_i \cdot \mu_{F_i} \cdot \frac{F_m}{x_m} \cdot [\alpha_i \cdot k_{0i} \cdot x_{r_i} \cdot \mu_{x_i} + (1 - \alpha_i) \cdot z_i(x_{r_i} \cdot \mu_{x_i})] + \\
+ \frac{1}{m_i} \cdot a_{i+1} \cdot \mu_{F_{i+1}} \cdot \frac{F_m}{x_m} \cdot [\alpha_{i+1} \cdot k_{0i+1} \cdot x_{r_{i+1}} \cdot \mu_{x_{i+1}} + (1 - \alpha_{i+1}) \cdot z_{i+1}(x_{r_{i+1}} \cdot \mu_{x_{i+1}})] - \ddot{u}; \\
\dot{z}_i(x_{r_i} \cdot \mu_{x_i}) = \left\{ A - |z_i(x_{r_i} \cdot \mu_{x_i})|^N \cdot \left[\beta + \gamma \cdot \operatorname{sgn} \left(z_i(x_{r_i} \cdot \mu_{x_i}) \cdot \dot{x}_{r_i} \cdot \frac{\mu_{x_i}}{x_m} \right) \right] \right\} \cdot \dot{x}_{r_i} \cdot \frac{\mu_{x_i}}{x_m}
\end{array} \right. \quad i=1,n. \quad (5.50)$$

5.3.2 Elemente de calcul specifice configurațiilor de amplasare a amortizorilor la suprastructură

Amortizorii pot fi montați la suprastructură în diferite configurații de amplasare. Aceste configurații, prin sistemul de pârghii aferent, pot modifica raportul dintre deplasarea relativă de nivel și cursa amortizorului precum și valoarea proiecției pe orizontală a forței din amortizor, în timpul deformării structurii sub acțiunea seismică. Am modelat aceste modificări ale cursei și ale proiecției pe orizontală a forței cu ajutorul coeficienților: μ_{x_i} și μ_{F_i} .

Configurațiile pe care le-am studiat în cadrul acestui model matematic sunt: configurația tip chevron (fig. 5.39 a), configurația tip contravântuire (fig. 5.39 b) și două noi configurații cu pârghii propuse de Mociran, H. în teza de doctorat [100], prezentate în fig. 5.39 c și d și denumite în continuare: configurația cu pârghii 1 și configurația cu pârghii 2.

În acest subcapitol sunt prezentate pentru cele două noi configurații, elementele de calcul pe care le-am determinat în alte ipoteze decât cele realizate de Mociran [100], luând în considerare și deformația cadrului, în vederea îmbunătățirii preciziei de calcul.

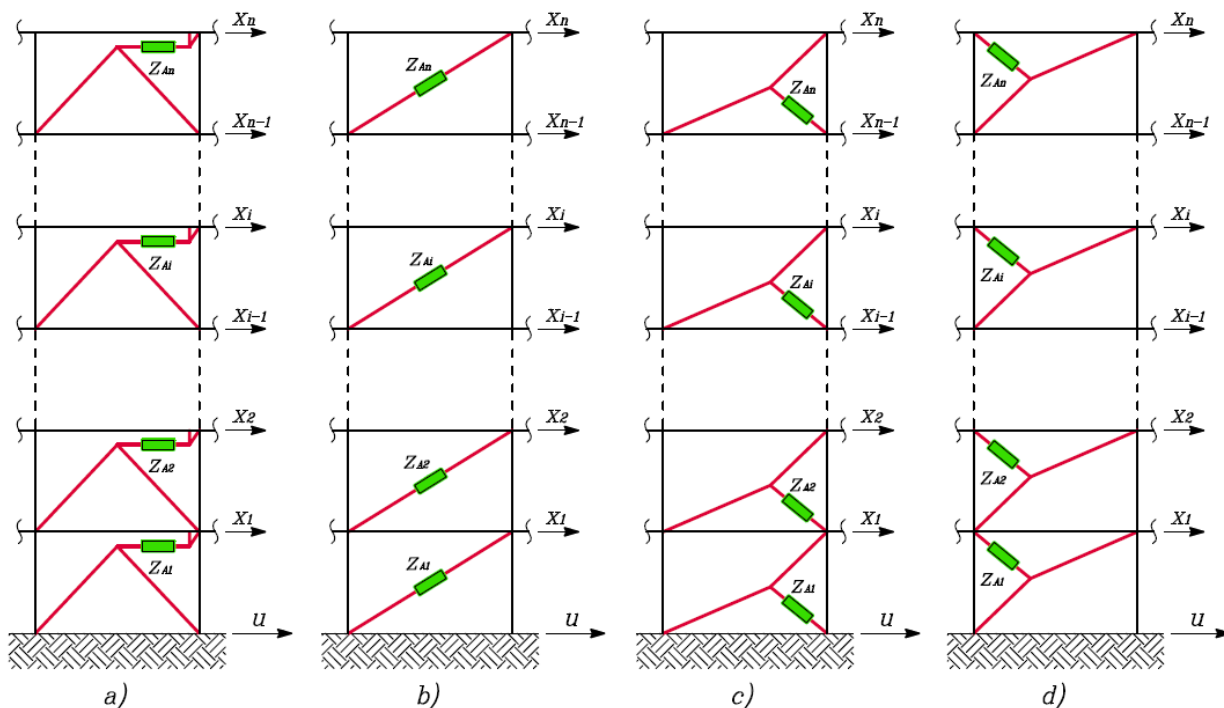


Fig. 5.39 Configurații de amplasare a amortizorilor; a-configurația tip chevron; b-configurația tip contravântuire; c - configurația cu pârghii nr.1 ; d - configurația cu pârghii nr. 2

Configurația cu pârghii nr. 1 (fig. 5.40) constă dintr-un sistem de pârghii care prin unghiurile lor de înclinare determină coeficienții de modificare a valorii proiecției pe orizontală a forței de amortizare (F_i), care intră în sistemul de ecuații diferențiale al structurii supuse acțiunii seismice date de ecuația (5.50).

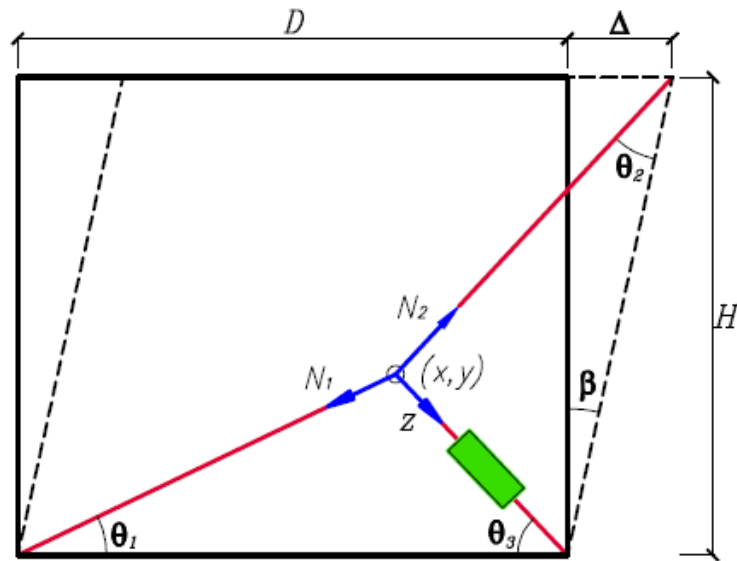


Fig. 5.40 Configurația cu pârghii nr. 1 [100]

Unghiul făcut de cadrul deformat cu verticala este β :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta}{H} \quad (5.51)$$

unde: Δ - este deplasarea relativă de nivel;

H - înălțimea nivelului.

Ecuațiile de echilibru pe cele două direcții ortogonale sunt:

$$\sum X = 0; \quad \sum Y = 0 \quad (5.52)$$

$$\begin{cases} N_1 \cdot \cos \theta_1 - N_2 \cdot \sin(\theta_2 + \beta) = z \cdot \cos \theta_3 \\ N_1 \cdot \sin \theta_1 - N_2 \cdot \cos(\theta_2 + \beta) = -z \cdot \sin \theta_3 \end{cases} \quad (5.53)$$

unde: N_1 - forța axială în pârghia 1;

N_2 - forța axială în pârghia 2;

z - forța axială din amortizor;

θ_1 - unghiul pe care îl face pârghia 1 cu orizontala;

θ_2 - unghiul pe care îl face pârghia 2 cu orizontala;

θ_3 - unghiul pe care îl face axa amortizorului cu orizontala.

Pentru determinarea forței axiale N_2 , se înmulțește prima ecuație din relația (5.53) cu $\sin \theta_1$ și a doua ecuație din aceeași relație cu $\cos \theta_1$ și se scad:

$$N_2 [\cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_2 + \beta) - \sin \theta_1 \cdot \sin(\theta_2 + \beta)] = z (\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_3 + \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_3) \quad (5.54)$$

$$N_2 = \frac{\sin(\theta_1 + \theta_3)}{\cos(\theta_1 + \theta_2 + \beta)} \cdot z \quad (5.55)$$

Pentru a determina expresia forței axiale N_2 , am înmulțit prima ecuație din sistemul (5.61) cu $\sin \theta_1$ și a doua ecuație cu $\cos \theta_1$, după care le-am scăzut, rezultând:

$$N_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \beta) = z \cdot \sin(\theta_1 + \theta_3) \quad (5.62)$$

$$N_2 = \frac{\sin(\theta_1 + \theta_3)}{\cos(\theta_1 + \theta_2 + \beta)} \cdot z \quad (5.63)$$

Similar, pentru calcul lui N_1 , se înmulțește prima ecuație din sistemul (5.61) cu $\cos(\theta_2 + \beta)$ și a doua ecuație cu $\sin(\theta_2 + \beta)$ și apoi se scad, obținând:

$$N_1 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2 + \beta) = -z \cdot \cos(\theta_3 - \theta_2 - \beta) \quad (5.64)$$

$$N_1 = -\frac{\cos(\theta_3 - \theta_2 - \beta)}{\cos(\theta_1 + \theta_2 + \beta)} \cdot z \quad (5.65)$$

În mod analog, forța axială din amortizor proiectată pe orizontală, la partea superioară (z_A^S) și la partea inferioară (z_A^J) a cadrului analizat, rezultă:

$$z_A^J = N_1 \cdot \cos \theta_1 \quad ; \quad z_A^J = -\frac{\cos \theta_1 \cdot \cos(\theta_3 - \theta_2 - \beta)}{\cos(\theta_1 + \theta_2 + \beta)} \cdot z \quad (5.66)$$

$$z_A^S = N_2 \cdot \sin(\theta_2 + \beta) - z \cdot \cos \theta_3 = -z_A^J \quad (5.67)$$

Pentru determinarea expresiilor matematice ale coeficientului de multiplicare a cursei amortizorilor μ_{x_i} corespunzătoare celor două configurații noi, am considerat cunoscute unghiurile pe care le fac cele două pârghii cu elementele cadrului nedeformat (fig. 5.41), θ_1^0 și θ_2^0 . Lungimile celor două pârghii, în acest caz se pot determina cu relațiile:

$$\begin{cases} l_1 \cdot \cos \theta_1^0 + l_2 \cdot \sin \theta_2^0 = D \\ l_1 \cdot \sin \theta_1^0 + l_2 \cdot \cos \theta_2^0 = H \end{cases} \quad (5.68)$$

unde: l_1 și l_2 - lungimile celor două pârghii;

D - distanța între stâlpi;

θ_1^0 - unghiul pe care îl face pârghia 1 cu orizontala înainte de deformarea cadrului;

θ_2^0 - unghiul pe care îl face pârghia 2 cu verticala înainte de deformarea cadrului.

Pentru determinarea lungimii pârghiei l_2 , se înmulțește prima ecuație din relația (5.68) cu $\sin \theta_1^0$ și a doua ecuație din aceeași relație cu $\cos \theta_1^0$ și se scad, rezultând:

$$l_2 \cdot \cos(\theta_1^0 + \theta_2^0) = H \cdot \cos \theta_1^0 - D \cdot \sin \theta_1^0 \quad (5.69)$$

$$l_2 = \frac{H \cdot \cos \theta_1^0 - D \cdot \sin \theta_1^0}{\cos(\theta_1^0 + \theta_2^0)} \quad (5.70)$$

Similar, pentru calcul lui l_1 , se înmulțește prima ecuație din relația (5.68) cu $\cos \theta_2^0$ și a doua ecuație din aceeași relație cu $\sin \theta_2^0$ și apoi se scad, rezultând:

$$l_1 \cdot \cos(\theta_1^0 + \theta_2^0) = D \cdot \cos \theta_2^0 - H \cdot \sin \theta_2^0 \quad (5.71)$$

$$l_1 = \frac{D \cdot \cos \theta_2^0 - H \cdot \sin \theta_2^0}{\cos(\theta_1^0 + \theta_2^0)} \quad (5.72)$$

În starea nedeformată a cadrului considerat, punctul de intersecție al pârghiilor (x_0, y_0) și unghiul pe care îl face axa amortizorului cu orizontala, θ_3^0 , sunt:

$$\begin{cases} x_0 = l_1 \cdot \cos \theta_1^0 \\ y_0 = l_1 \cdot \sin \theta_1^0 \end{cases} ; \quad \operatorname{tg} \theta_3^0 = \frac{H - y_0}{x_0} \Rightarrow \theta_3^0 = \operatorname{arctg} \frac{H - y_0}{x_0} \quad (5.73)$$

Presupunând că deformarea cadrului se realizează cu valoarea Δ pe orizontală, lungimea pârghiilor rămâne constantă, iar amortizorul se deformează de-a lungul axei sale cu valoarea δ . După deformare punctul de intersecție al pârghiilor se deplasează în punctul de coordonate (x, y), iar lungimea axei pe care este montat amortizorul (l_3) se modifică, fiind diferită de valoarea avută înainte de deformarea cadrului (l_3^0). Coordonatele noului punct de intersecție se pot determina din sistemul format din cele două ecuații ale cercului de rază l_1^0 și l_2^0 :

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = l_1^{0^2} \\ (x - D - \Delta)^2 + (y - H)^2 = l_2^{0^2} \end{cases} \Rightarrow x, y \quad (5.74)$$

Pentru determinarea cursei amortizorului corespunzătoare stării deformate a cadrului se determină valorile l_3^0 și l_3 :

$$\begin{cases} l_3^{0^2} = x_0^2 + (y_0 - H)^2 \\ l_3^2 = (x - \Delta)^2 + (y - H)^2 \end{cases} \Rightarrow l_3, l_3^0 \quad (5.75)$$

$$\delta = l_3 - l_3^0 \quad (5.76)$$

unde: x, y – coordonatele punctului de intersecție a pârghiilor în starea deformată a cadrului;

l_3^0 și l_3 – lungimea pârghieii cu amortizor înainte și după deformarea cadrului;

δ - cursa amortizorului după deformare.

Cei doi coeficienți de multiplicare, μ_{F_i} și μ_{x_i} , care intră în calculul proiecției pe orizontală a forței de amortizare din amortizor (F_i) definită în relațiile (5.47), (5.48), (5.49) și (5.51), se calculează astfel:

$$\mu_{x_i} = \frac{\delta}{\Delta} ; \quad \mu_{F_i} = \frac{z}{z_A} \quad (5.77)$$

Am implementat ecuațiile de mai sus în aplicația *GenEcAm* (detaliată în subcapitolul 5.4.4) care, pentru a găsi cele două unghiuri ale pârghiilor configurației de amplasare a amortizorilor, creează o bază de date cu toate combinațiile posibile ale valorilor celor două unghiuri precum și cu valorile celor doi coeficienți μ_{F_i} și μ_{x_i} asociate.

Aceste elemente de calcul sunt utile pentru:

- determinarea celor doi coeficienți μ_{F_i} și μ_{x_i} pentru cazul când se știu unghiurile de înclinare ale pârghiilor;
- determinarea unghiurilor de înclinare ale pârghiilor când se știe μ_{F_i} - coeficientul de amplificare a proiecției pe orizontală a forței axiale din amortizor.

În acest ultim caz, Programul *GenEcAm* afișează pozițiile punctelor de intersecție (x_0, y_0) pentru care coeficientul μ_{F_i} are valoarea căutată. Din această listă de combinații (θ_1, θ_2) se alege varianta dorită de proiectant.

5.3.3 Bilanțul energetic

Pentru o implementare facilă a ecuațiilor componentelor bilanțului energetic în modelul matematic asociat sistemului cu n grade de libertate dinamică, am ales exprimarea acestora în formă diferențială în variabila relativă x_i , ca variație în unitatea de timp a energiilor corespunzătoare. Astfel, aceste ecuații diferențiale completează ecuațiile diferențiale de mișcare ale structurii echipate antiseismic (5.51), rezultând în final un sistem ale cărui necunoscute includ și energiile totale și de nivel asociate bilanțului energetic.

În mod analog cu modelul matematic prezentat de Mociran H. în teza de doctorat [100], pentru obținerea ecuației de bilanț energetic pentru sistemul nostru echipat antiseismic, termenii ecuației matriceale de mișcare (5.50) se înmulțesc la stânga cu $\{\dot{X}_a\}^T$ - transpusa vectorului viteză absolută, rezultând:

$$\{\dot{X}_a\}^T [M] \{\ddot{X}_a\} + \{\dot{X}_a\}^T [C] \{\dot{X}\} + \{\dot{X}_a\}^T [K] \{X\} + \{\dot{X}_a\}^T \{F_H\} = \{0\} \quad (5.78)$$

unde: $\{X_a\}$ - vectorul deplasărilor absolute x_{ai} ;

$\{\dot{X}_a\}$ - vectorul vitezelor absolute \dot{x}_{ai} ;

$\{\ddot{X}_a\}$ - vectorul accelerațiilor absolute \ddot{x}_{ai} .

Matriceal, relația dintre viteza absolută, viteza relativă și viteza terenului este:

$$\{\dot{X}_a\} = \{\dot{X}\} + \{1\} \cdot \dot{u} \quad (5.79)$$

în care $\{1\}$ - vectorul unitate.

Deoarece matricile $[M]$ și $[K]$ sunt simetrice, primii doi termeni din ecuația (5.78) se pot scrie:

$$\{\dot{X}_a\}^T \cdot [M] \cdot \{\ddot{X}_a\} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} (\{\dot{X}_a\}^T \cdot [M] \cdot \{\dot{X}_a\}); \quad \{\dot{X}\}^T \cdot [K] \cdot \{X\} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} (\{X\}^T \cdot [K] \cdot \{X\}) \quad (5.80)$$

Înlocuind (5.79) și (5.80) în ecuația (5.78) și regrupând termenii, rezultă:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\{\dot{X}_a\}^T [M] \{\dot{X}_a\}) + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\{X\}^T [K] \{X\}) + \{\dot{X}\}^T [C] \{\dot{X}\} + \{\dot{X}\}^T \{F_H\} = \\ & = -\{1\}^T \dot{u} \cdot (\{C\} \{\dot{X}\} + [K] \{X\} + \{F_H\}) = -\{1\}^T \dot{u} \cdot [M] \{\ddot{X}_a\} \end{aligned} \quad (5.81)$$

Primul termen din membrul stâng al ecuației (5.81) reprezintă variația în unitatea de timp a energiei cinetice E_c [100]:

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} (\{\dot{X}_a\}^T [M] \{\dot{X}_a\}) = \frac{1}{2} \sum_i m_i \dot{x}_{ai}^2 = \frac{1}{2} \sum_i m_i (\dot{x}_i + \dot{u})^2 \quad (5.82)$$

Al doilea termen din membrul stâng al ecuației (5.81) reprezintă variația în unitatea de timp a energiei potențiale de deformație elastică E_p [100]:

$$\frac{dE_p}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{dt} (\{X\}^T [K] \{X\}) = \frac{1}{2} \sum_i k_i (x_i - x_{i-1})^2 \quad (5.83)$$

Suma primilor doi termeni din ecuația (5.81) formează puterea mecanică totală transmisă întregii structuri:

$$P_T = \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} \quad (5.84)$$

Al treilea termen din membrul stâng al ecuației (5.81) reprezintă puterea disipată prin amortizare structurală P_A (variația în unitatea de timp a energiei disipate prin amortizare structurală E_A [100]):

$$P_A = \frac{dE_A}{dt} = \{\dot{X}\}^T [C] \{\dot{X}\} = \sum_i c_i \dot{x}_i^2 \quad (5.85)$$

Al patrulea termen din membrul stâng al relației (5.81) reprezintă puterea histeretică disipată prin sistemul de echipare antiseismică a clădirii P_H (variația în unitatea de timp a energiei disipate prin dispozitivele histeretice E_H [100]):

$$P_H = \frac{dE_H}{dt} = \{\dot{X}\}^T \cdot \{F_H\} = \sum_i F_i (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) \quad (5.86)$$

Membrul drept al relației (5.81) reprezintă puterea seismică totală transmisă structurii P_{ST} (variația în unitatea de timp a energiei seismice transmise structurii E_S [100]):

$$P_{ST} = \frac{dE_{ST}}{dt} = \{1\}^T \dot{u} \cdot [M] \{\ddot{X}_a\} = \dot{u} \sum_i m_i \cdot \ddot{x}_a = \dot{u} \cdot \sum_i m_i (\ddot{u} + \ddot{x}_i) \quad (5.87)$$

Modelul matematic final pentru sistemul nostru echipat antiseismic este format din ecuațiile diferențiale (5.51) la care se adaugă ecuațiile diferențiale de ordinul I ale energiilor bilanțului energetic din relațiile (5.82)-(5.87). Necunoscutele acestui sistem final sunt: deplasările relative x_i , vitezele relative \dot{x}_i , forțele din dispozitivele histeretice z_i și energiile totale și de nivel corespunzătoare bilanțului energetic: E_c, E_p, E_A, E_H, E_S .

5.3.4 Concluzii

Modelul matematic al sistemului cu n grade de libertate dinamică prezentat în acest subcapitol a fost elaborat pentru modelarea clădirilor echipate cu sisteme de amortizare antiseismică la suprastructură sau în fundație prin adăugarea forțelor de amortizare dezvoltate de amortizori în fiecare ecuație diferențială de mișcare a sistemului. În funcție de modelul de histerezis folosit pentru amortizorii clădirii, forța de amortizare poate fi exprimată în formă algebrică sau sub formă diferențială (cazul Bouc-Wen).

În cazul amortizorilor românești ȘERB, dar și a altor amortizori pentru care caracteristica de histerezis poate fi modelată cu modelul Bouc-Wen clasic sau adaptat, forțele de amortizare definite cu expresia matematică dată de modelul Bouc-Wen, având o formă diferențială, se adaugă la sistemul de ecuații de mișcare a structurii, fiind alcătuit astfel un sistem de ecuații care are ca necunoscute, pe lângă deplasările relative ale maselor pe direcția gradelor de libertate, și componenta orizontală a forțelor de amortizare din amortizori. Astfel, se obține un sistem de ecuații complex, care descrie comportarea dinamică liniară a structurii clădirii echipate cu amortizori.

În cazul în care se dorește modelarea unei clădiri izolate în fundație, se introduce pentru nivelul 1 expresia forței de amortizare specifică izolatorilor folosiți, iar dacă se folosește un sistem de amortizare în fundație în paralel cu sistemul de izolare, se introduc suplimentar expresiile forțelor din amortizori.

Principalul avantaj al acestui model matematic este că permite folosirea oricărui tip de amortizor în structura clădirii, deoarece se permite definirea forței de amortizare la fiecare nivel al clădirii, atât sub formă algebrică cât și sub formă diferențială.

Modelul matematic prezentat înglobează coeficienți care țin seama de configurația în care sunt poziționați amortizorii, precum și de numărul acestora. În acest sens am realizat un model matematic pentru cele două configurații speciale cu pârgii [100], model creat în scopul determinării unghiurilor de înclinare a pârgiilor componente corespunzătoare unei valori date a coeficienților de multiplicare μ_{F_i} a forței de amortizare din amortizori. Astfel, acest coeficient μ_{F_i} reprezintă un factor de reglare și control al eficienței antiseismice a sistemului de amortizare folosit.

Modelul matematic al bilanțului energetic a fost deasemenea implementat în programul GenEcAm pentru a se determina energia seismică absorbită de amortizori și energia seismică transmisă structurii, pentru diferite variante de echipare antiseismică a structurii analizate.

Modelul matematic prezentat permite deci compararea facilă a performanțelor antiseismice ale diferitelor tipuri de amortizori precum și a influenței diferitelor tipuri de configurații de poziționare, în vederea alegerii și proiectării cât mai raționale a unui sistem de protecție antiseismică eficient pentru clădirea analizată.

5.4 Contribuții privind implementarea software a modelului matematic pentru structuri echipate cu dispozitive histeretice

5.4.1 Introducere

La ora actuală există programe software de analiză cu metoda elementului finit care permit analiza comportamentului la seism a structurilor clădirilor civile echipate cu sisteme de izolare sau amortizare seismică, și anume: *ETABS*, *SAP2000*, *ROBOT*, *SCIA Engineer*, *GRAYTEC* etc.

Majoritatea acestor programe comerciale pun la dispoziția proiectantului, librării de elemente finite destinate modelării buclelor de histerezis ale amortizorilor și izolatorilor care echipează structura clădirii.

Deși aceste facilități ale programelor permit modelarea de multiple variante ale formei buclei de histerezis, ele nu pot acoperi întreaga gamă de forme și dimensiuni a acestor bucle.

Amortizorii românești ȘERB 194-C și amortizorii ȘERB telescopici TEL-150 sunt caracterizați de curbe de histerezis cu forme speciale având o caracteristică neliniară progresivă mai puțin întâlnită în rândul amortizorilor seismici. Programele comerciale actuale nu permit modelarea corespunzătoare a acestor curbe de histerezis, fiind necesară realizarea unor programe software care să includă ca modele teoretice de histerezis și alte modele matematice mai puțin uzuale, unul dintre acestea fiind și modelul matematic Bouc-Wen.

Pentru evaluarea cât mai precisă a performanțelor amortizorilor românești ȘERB, este necesară modelarea curbei de histerezis asociate, cât mai aproape de realitate cu putință.

În acest subcapitol este prezentată implementarea software a modelelor matematice prezentate în subcapitolele precedente 5.2 și 5.3, pe care am realizat-o prin crearea un set de patru programe software destinat analizei la seism a structurilor echipate cu amortizori sau izolatori, a căror curbă de histerezis poate fi modelată cu mai multe modele matematice. Am realizat cele patru programe software în mediul de programare *Embarcadero Delphi XE3* și ele sunt:

- programul **HistPlot** care permite alegerea unui model matematic pentru bucla de histerezis a amortizorilor folosiți la echiparea antiseismică, precum și stabilirea parametrilor acestui model care modifică corespunzător forma și dimensiunile acestei bucle;
- programul **ProConfig** care permite alegerea unei configurații de amplasare a amortizorilor dintr-o listă de șase configurații diferite, precum și alegerea parametrilor acestor configurații în funcție de factorul de scalare al forței de amortizare;
- programul **GenEcAm** care permite asamblarea sistemului de ecuații diferențiale de ordinul I ale clădirii echipate antiseismic, a cărui soluționare se realizează prin intermediul unei aplicații pe care am realizat-o în *Matlab/Simulink*;
- programul **ProAnim** care permite vizualizarea grafică și animată a deplasărilor, a forțelor din amortizori precum și a energiei seismice disipate de aceștia, obținute în urma soluționării sistemului de ecuații diferențiale pentru o accelerogramă de proiectare dată și un sistem de amortizare ales. Se pot vizualiza simultan trei seturi de rezultate pentru a se evidenția diferența între performanțele sistemelor de amortizare utilizate în cele trei situații.

Aceste patru programe software se folosesc împreună transferând rezultatele de la unul la altul, obținând astfel un sistem unitar care reprezintă un instrument foarte util în proiectarea sistemului de amortizare sau izolare seismică cu care este echipată clădirea analizată.

Avantajul acestui instrument computațional îl reprezintă utilizarea modelului matematic Bouc-Wen clasic dar și utilizarea a patru modele Bouc-Wen modificate, două dintre ele fiind prezentat, pentru prima dată, în această lucrare, știut fiind că modelul Bouc-Wen este un model matematic care permite modelarea unei game foarte largi de forme ale buclei de histerezis.

În continuare sunt prezentate facilitățile și modul de lucru pentru cele patru programe software pe care le-am realizat.

5.4.2 Programul *HistPlot*

Acest program este destinat modelării buclelor de histerezis specifice amortizorilor folosiți, prin modificarea parametrilor modelelor matematice de histerezis selectabile în program:

- modelul Maxwell;
- modelul Kelvin-Voigt;
- modelul Zener;
- modelul cu amortizare vâscoasă;
- modelul Bouc-Wen clasic;
- modelul Bouc-Wen Papion;
- modelul Bouc-Wen-UC;
- modelul Bouc-Wen-Strenght;
- modelul Bouc-Wen-Exp;
- modelul Ramberg-Osgood;
- modelul biliniar Coulomb.

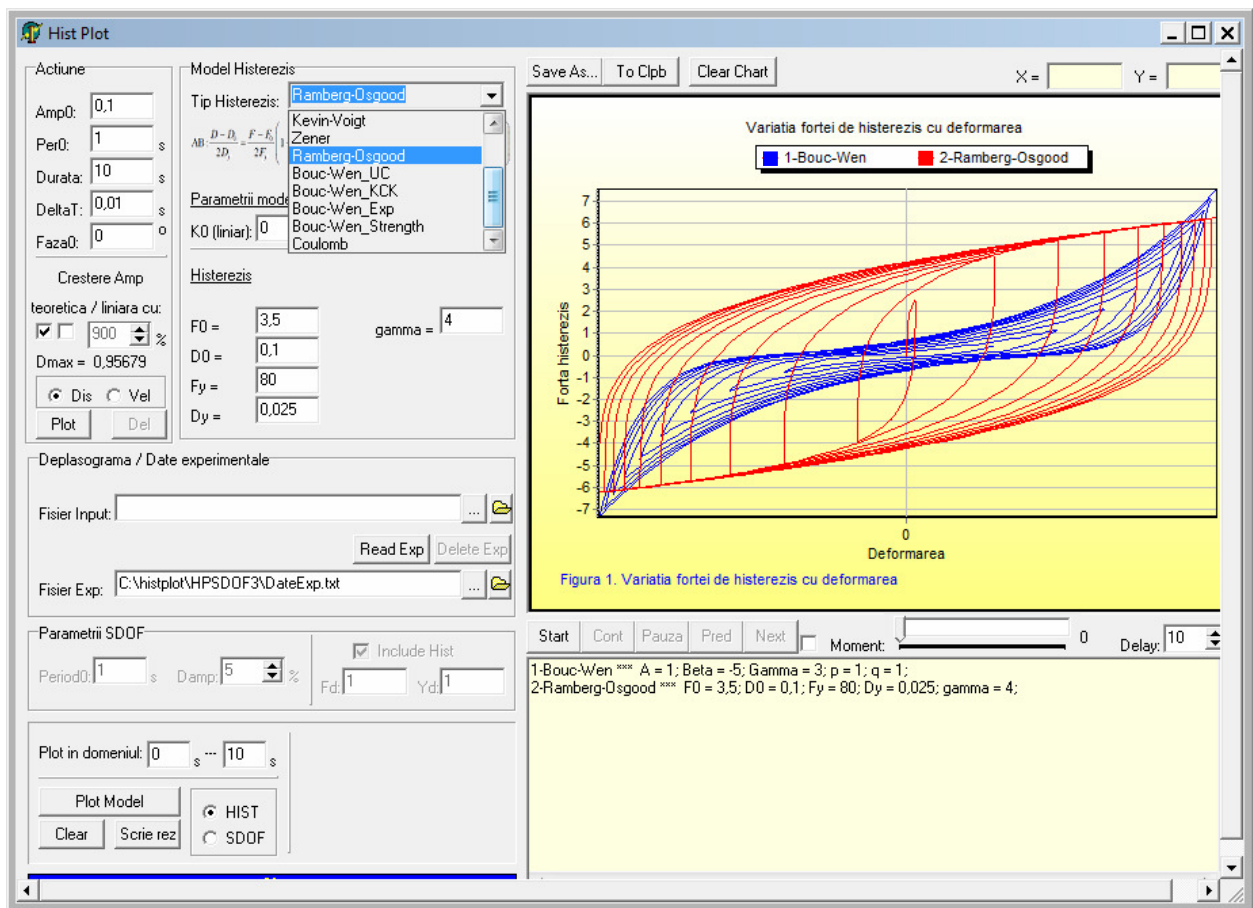


Fig. 5.42 Interfața grafică a programului *HistPlot*

În continuare sunt prezentate pe scurt opțiunile acestui program de determinare a parametrilor modelului matematic de histerezis ales de utilizatorul programului pentru modelarea buclei histeretice a amortizorului. Aceste opțiuni sunt vizibile în interfața *HistPlot* (fig. 5.42).

Opțiunea 1 - **Model Histerezis** - permite alegerea unuia din cele 11 modele teoretice de histerezis și afișează ecuația forței din amortizor corespunzătoare.

Opțiunea 2 – **Histerezis** – permite introducerea parametrilor modelului de histerezis ales.

Opțiunea 3 – **Actiune** – se referă la specificarea parametrilor privind forma ciclică de variație a deplasării amortizorului în timp. Parametrul *Crestere Amp* permite alegerea amplitudinii maxime, precum și a unuia din cele trei tipuri de variație a deplasării în timp (fig. 5.43):

- tipul 1 - funcție sinusoidală cu creștere liniară a amplitudinii;
- tipul 2 - funcție sinusoidală cu creștere exponențială a amplitudinii;
- tipul 3 - funcție sinusoidală cu creștere și apoi descreștere a amplitudinii (tip ovoid).

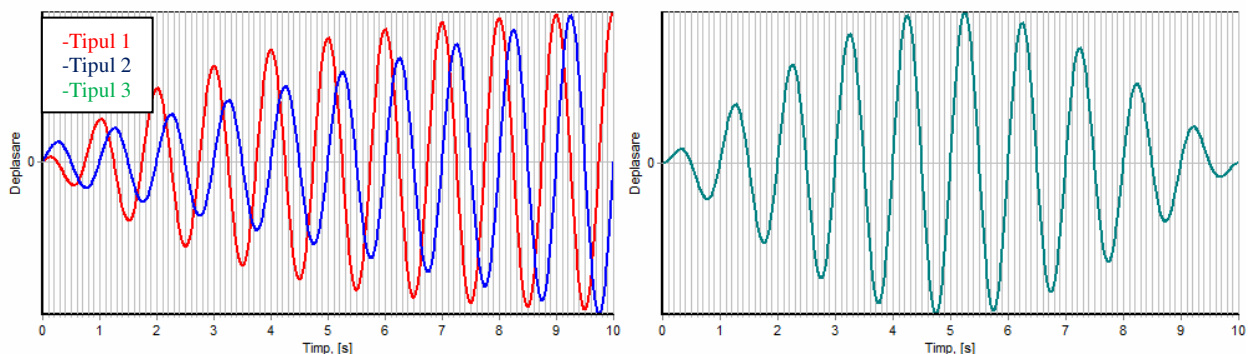


Fig. 5.43 Cele trei tipuri de variație a deplasării în timp pentru amortizor afișate cu opțiunea *Plot*

Aceste trei funcții, a caror grafic poate fi vizualizat cu opțiunea *Plot*, pot avea amplitudini și durate specificate de utilizatorul programului prin modificarea următorilor parametri:

- *Amp0* – reprezintă amplitudinea inițială în primul ciclu exprimată în [mm];
- *Per0* – perioada funcției sinusoidale, exprimată în [s];
- *Durata* – reprezintă perioada de timp a deplasării, exprimată în [s];
- *DeltaT* – reprezintă incrementul de timp pentru care este generat un punct al funcției sinusoidale, exprimat în [s];
- *Faza0* – reprezintă faza funcției sinusoidale exprimată în [rad];

Opțiunea 4 – ***Deplasograma / Date Experimentale*** – permite alegerea:

- unui fișier care conține variația deplasării în timp pentru amortizor. Se folosește în cazul în care se dorește introducerea unei funcții diferite de funcțiile sinusoidale tipul 1, 2 și 3.

- unui fișier care conține date experimentale măsurate pe amortizorul real pentru a le afișa în zona de grafic a programului în vederea suprapunerii lor cu curbele teoretice generate de program (fig. 5.44), dând astfel posibilitatea modificării parametrilor modelului teoretic până se ajunge la precizia de aproximare dorită.

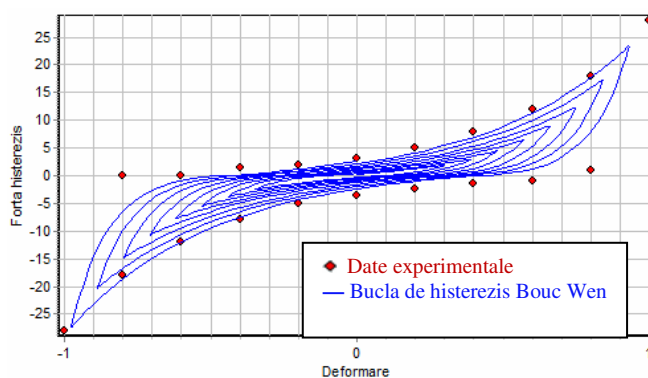


Fig. 5.44 Suprapunere date experimentale cu buclă de histerezis teoretică Bouc-Wen în *HistPlot*

Opțiunea 5 – ***Plot în domeniul*** – permite specificarea timpului de început și de sfârșit pentru care se face generarea buclei de histerezis, exprimat în [s].

Opțiunea 6 – ***HIST / SDOF*** – permite alegerea modului în care lucrează programul:

- *HIST* – este opțiunea implicită care permite generarea de bucle de histerezis teoretice;
- *SDOF* – este opțiunea care permite modelarea unui sistem cu un singur grad de libertate dinamică amortizat folosind unul din modelele teoretice de histerezis ale programului.

În cazul selectării opțiunii *SDOF* se specifică suplimentar încă doi parametri:

- *Period0* – care reprezintă perioada fundamentală a sistemului cu un G.L.D. în [s];
- *Damp* – care reprezintă amortizarea structurală exprimată în procente [%].

Opțiunea *SDOF* a fost creată în scopul comparării performanțelor amortizorilor cu bucle de histerezis diferite pe o structură cu un singur grad de libertate dinamică.

Opțiunea 7 – ***To Clpb*** – permite salvarea graficului buclei de histerezis în Clipboard pentru inserarea în documentații tehnice.

Opțiunea 8 – ***Plot Model*** – generează graficul buclei de histerezis pentru modelul ales. Pentru comparație se pot genera mai multe bucle de histerezis în același grafic. Graficele create au posibilitatea de mărire și panoramare a curbelor generate, precum și modificarea culorii.

Opțiunea 9 – ***Clear Chart*** – permite ștergerea zonei grafice a programului.

Opțiunea 10 – ***Scrie rez*** – scrie într-un fișier text datele forță-deplasare pentru bucla de histerezis teoretică modelată cu ajutorul programului.

Opțiunea 11 – **Start** – generează o animație a buclei de histeresis pe toată perioada funcției de variație a deplasării în timp, specificând cu două culori diferite zonele corespunzătoare întinderii și comprimării amortizorului ca în fig 5.45.

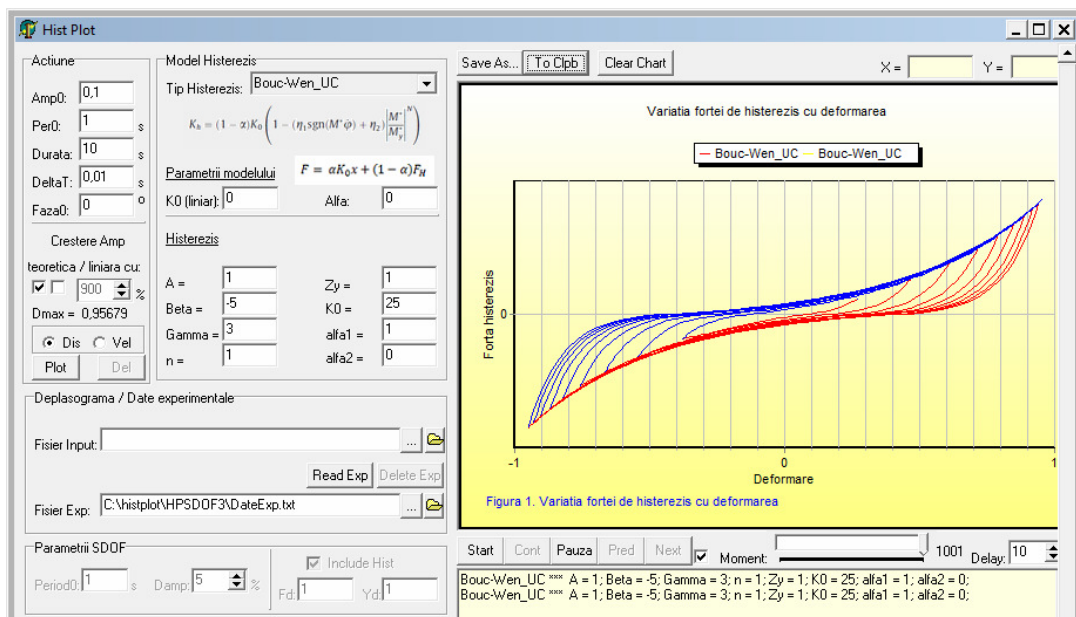


Fig. 5.45 Animație buclă histeresis (Bouc-Wen-UC) folosind opțiunea **Start**

5.4.3 Programul *ProConfig*

Am realizat acest program în scopul determinării parametrilor geometrici a trei configurații noi [100] de montaj al amortizorilor, care să asigure valorile proiecțiilor pe orizontală a forțelor axiale din amortizori, dorite de utilizatorul programului. Aceste configurații cu pârgșii amplifică atât deplasarea, cât și forța din amortizor, în funcție de unghiurile de înclinare a pârgșiiilor. Interfața grafică a programului este prezentată în fig. 5.46.

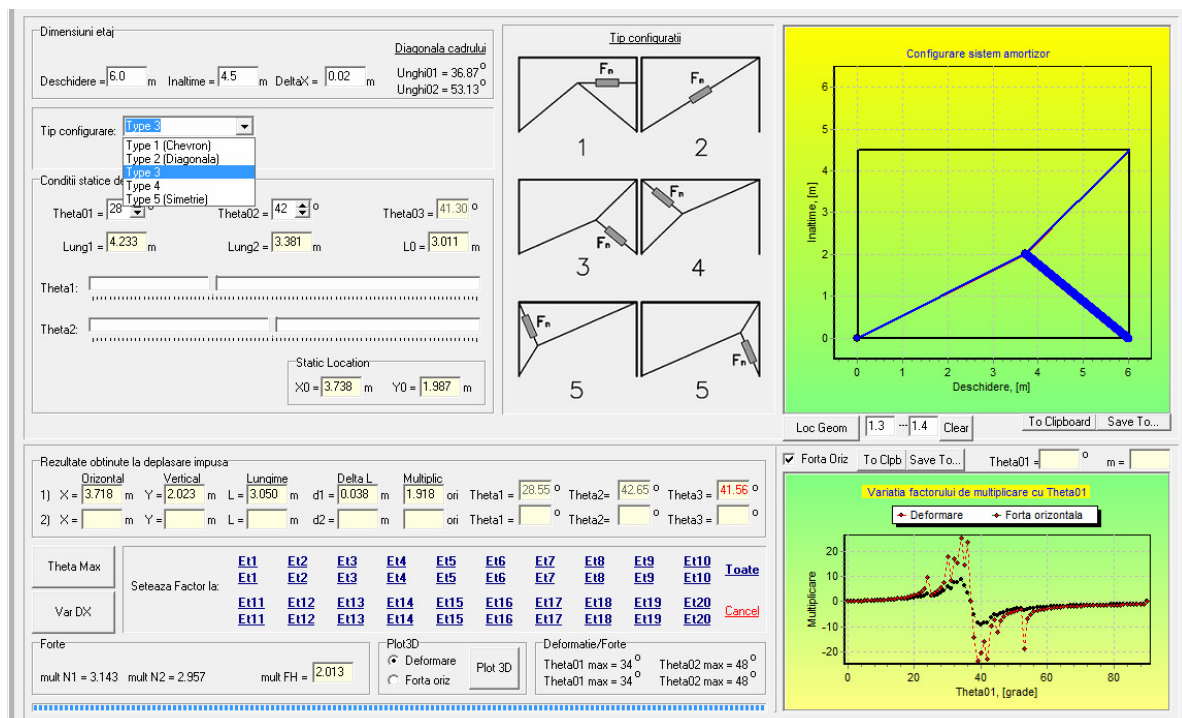


Fig. 5.46 Interfața grafică a programului *ProConfig*

Programul *ProConfig* permite specificarea deschiderii și înălțimii cadrului, precum și alegerea uneia dintre cele patru configurații de amplasare a amortizorilor prezentate în fig. 5.47.

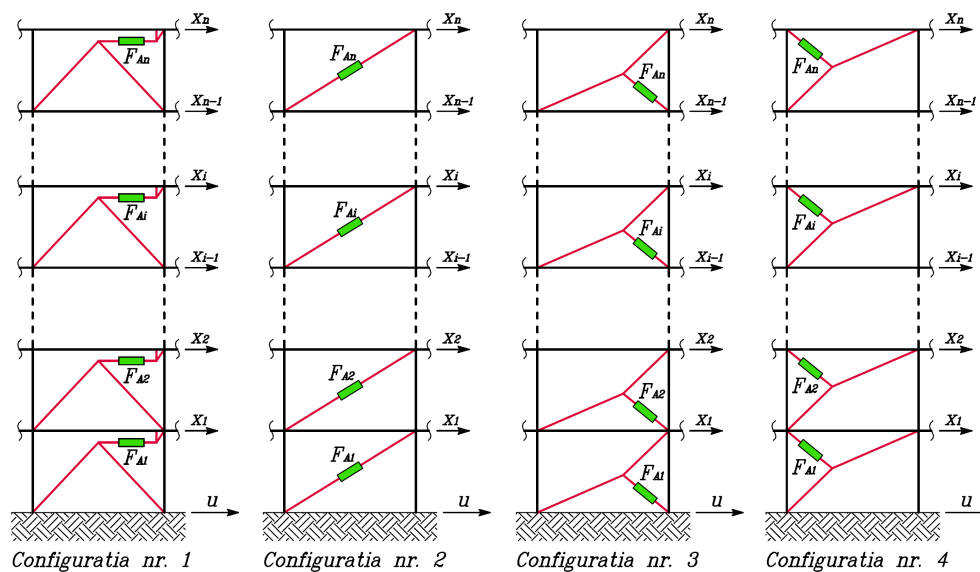


Fig. 5.47 Cele patru configurații de amplasare amortizorilor în *ProConfig*

În continuare sunt prezentate pe scurt opțiunile acestui program de stabilire a parametrilor geometrici ai configurațiilor de amplasare a amortizorilor, alese de utilizatorul programului.

Pentru configurațiile 3 și 4 programul permite, prin interfața sa grafică, modificarea unghiurilor de înclinare a celor două brațe θ_{01} și θ_{02} , afișând multiplicatorii de forță și de cursă specifici respectivei configurații a pârghiilor.

Pentru anumite valori ale multiplicatorilor de forță și de cursă ale amortizorului, programul permite determinarea unghiurilor θ_{01} și θ_{02} pentru configurațiile 3 și 4 în funcție de deschiderea și înălțimea cadrului. Pentru aceasta, programul *ProConfig* determină variația multiplicatorului de cursă și a multiplicatorului de forță de amortizare în funcție de toate valorile unghiurilor θ_{01} și θ_{02} , obținându-se astfel două grafice tridimensionale care arată factorii de multiplicare care pot fi oferiți de respectiva configurație.

Opțiunea **Theta Max** creează o bază de date cu toate valorile multiplicatorilor de forță și cursă pentru fiecare poziție posibilă a configurației alese de utilizatorul programului.

Cu baza de date astfel creată se folosește opțiunea **Plot 3D** care afișează graficul 3D de variație a multiplicatorului de cursă (opțiunea **Deformare**), sau a multiplicatorului de forță (opțiunea **Forta oriz**).

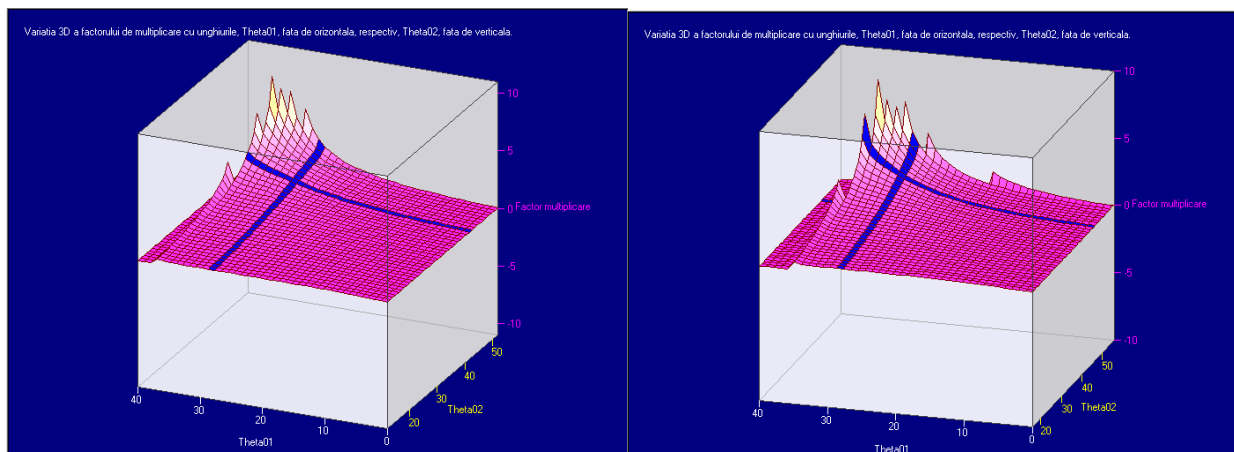


Fig. 5.48 Variația multiplicatorului de cursă(stânga) și forță (dreapta) cu unghiurile θ_{01} și θ_{02}

Programul calculează implicit valorile maxime ale multiplicatorilor de forță și de cursă pentru fiecare valoare θ_{01} afișând grafic aceste două curbe.

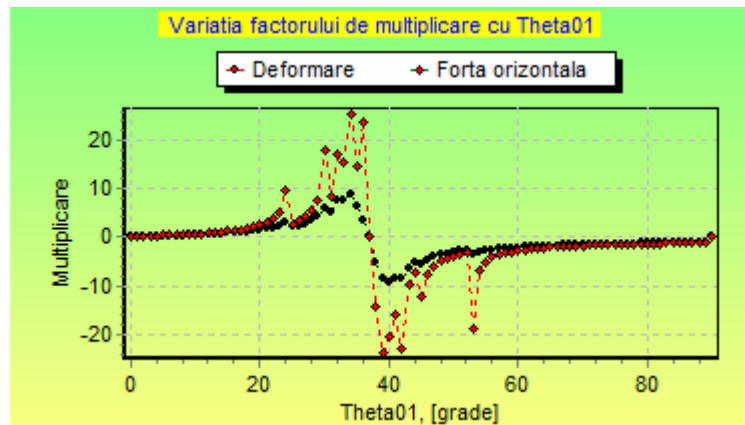


Fig. 5.49 Variația multiplicatorilor maximi: de cursă și de forță orizontală, în funcție de unghiul θ_{01}

Opțiunea **Loc Geom** – este folosită pentru determinarea parametrilor configurației alese pentru o plajă dată de valori a factorului de multiplicare al forței orizontale (proiecția pe orizontală a forței de amortizare din amortizor). Astfel, putem alege parametrii care ne avantajează selectând cu mouse-ul punctul corespunzător poziției alese.

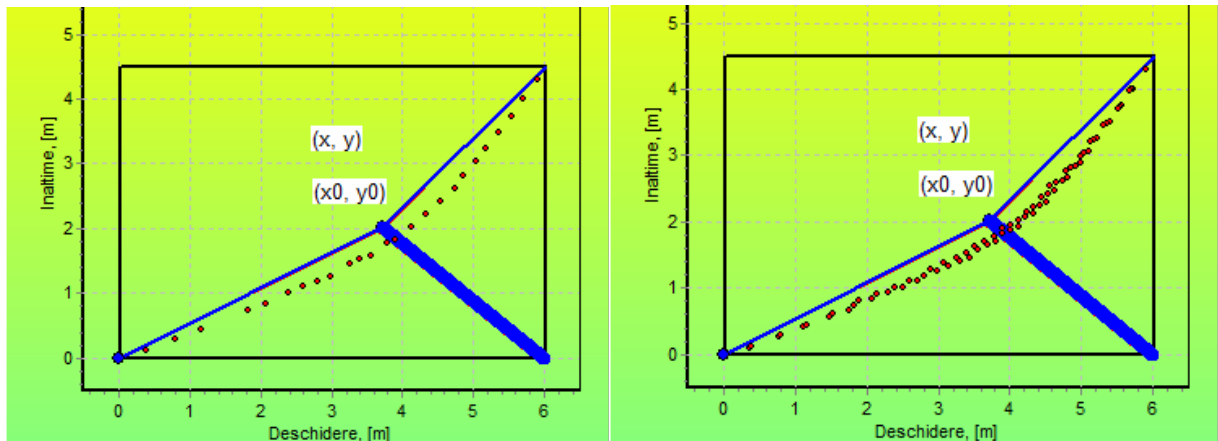


Fig. 5.50 Pozițiile configurației 3, pentru care multiplicatorul de forță orizontală are valorile cuprinse între $1,3 \div 1,4$ (stânga) și între $1,2 \div 1,5$ (dreapta)

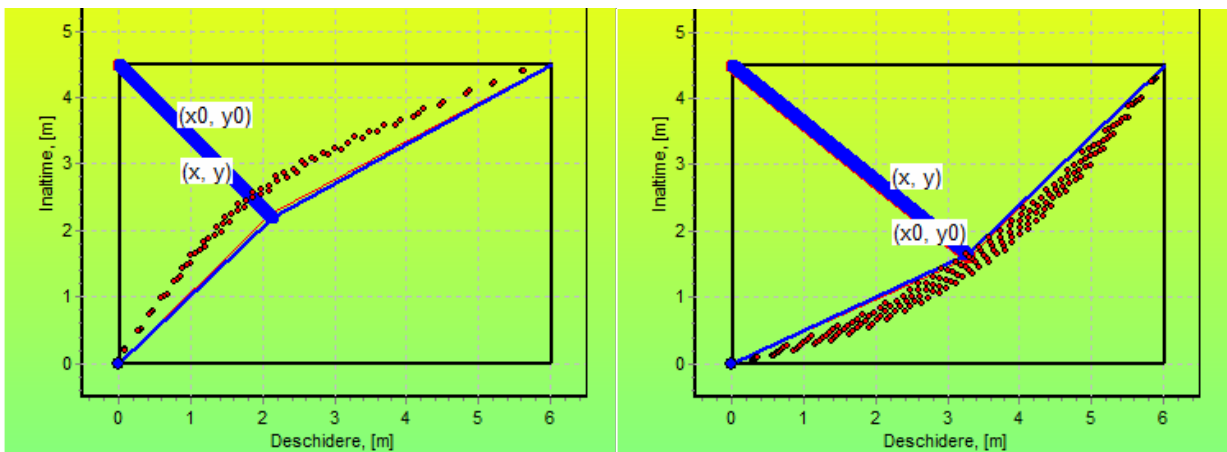


Fig. 5.51 Pozițiile configurației 4, pentru care multiplicatorul de forță orizontală are valorile cuprinse între $1,2 \div 1,5$ (stânga) și între $2 \div 3$ (dreapta)

interfața grafică a programului *GenEcAm* pentru fiecare nivel în parte. Pentru aceasta, se selectează modelul de histerzis folosit. În *GenEcAm* au fost implementate următoarele modele matematice de histerzis: Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener, Taylor, Bouc-Wen clasic, Bouc-Wen Papon, Bouc-Wen-UC, Bouc-Wen-Strenght, Bouc-Wen-Exp și Coulomb.

Pentru fiecare model de histerzis selectat, datele cerute se schimbă în interfața grafică conform parametrilor respectivului model teoretic.

Programul solicită pentru fiecare etaj în parte numărul de amortizori pe direcția seismică analizată precum și factorii de multiplicare ai forței orizontale și ai cursei amortizorului.

Opțiunea **Generare instructiuni** – afișează într-o fereastră output, un set de instrucțiuni *Matlab* care sunt destinate determinării următorilor parametri ai structurii:

- pulsațiile proprii;
- perioadele proprii;
- formele proprii de vibrație;
- factorul de amortizare modal pentru fiecare mod propriu de vibrație în parte;
- factorii de participare modală.

Acest set de instrucțiuni se transferă în programul *Matlab* (cu copy/paste) iar în urma procesării, programul afișează parametrii de mai sus, calculați pentru structura analizată.

Opțiunea **Deplasari relative** – afișează sistemul de ecuații diferențiale ale structurii în format simbolic pentru verificări ulterioare.

Opțiunea **Adaugare histerzis** – integrează în sistemul de ecuații forțele de amortizare z_i în funcție de modelul de histerzis selectat. Această opțiune permite adăugarea mai multor tipuri de amortizori pe etaj, aceștia lucrând în paralel.

Opțiunea **Substituire parametri** – înlocuiește cu valori numerice sistemul de ecuații diferențial completat cu forțele de amortizare.

Opțiunea **Modul DEE** – realizează automat efectul ultimelor trei opțiuni oferind într-o fereastră output, sistemul de ecuații al structurii echipate seismic, într-o formă specifică modulului *DEE* (Diferential Equation Editor).

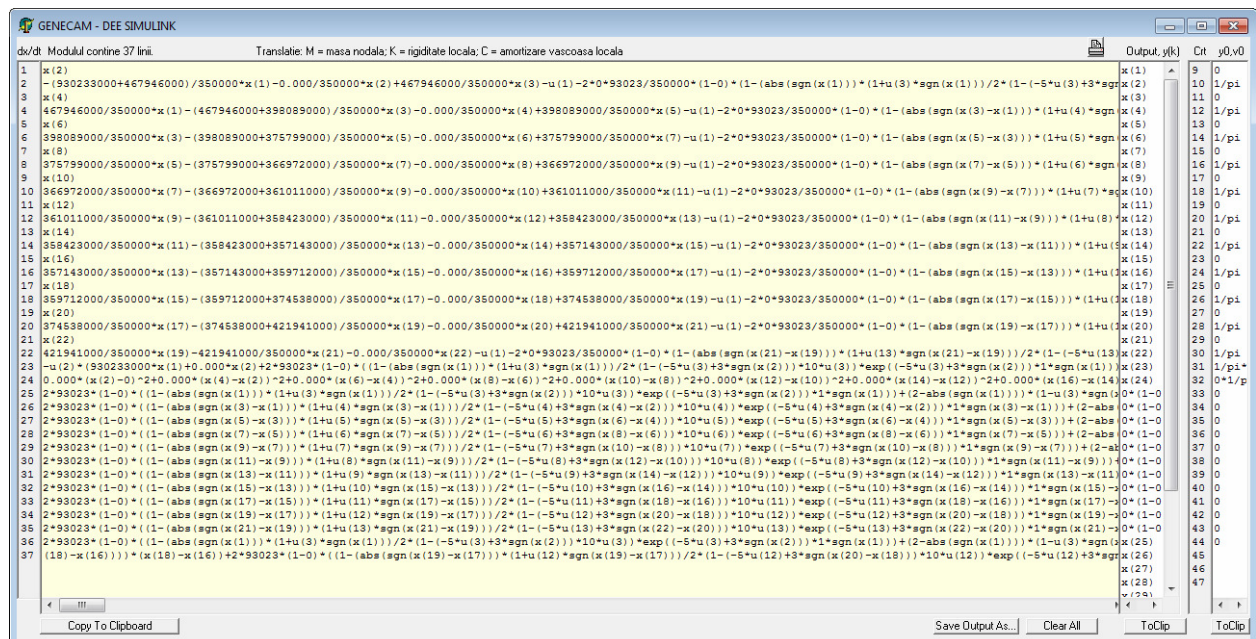


Fig. 5.53 Fereastra output cu sistemul de ecuații diferențiale al clădirii P+10E cu sistem de amortizare ȘERB (modelat cu modelul Bouc-Wen-Exp)

Sistemul astfel prezentat se transferă cu copy-paste în aplicația *Simulink*, creată special pentru aceasta, care va rezolva numeric, în funcție de accelerograma introdusă, acest sistem de ecuații. În acest sens a fost creată câte o aplicație Simulink specială pentru fiecare model teoretic de histerzis în parte, deoarece există mici modificări determinate de numărul de ecuații diferențiale ale sistemului.

Rezultatele obținute cu aplicațiile *Simulink* sunt:

- variația în timp a deplasărilor și vitezelor relative pentru fiecare nivel;
- variația în timp a forței axiale pentru fiecare amortizor;
- energia disipată de fiecare amortizor în parte;
- suma tuturor energiilor disipate de sistemul de amortizori.

Aceste variații pot fi vizualizate în aplicația *Matlab* sau pot fi exportate în *Microsoft Excel* pentru prelucrări ulterioare.

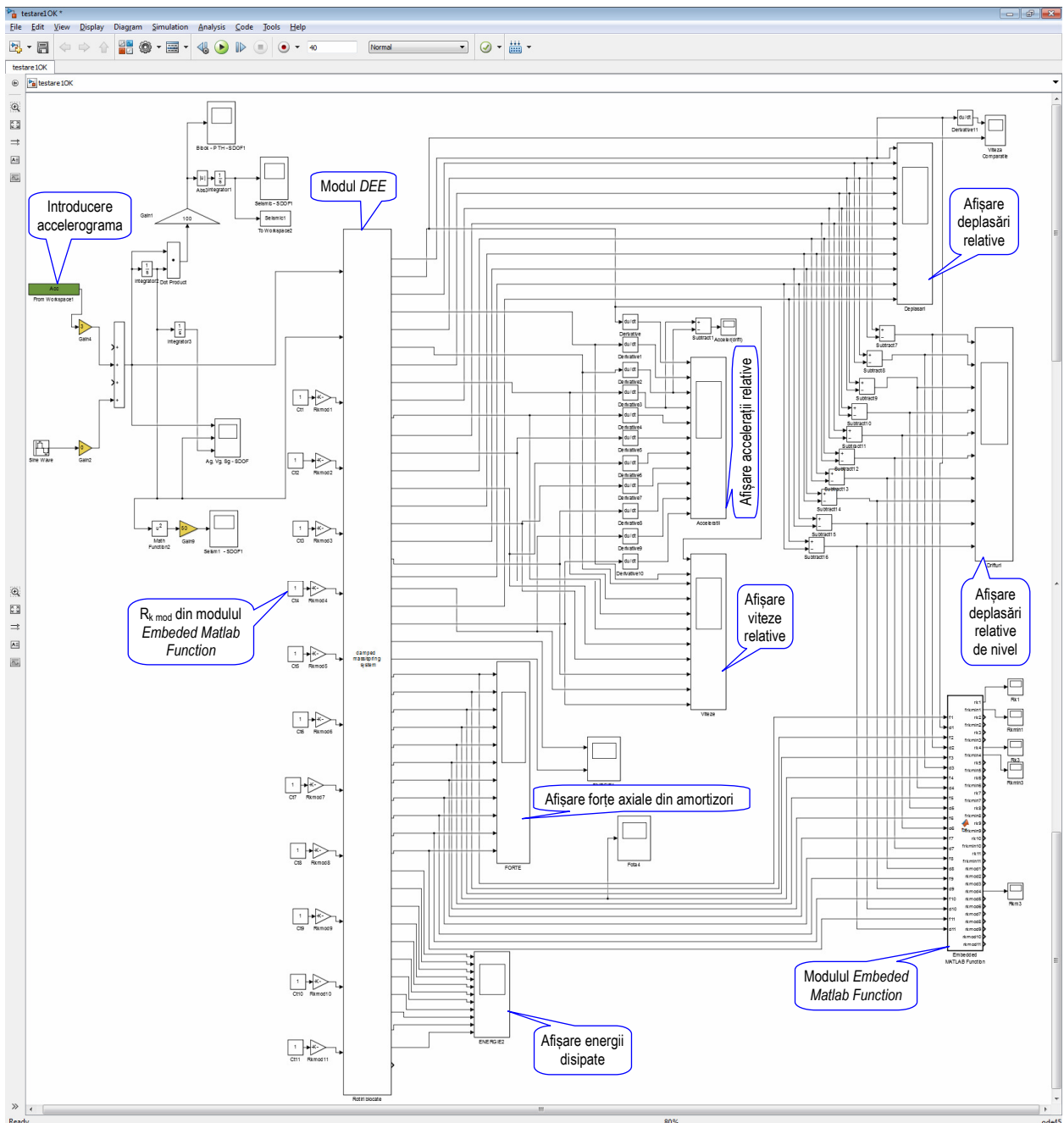


Fig. 5.54 Aplicația *Simulink* creată pentru analiza la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB

Așa cum se observă din figura 5.54, aplicația Simulink creată pentru clădiri echipate cu modele de histerzis Bouc-Wen-Exp conține ca dete de intrare în modulul *DEE*, pe lângă accelerograma de intrare, și valorile R_{kmodi} ($i=1,n$), care reprezintă semnul forței de amortizare din pasul precedent, care este introdus cu ajutorul unui modul *Embeded Matlab Function*.

5.4.5 Programul *ProAnim*

Programul *ProAnim* a fost creat în cadrul acestui studiu cu scopul vizualizării dinamice a rezultatelor obținute cu programul *GenEcAm* și aplicațiile *Simulink* asociate. Rezultatele sunt prezentate sub formă de animație a deplasărilor structurii pe întreaga perioadă a accelerogramei de proiectare folosită ca input seismic.

Programul permite vizualizarea simultană, comparativă, a animației în trei variante de echipare antiseismică a aceleiași clădiri în scopul evaluării grafice a performanțelor fiecărei variante de sistem de amortizare folosit, prin selectarea fișierelor de rezultate obținute cu programul *GenEcAm*.

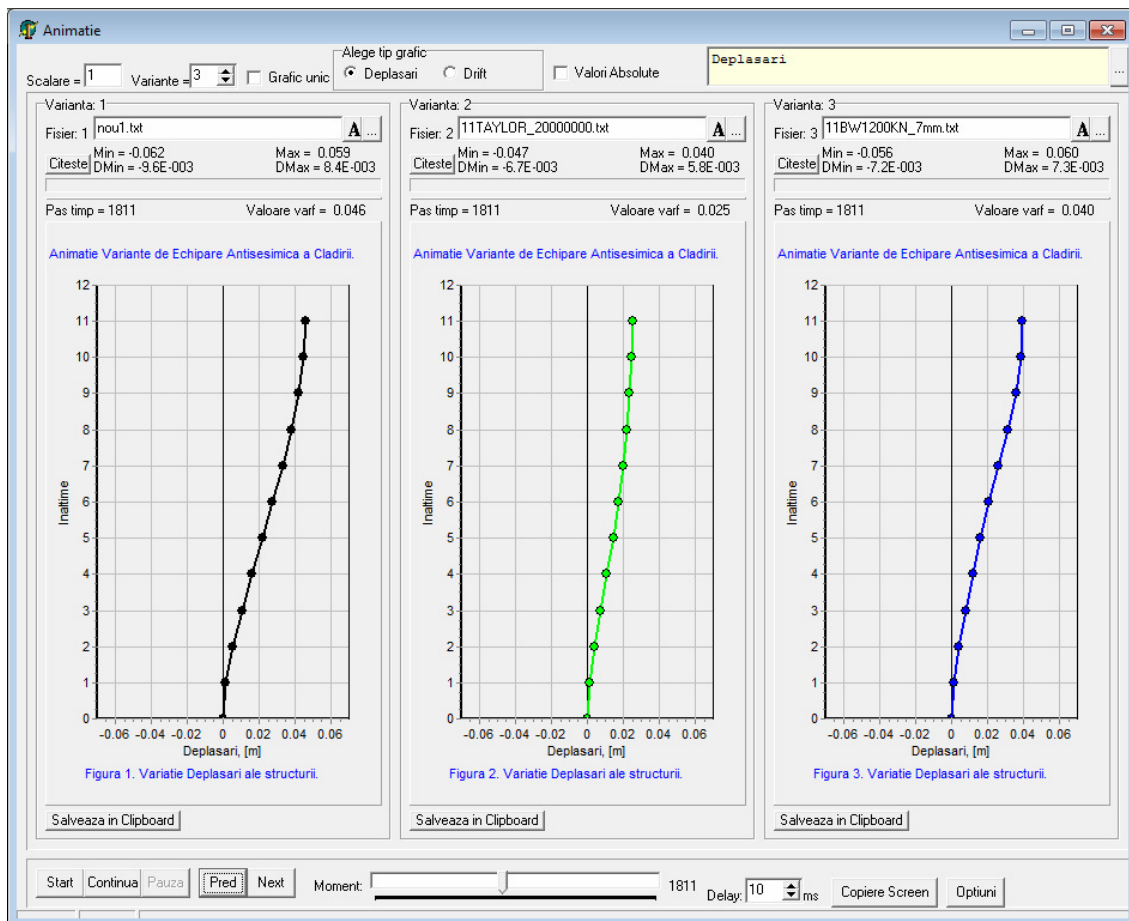


Fig. 5.55 Interfața programului *ProAnim* – rezultate clădire P+10E cu trei variante de echipare

Animația poate fi oprită în orice moment pentru vizualizarea detaliată a deplasărilor relative și a deplasărilor relative de nivel pentru cele trei cazuri de echipare seismică selectate, pentru a fi comparate detaliat. În fig. 5.55 este prezentat cazul unei clădiri P+10E cu trei variante de echipare antiseismică:

- a - fără sistem de amortizare;
- b - cu sistem cu amortizori cu fluid vâscos;
- c - cu sistem de amortizare ȘERB;

Opțiunea **Grafic unic** – permite animația suprapusă a celor trei variante de echipare a clădirii pentru evidențierea mai clară a diferențelor dintre deplasările relative. În fig. 5.56 sunt prezentate rezultatele obținute pe clădirea analizată în toate cele trei variante de echipare antiseismică, suprapuse prin activarea opțiunii **Grafic unic**.

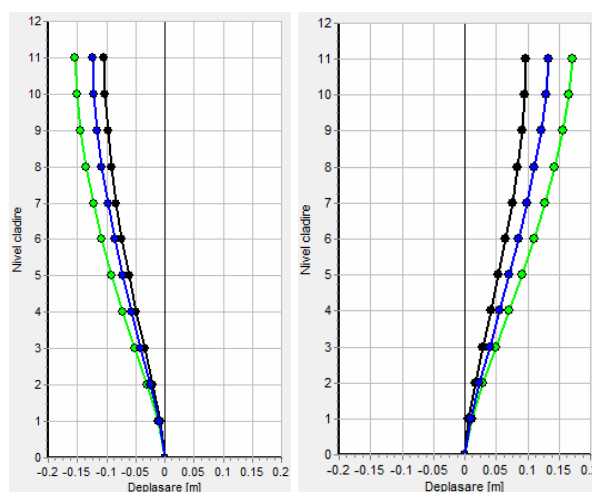


Fig. 5.56 Interfața programului *ProAnim* – opțiunea *Grafic unic* activată

Opțiunea **Drift** – permite animația deplasărilor relative de nivel pentru cele trei variante ale clădirii. În acest caz, opțiunea **Grafic unic**, funcționează similar ca în cazul anterior.

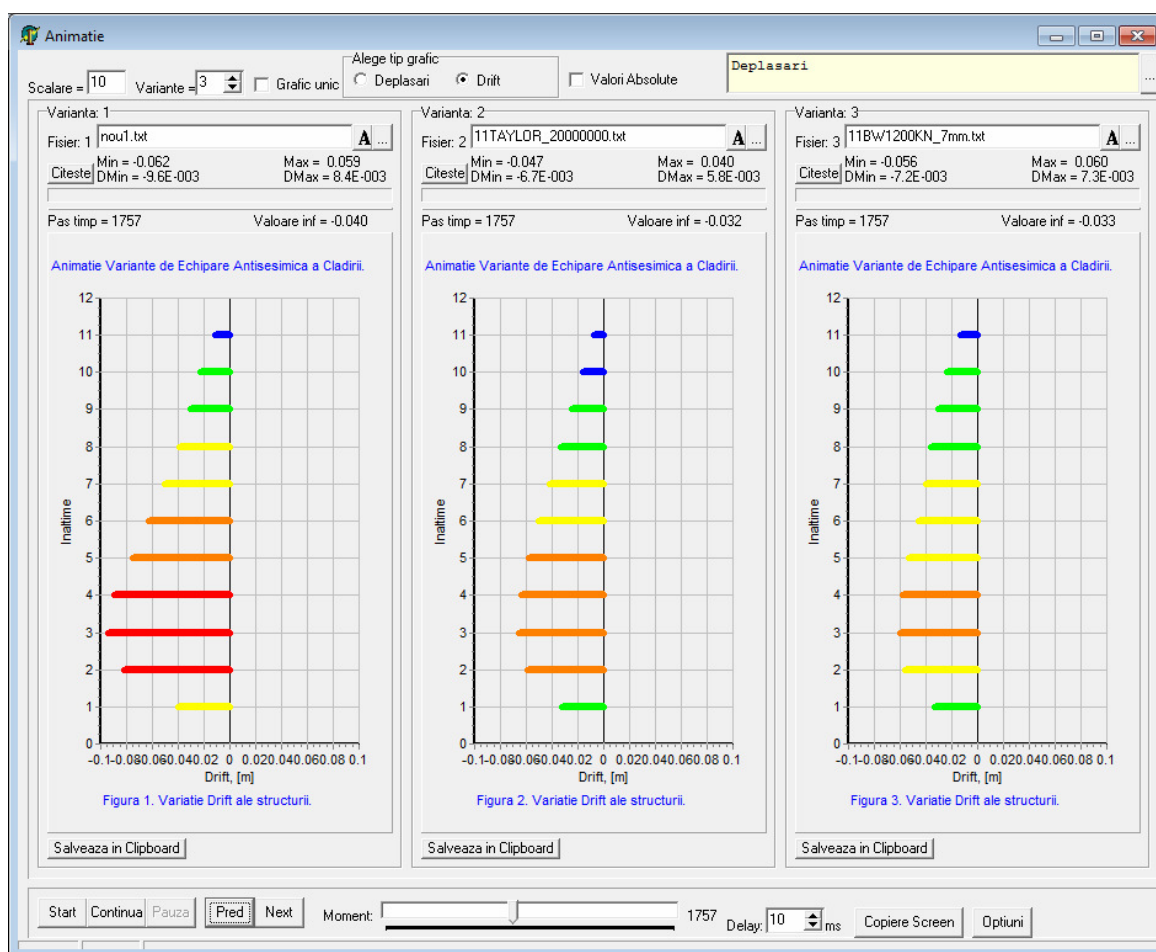


Fig. 5.57 Interfața programului *ProAnim* – rezultate clădire P+10E cu trei variante de echipare (opțiunea *Drift*)

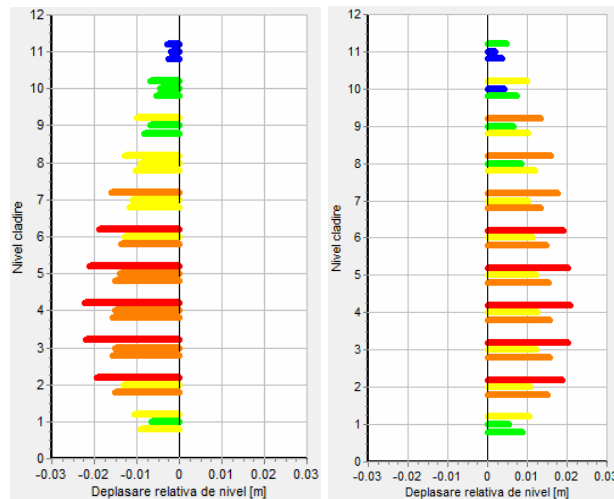


Fig. 5.58 Interfața programului *ProAnim* – opțiunea *Grafic unic* activată

Programul *ProAnim* permite și vizualizarea sub formă de animație în timp a rezultatelor de tip forță de amortizare specifică fiecărui nivel în parte, într-o manieră similară cu vizualizarea deplasărilor relative de nivel. Pentru aceasta se selectează fișierele *txt* cu datele obținute cu *GenEcAm* care conțin variația în timp a forțelor de amortizare din amortizorii de la fiecare nivel, rezultatele obținute fiind vizualizate ca în fig. 5.59.

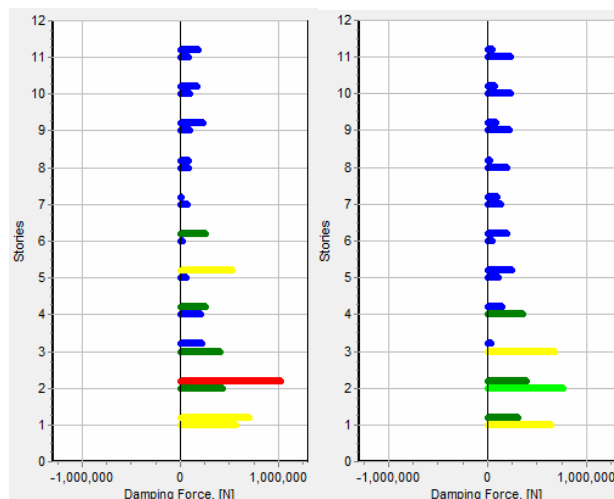


Fig. 5.59 Prezentarea forțelor de amortizare - opțiunea *Grafic unic* activată

5.4.6 Concluzii

Amortizorii românești ȘERB 194-C și amortizorii ȘERB telescopici sunt caracterizați de curbe de histerezis cu forme speciale având o caracteristică neliniară progresivă mai puțin întâlnită în rândul amortizorilor seismici. Programele comerciale actuale nu permit modelarea corespunzătoare a acestor curbe de histerezis, fiind necesară realizarea unor programe software care să includă ca modele teoretice de histerezis și alte modele matematice mai puțin uzuale, unul dintre acestea fiind și modelul matematic Bouc-Wen.

În cadrul acestui subcapitol au fost prezentate cele patru programe software realizate de autor care alcătuiesc un sistem integrat necesar proiectării optime a sistemului de amortizare la suprastructură sau în fundație a clădirilor. Acest set de programe a fost realizat în principal

pentru proiectarea optimală a sistemelor de amortizare cu amortizori românești ȘERB, dar prin multiplele sale opțiuni permite abordarea cu succes și a altor sisteme de amortizare uzual folosite.

Setul de programe de proiectare optimală a sistemului de protecție antiseismică, cuprinde programele: *HistPlot*, *ProConfig*, *GenEcAm* și *ProAnim*.

Programul *HistPlot* permite stabilirea parametrilor de formă și dimensiune ai buclelor de histerezis pentru 11 modele matematice de histerezis uzual folosite (Maxwell, Kelvin Voigt, Zener, Coulomb, Ramberg-Osgood, amortizare vâscoasă), dar și pentru câteva modele matematice de histerezis mai puțin folosite cum sunt modelul Bouc-Wen clasic și modele Bouc-Wen derivate din acesta: Bouc-Wen-Exp, Bouc-Wen-UC, Bouc-Wen-Strength și Bouc-Wen Papion. Dintre toate acestea modelul Bouc-Wen-Exp pe care l-am propus, s-a dovedit în cadrul acestui studiu că modelează foarte bine bucla de histerezis a amortizorilor ȘERB de suprastructură.

Programul solicită specificarea parametrilor modelului matematic de histerezis ales și realizează grafic bucla de histerezis forță-deplasare pentru diferite legi de variație a deplasării. Aceste grafice pot fi suprapuse și analizate comparativ pentru a permite proiectantului să aleagă parametrii optimi și modelul matematic potrivit pentru modelarea cât mai precisă a buclelor de histerezis determinate experimental. Scopul final al acestui program este determinarea parametrilor modelului matematic de histerezis care modelează corespunzător comportamentul amortizorilor aleși pentru sistemul de amortizare a clădirii analizate.

Al doilea program realizat este programul *ProConfig* care permite alegerea uneia din cele șase configurații de amplasare a amortizorilor la suprastructură. Cele șase configurații cuprind, pe lângă configurația Chevron și contravântuire, încă patru configurații (două câte două, simetrice), care printr-un sistem de pârghii amplifică atât deplasarea, cât și forța de amortizare din amortizor.

Prin modificarea lungimii pârghiilor se obțin factori de amplificare a forței de amortizare diferiți, fapt care poate fi util pentru anumite condiții specifice clădirilor analizate. Programul analizează toate opțiunile posibile pentru configurațiile cu pârghii, oferind grafice bidimensionale și tridimensionale de variație a forței de amortizare, funcție de deplasarea relativă de nivel și funcție de unghiurile de înclinare a pârghiilor. Pentru toate celelalte configurații de amplasare a amortizorilor, care nu au fost analizate, programul permite introducerea manuală a celor doi coeficienți de modificare a forței și cursei amortizorului care se calculează pentru fiecare configurație în parte.

Programul *GenEcAm* a fost realizat cu scopul de a asambla sistemul de ecuații diferențiale de ordinul I al structurii echivalente a clădirii solicitată seismic, echipată cu amortizori sau izolatori, într-un format compatibil cu modulul *Differential Equation Editor* al programului de calcul matematic *Matlab/Simulink*, care-l poate rezolva ulterior cu ajutorul unei aplicații pe care am realizat-o în Simulink, într-o manieră eficientă, pentru o accelerogramă de proiectare specificată de proiectant.

Programul solicită rigiditățile de nivel, masele de nivel și un factor de amortizare de nivel pentru a defini astfel, structura liniară echivalentă a clădirii analizate. Masele de nivel și rigiditățile de nivel sunt obținute cu ajutorul unuia din programele comerciale de analiză 3D a structurilor de rezistență a clădirilor (ETABS, SAP2000 etc.), iar factorul de amortizare de nivel se alege astfel încât, factorul de amortizare modal pentru primele moduri de vibrație, determinat cu *GenEcAm*, să fie 5%. Ulterior, se alege din opțiunile programului, modelul matematic de histerezis testat anterior cu programul *HistPlot* pentru amortizorii folosiți și se precizează, pentru fiecare etaj în parte, parametrii buclei de histerezis determinați anterior cu acest program.

Se pot folosi mai multe tipuri de amortizori pe aceeași structură, iar numărul acestora poate fi diferit de la un nivel la altul, pentru a permite astfel, proiectarea optimă a clădirii analizate. Pentru fiecare nivel se specifică factorii de amplificare ai forțelor de amortizare și ai deplasărilor din amortizor, determinate cu programul *ProConfig* pentru tipul de configurație de amplasare a amortizorilor ales de proiectant.

Programul *GenEcAm* assemblează sistemul de ecuații diferențiale de ordinul I pentru o clădire cu maxim 20 de nivele, permițând transferul acestui sistem în aplicația *Simulink* realizată de autor pentru modelarea comportamentului la seism al clădirii analizate.

Rezultatele oferite de această aplicație *Simulink*, sunt deplasările, vitezele și accelerațiile de nivel, dar și graficele buclelor de histerezis pentru fiecare amortizor în parte, precum și variația energiei seismice amortizate în timp. Suplimentar, programul *GenEcAm* assemblează o aplicație cu instrucțiuni *Matlab*, care după rulare, oferă perioadele proprii de vibrație și desenează modurile proprii de vibrație asociate, calculând factorii de amortizare modali și factorii de participare modală pentru fiecare mod propriu în parte.

Scopul programului *GenEcAm* este în primul rând modelarea comportamentului seismic al clădirilor echipate cu amortizori seismici ȘERB care au bucle de histerezis neuzuale, dar novatoare și eficiente din punctul de vedere al protecției la seism; însă permite folosirea și a altor amortizori uzual folosiți a căror buclă de histerezis a fost modelată anterior cu programul *HistPlot*.

Al patrulea program, realizat în acest studiu, este programul *ProAnim* care are ca scop postprocesarea rezultatelor programului *GenEcAm*, permițând:

- vizualizarea grafică și animată a deplasărilor clădirii în timpul seismului, simultan pentru maxim trei seturi de rezultate oferite de *GenEcAm*. Pot fi vizualizate deplasările relative, dar și deplasările relative de nivel;
- vizualizarea grafică și animată a forțelor de amortizare din amortizori în timpul seismului, simultan pentru maxim trei rezultate oferite de *GenEcAm*.

Prezentarea simultană a celor trei seturi de rezultate *GenEcAm*, permite compararea vizuală și valorică a acestor deplasări și forțe de amortizare, permițându-se astfel alegerea variantei optime a sistemului de amortizare pentru clădirea analizată.

Cele patru programe se constituie într-un instrument de proiectare a sistemului de echipare antiseismică al unei clădiri, eficient și ușor de folosit.

5.5 Concluzii finale

Modelul matematic implementat computațional prezentat în acest capitol se constituie într-un instrument de proiectare rațională a sistemului de protecție antiseismică al clădirii analizate, prin compararea rezultatelor analizei la seism obținute pe clădirea echipată cu diferite sisteme de protecție antiseismică. Parametrii care sunt comparați sunt: deplasările relative de nivel, vitezele relative de nivel, forțele axiale din amortizori și energiile absorbite de sistemul de protecție antiseismică ales, pe întreaga durată a seismului.

Pe lângă modelele clasice de histerezis (Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener, Coulomb și amortizare vâscoasă), setul de programe realizat cuprinde încă cinci variante ale modelului matematic Bouc-Wen dintre care două sunt contribuții originale care nu au mai fost prezentate în literatura de specialitate și care sunt extrem de utile în modelarea dispozitivelor de amortizare tip ȘERB montate la suprastructură.

Cele două modele Bouc-Wen adaptate de autor și propuse în acest studiu sunt:

- Modelul Bouc-Wen_Strength permite modificarea rezistenței care caracterizează bucla histeretică, model cu contribuții originale în definirea coeficientului de adaptare;
- Modelul Bouc-Wen_Exp, model nou, original, care permite modelarea comportamentului amortizorilor ȘERB de suprastructură pentru orice variație a deplasării relative de nivel (specifice accelerogramelor reale sau de proiectare);

Avantajele celor două modele originale pe care le-am propus, sunt:

- modelează adecvat forma buclei de histerezis a amortizorilor de tip ȘERB, spre deosebire de celelalte adaptări cunoscute ale modelului clasic Bouc-Wen;
- se aplică pentru un domeniu larg de variație a deplasării relative de nivel în timp.
- ambele modele teoretice noi, au mai mulți parametri care pot fi ușor identificați cu ajutorul aplicației *HistPlot*, în care acestea au fost implementate, pe baza datelor experimentale obținute pe amortizorii ȘERB reali, printr-un proces de fitare grafică a curbei teoretice cu cea obținută experimental.

Elementele de noutate ale acestei modelări sunt:

- implică folosirea modelelor matematice de histerezis Bouc-Wen clasic și adaptat, fapt care lărgeste capacitățile de modelare a buclelor histeretice întâlnite la dispozitivele de protecție antiseismică;
- permite alegerea modelului de histerezis potrivit fiecărui tip de dispozitiv histeretic folosit la echiparea antiseismică a clădirii precum și determinarea parametrilor acestora;
- are o mare flexibilitate în utilizarea modelelor matematice de histerezis, permițând folosirea și a altor modele de histerezis, în afara celor analizate, care exprimă relația între forța și deplasarea din amortizor într-o formă algebrică;
- specificarea facilă a accelerogramelor de proiectare necesare analizei la seism a clădirii echipate antiseismic
- specificarea facilă a parametrilor corespunzători oricărei configurații de amplasare a amortizorilor la suprastructură
- compararea grafică și numerică a deplasărilor, vitezelor, forțelor din amortizori și a energiilor absorbite în timpul seismului pentru clădirea analizată, echipată cu diferite sisteme de protecție antiseismică, în vederea alegerii și proiectării corespunzătoare a sistemului de protecție potrivit.

CAPITOLUL 6

CONTRIBUȚII PRIVIND VALIDAREA MODELĂRII STRUCTURILOR ECHIPATE ANTISEISMIC

6.1 Introducere

Așa cum s-a văzut în capitolul anterior, aplicația *GenEcAm* permite modelarea comportamentului dinamic la seism a clădirilor cu până la 20 de niveluri echipate antiseismic cu amortizori sau izolatori aleși dintr-o plajă foarte largă de opțiuni datorită multiplelor modele matematice de histerezis implementate în acest program software. Acest program permite astfel determinarea eficienței antiseismice a sistemului de amortizare românesc care utilizează amortizori ȘERB montați la suprastructură sau în fundație.

Pentru validarea metodelor analitice și computaționale folosite pentru realizarea aplicației *GenEcAm* am ales să studiez comparativ rezultatele obținute cu această aplicație și rezultatele oferite de programe software consacrate cum sunt programele *ETABS* și *SAP2000*. Pentru aceasta am ales studiul echipării antiseismice care folosește amortizori cu fluid vâscos care pot fi modelați cu ambele tipuri de programe.

Metoda de validare constă în utilizarea analizei dinamice time-history a structurilor echipate antiseismic, supuse acțiunii seismice în *GenEcAm* și *SAP2000* și compararea ulterioară a rezultatelor obținute cu cele două programe în cazul folosirii amortizorilor cu fluid vâscos (tip Taylor devices). Validarea procedurilor analitice și computaționale folosite în aplicația *GenEcAm*, în cazul clădirilor echipate cu amortizori cu fluid vâscos, este utilă și în cazul celorlalte tipuri de amortizori care pot fi modelați cu aplicația *GenEcAm*.

Pentru validarea concretă a modelului analitic computațional și a programului *GenEcAm*, a fost modelat comportamentul la seism, în *SAP2000* și în *GenEcAm*, a două structuri în cadre de beton armat, având regimurile de înălțime P+5E (prezentate în Anexa A) și P+10E pentru diferite accelerograme de proiectare.

6.2 Analiza structurilor în *SAP2000*

Pentru compararea rezultatelor obținute cu *SAP2000* și respectiv cu *GenEcAm*, am ales două structuri de tip cadre din beton armat:

- clădire P+10E cu câte trei deschideri de 5,5 m interax pe cele două direcții în plan, înălțime de nivel de 3 m, secțiune transversală stâlpi de 80x80 cm, secțiune transversală grinzi 60x30 cm;
- clădire P+5E cu câte trei deschideri de 5,5 m interax pe cele două direcții în plan, înălțime de nivel de 3 m, secțiune transversală stâlpi de 60x60 cm, secțiune transversală grinzi 55x30 cm (ale cărei rezultate le-am prezentat în Anexa A).

Caracteristicile pe care le-am considerat la modelarea 3D a celor două structuri în *SAP2000* sunt:

- proiectarea structurii clădirilor s-a realizat pentru clasa de ductilitate înaltă DCH;
- materialele folosite sunt: beton clasa C30/37, iar pentru armătură, oțelul BST500;

- stâlpii s-au considerat încastrați la bază, iar planșeele s-au considerat indeformabile în planul lor;
- grinzile au fost introduse cu secțiuni T, având lățimea tălpii egală cu lățimea stâlpului la care se adaugă patru grosimi de planșeu de fiecare parte a grinzii, pentru grinzile care intră într-un nod interior (conform P100-1/2013), sau două grosimi de planșeu de fiecare parte a grinzii pentru grinzile care intră într-un nod exterior;
- rigiditatea considerată pentru soluționarea modelului corespunde stării fisurate a betonului întins, fiind estimată la 0,5 din modulul de rigiditate al secțiunii brute de beton;
- amortizare structurală de 5%.

În urma analizei statice la seism a celor două modele folosind metoda forțelor statice echivalente am determinat deplasările laterale pe care le-am verificat la SLS și la SLU, constatând că deplasările relative de nivel calculate nu le depășesc pe cele admisibile (conform P100-1/2013).

Deoarece, programul *GenEcAm* face o analiză dinamică time-history a structurii având ca excitație seismică o accelerogramă specificată de utilizator, tipul de analiză corespunzătoare în *SAP2000* este analiza dinamică tranzitorie time-history care permite introducerea excitației seismice sub formă de accelerograme.

Pentru obținerea accelerogramelor sintetice de proiectare am folosit programul *MSIMQKE* [111], realizat în anul 2012 de colectivul de autori condus de prof. dr. ing. Tudor Postelnicu (U.T.C.B.). Acest program se bazează pe teoriei vibrațiilor aleatoare, utilizată și de programul *SIMQKE* realizat în 1976 la M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology).

Seturile de accelerograme pe care le-am folosit pentru acest studiu de validare fac parte din volumele I, II și III ale cărții „*Proiectarea structurilor de beton armat în zone seismice*” editată de prof. dr. ing. Tudor Postelnicu în anul 2012 [111], fiind propuse de colectivul de autori pentru proiectarea structurilor în condițiile seismice românești.

Pentru studiul de validare am ales câte un set de șapte accelerograme pentru fiecare perioadă de colț T_c ($T_c = 0.7$ s, $T_c = 1$ s și $T_c = 1.6$ s). Parametrii folosiți pentru generarea acestor accelerograme au fost:

- accelerația terenului pentru proiectare $a_g = 0.30g$;
- factorul de amplificare dinamică și perioadele de control conform P100 – 1/2013;
- fracțiunea din amortizarea critică s-a considerat ca fiind 5%;
- numărul de puncte $n_p = 2048$;
- durata seismului: $T_d = 20s$;
- pasul de timp $\Delta t = 0,01s$;
- accelerația maximă a accelerogramelor este mai mare de 0,30g;
- accelerogramele sunt compatibile cu spectrul elastic de accelerații din amplasament în intervalul 0,05 s - 6 s, cu increment de 0,01s;
- anvelopa utilizată în domeniul timp este cea trapezoidală cu $t_{inf}/Tr = 0,2$ și $t_{sup}/Tr = 0,7$.

Cele 21 de accelerograme au fost introduse cu PGA de $0,5 \cdot a_g$, conform indicațiilor din P100-1 pentru cazul analizei dinamice liniare necesară verificării la SLS. Spectrele de răspuns elastic ale accelerogramelor considerate sunt prezentate în figurile 6.1, 6.2 și 6.3 în care se observă că între accelerogramele generate (și compatibile cu sistemul de referință al terenului conform P100-1/2013) există o variabilitate de aproximativ $0,5/7,5 = 7\%$ în zona de amplificare maximă, (la nivel de valoare maximă și conținut de frecvență), variabilitate ce se va propaga și asupra rezultatelor analizei la seism. Deoarece metodele de analiză ale celor două programe *GenEcAm* și *SAP2000* sunt diferite, această variabilitate se va transmite într-o măsură mai mică sau mai mare și asupra rezultatelor oferite de cele două programe.

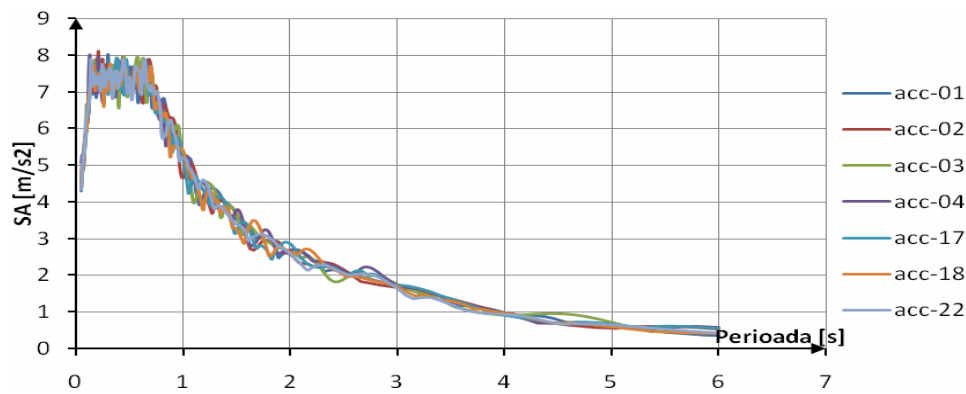


Fig. 6.1 Spectrele de răspuns elastice ale celor șapte accelerograme generate pentru $T_c = 0,7$ s [111]

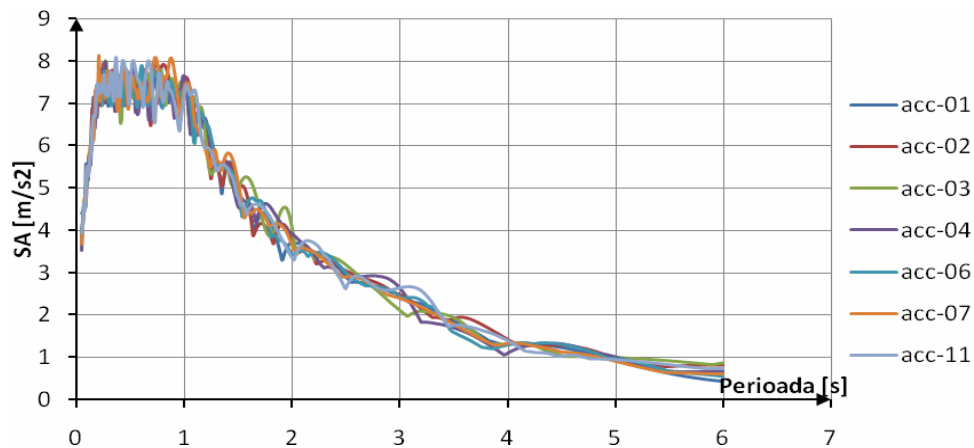


Fig. 6.2 Spectrele de răspuns elastice ale celor șapte accelerograme generate pentru $T_c = 1$ s [111]

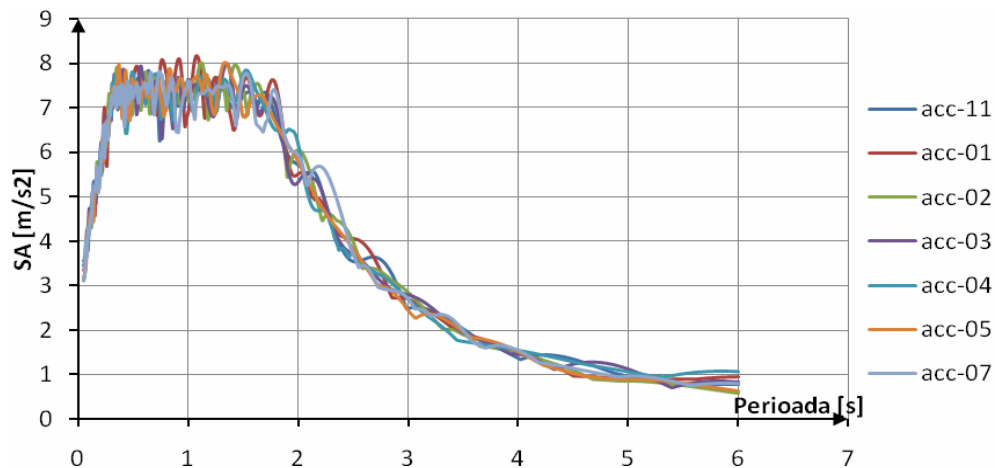


Fig. 6.3 Spectrele de răspuns elastice ale celor șapte accelerograme generate pentru $T_c = 1,6$ s [111]

Pentru o validare temeinică a modelului analitic computațional implementat în *GenEcAm*, pentru structura P+10E, am realizat atât în *SAP2000* cât și în *GenEcAm*, cele 21 de analize dinamice liniare (câte șapte accelerograme pentru fiecare T_c), pentru fiecare din următoarele trei cazuri de echipare antisismică:

- structura echipată cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 10000$ kNs/m² și exponentul vitezei $\alpha_v = 1$, câte unul pe fațada fiecărui etaj;
- structura echipată cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 17000$ kNs/m² și exponentul vitezei $\alpha_v = 1$, câte unul pe fațada fiecărui etaj;

- structura fără dispozitive de amortizare sau izolare seismică.

Pentru a doua structură, cu regim de înălțime P+5E, am realizat atât în *SAP2000* cât și în *GenEcAm*, câte nouă analize dinamice liniare (folosind câte trei accelerograme pentru fiecare T_c), pentru fiecare din următoarele trei cazuri de echipare antisismică:

- structura echipată cu amortizori cu fluid vâcos cu $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$ și exponentul vitezei $\alpha_V = 1$, câte unul pe fațada fiecărui etaj;
- structura echipată cu amortizori cu fluid vâcos cu $c = 4000 \text{ kNs/m}^2$ și exponentul vitezei $\alpha_V = 1$, câte unul pe fațada fiecărui etaj;
- structura fără dispozitive de amortizare sau izolare seismică.

Rezultă astfel, un număr total de 90 de analize dinamice liniare realizate în *SAP2000* și tot atâtea realizate în *GenEcAm*, în urma cărora am obținut ca rezultate, variația în timp a deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative, precum și a forțelor de amortizare din amortizori. Acest volum mare de rezultate a fost procesat prin analiză comparativă și prelucrări statistice în vederea validării procedurilor analitice și computaționale care stau la baza modelării prezentate în capitolul 5.

6.3 Compararea rezultatelor referitoare la modurile proprii de vibrație

Pentru determinarea modurilor proprii și a perioadelor proprii de vibrație ale structurii analizate, programul *GenEcAm* are nevoie de specificarea rigidităților de nivel.

Etapele pe care le-am parcurs pentru obținerea rigidităților de nivel ale celor două structuri analizate au fost:

- generarea modelelor 3D cu elemente finite în programul *SAP2000*;
- din modelele cu elemente finite am înlăturat toate forțele exterioare și toate masele, inclusiv greutatea proprie;
- în capătul superior al stâlpilor de la ultimul etaj am aplicat o forță de 1 kN distribuită uniform pe cei 16 stâlpi;
- cu acest model am realizat o analiză statică liniară care a permis determinarea deplasării relative a fiecărui nivel, determinând astfel rigiditățile de nivel:

$$k_i = 1/x_{ri} \quad (6.1)$$

unde x_{ri} – deplasarea relativă de nivel a nivelului i .

Rigiditățile de nivel astfel calculate pentru cele două structuri sunt prezentate în tabelele 6.1 și 6.2.

Tab. 6.1 Rigidități de nivel pentru structura P+10E obținute cu *SAP2000*

Nivel	Deplasări relative [m]	Rigidități de nivel [N/m]
P	$1,075 \times 10^{-9}$	$9,30233 \times 10^8$
Et. 1	$3,212 \times 10^{-9}$	$4,67946 \times 10^8$
Et. 2	$5,724 \times 10^{-9}$	$3,98089 \times 10^8$
Et. 3	$8,385 \times 10^{-9}$	$3,75799 \times 10^8$
Et. 4	$1,111 \times 10^{-8}$	$3,66972 \times 10^8$
Et. 5	$1,388 \times 10^{-8}$	$3,61011 \times 10^8$
Et. 6	$1,667 \times 10^{-8}$	$3,58423 \times 10^8$
Et. 7	$1,947 \times 10^{-8}$	$3,57143 \times 10^8$
Et. 8	$2,225 \times 10^{-8}$	$3,59712 \times 10^8$
Et. 9	$2,492 \times 10^{-8}$	$3,74538 \times 10^8$
Et. 10	$2,729 \times 10^{-8}$	$4,21941 \times 10^8$

Tab. 6.2 Rigidități de nivel pentru structura P+5E obținute cu SAP2000

Nivel	Deplasări relative [m]	Rigidități de nivel [N/m]
P	$2,164 \times 10^{-9}$	$4,62107 \times 10^8$
Et. 1	$5,912 \times 10^{-9}$	$2,66809 \times 10^8$
Et. 2	$1,00 \times 10^{-8}$	$2,44618 \times 10^8$
Et. 3	$1,416 \times 10^{-8}$	$2,40385 \times 10^8$
Et. 4	$1,822 \times 10^{-8}$	$2,46305 \times 10^8$
Et. 5	$2,173 \times 10^{-8}$	$2,849 \times 10^8$

Rigiditățile de nivel astfel calculate au fost introduse ca date de intrare în programul *GenEcAm* care, prin folosirea opțiunii *Generare Instructiuni*, a permis obținerea unei aplicații Matlab particularizate care prin procesare a dus la determinarea parametrilor analizei modale ale celor două structuri considerate pentru analiză.

Pentru determinarea parametrilor analizei modale în programul *SAP2000*, cele două structuri analizate au fost modelate 3D cu elemente finite parcurgându-se pașii specifici pentru analiza modală.

Rezultatele obținute prin analizele modale realizate cu cele două programe și care au fost supuse studiului comparativ sunt:

- perioadele proprii de vibrație;
- modurile proprii de vibrație, respectiv vectorii proprii care definesc formele proprii de vibrație.

Pentru a putea compara rezultatele, analiza în *SAP2000* a structurii 3D a fost procesată luând în considerare doar mișcarea în planul XOZ, prin restricționarea gradelor de libertate corespunzătoare.

În tab. 6.3 sunt prezentați vectorii proprii V1, V2, V3 ai clădirii cu 10 etaje, valori care s-au obținut cu programul *GenEcAm* și care au permis determinarea primelor patru forme proprii de vibrație. În fig. 6.4 sunt prezentate primele trei forme proprii de vibrație obținute cu programul *GenEcAm*.

Tab. 6.3 Vectorii proprii pentru structura P+10E

Nivelul	V1	V2	V3
P	0.4326	0.4082	0.3819
E1	0.4243	0.3402	0.2104
E2	0.406	0.1998	-0.0894
E3	0.3778	0.0147	-0.3543
E4	0.341	-0.1748	-0.4332
E5	0.2967	-0.3293	-0.2826
E6	0.246	-0.4186	0.0154
E7	0.1908	-0.4263	0.3006
E8	0.1329	-0.3541	0.4273
E9	0.0755	-0.2234	0.3434
E10	0.0254	-0.0787	0.133

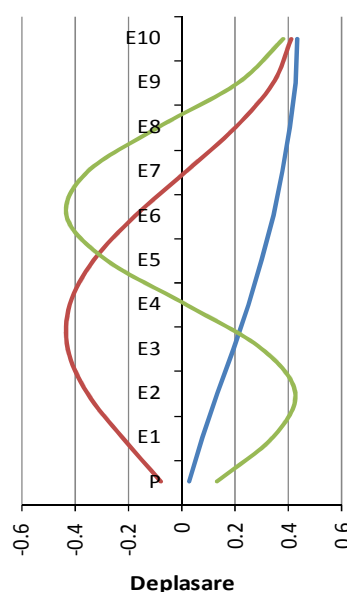


Fig. 6.4 Primele trei moduri proprii de vibrație în *GenEcAm*

Se observă că primele trei forme proprii de vibrație determinate cu programul *GenEcAm* sunt cele clasice și cunoscute pentru o structură în cadre cu mișcare în planul *XOZ*, fapt care validează, din acest punct de vedere, corectitudinea modelului matematic-computațional propus și aplicat. Aceleași trei forme proprii de vibrație au fost determinate și cu programul *SAP2000* pentru structura 3D a clădirii P+10E restricționată să realizeze mișcări doar în planul *XOZ* la seism.

Rezultatele acestor analize au fost sintetizate în tab. 6.4 care prezintă comparativ perioadele proprii de vibrație pentru primele trei moduri proprii de vibrație. Programul *GenEcAm* calculează suplimentar și factorii de participare modală pentru fiecare mod propriu de vibrație în parte.

Tab. 6.4 Rezultatele analizei modale la structura P+10E

Perioada proprie	<i>SAP2000</i>	<i>GenEcAm</i>	Diferența	Factori de participare modală <i>GenEcAm</i>
T1	1.3452 s	1.3127 s	2.4 %	79 %
T2	0.4245 s	0.4435 s	4.2 %	9.8 %
T3	0.2315 s	0.2700 s	14.2 %	3.8 %

În finalul primei etape de comparație, se observă că diferențele între rezultatele obținute cu cele două programe sunt sub 5% pentru primele două moduri proprii de vibrație care au o pondere de aproximativ 90% în comportamentul structurii la seism, fapt care validează, din punctul de vedere al modurilor proprii de vibrație, corectitudinea procedurilor analitice și computaționale implementate în *GenEcAm*.

6.4 Compararea rezultatelor referitoare la deplasări, viteze, accelerații și forțe de amortizare

În următorul pas al procesului de validare am realizat comparația între rezultatele analizei dinamice liniare la seism, obținute cu cele două programe *GenEcAm* și *SAP2000* pentru cele două structuri considerate. Pentru o prezentare comparativă sintetică a acestora, am luat în considerare analiza diferențelor dintre cele două seturi de rezultate prin studiul următorilor parametrii statistici: media, $\overline{\Delta\varphi}$, abaterea standard (abaterea pătratică medie), σ , dispersia rezultatelor, $\overline{\sigma^2}$, precum și coeficientul de variație, *CV*. Aceste valori au fost calculate, astfel:

$$\overline{\Delta\varphi} = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} \Delta\varphi_i = \frac{n_p}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} \frac{\Delta\varphi_i}{n_p} = \frac{1}{n_A} \sum_{i=1}^{n_A} \overline{\Delta\varphi_i} \quad (6.2)$$

$$\overline{\sigma^2} = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} (\Delta\varphi_i - \overline{\Delta\varphi})^2 = \frac{n_p}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} \frac{(\Delta\varphi_i - \overline{\Delta\varphi})^2}{n_p} = \frac{1}{n_A} \sum_{i=1}^{n_A} \overline{\sigma_i^2} \quad (6.3)$$

$$\overline{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n_A} \sum_{i=1}^{n_A} \overline{\sigma_i^2}} \quad (6.4)$$

$$CV = \frac{\overline{\sigma}}{\overline{\Delta\varphi}} \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\Delta\varphi_{\max}}{\phi_{\max}} (\%) \quad (6.6)$$

unde: $\overline{\Delta\varphi}$ - valoarea medie a diferențelor;

$\Delta\varphi_i$ - diferențele între rezultatele obținute cu cele două programe;

$$\overline{\Delta\varphi_i} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \Delta\varphi_i - \text{valoarea medie a diferențelor per accelerogramă};$$

$$\overline{\sigma_i^2} = \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} (\Delta\varphi_i - \overline{\Delta\varphi})^2 - \text{dispersia diferențelor per accelerogramă};$$

σ - abaterea patratică medie a diferențelor per accelerogramă;

N_d – numărul total de diferențe; $N_d = n_p \cdot n_A$;

$n_p = 2048$ - numărul de puncte per accelerogramă;

n_A – numărul de accelerograme;

CV – coeficientul de variație (gradul de omogenitate);

ε_{\max} – eroarea exprimată ca raport între diferența maximă și valoarea maximă;

$\Delta\varphi_{\max}$ – diferența maximă între cele două seturi de valori comparate;

ϕ_{\max} – valoarea maximă dintre cele două seturi de valori comparate.

Parametrii statistici definiți cu relațiile (6.2) - (6.5) au fost calculați pentru fiecare din cazurile de analiză pe care le-am considerat reprezentative pentru studiul comparativ:

- cazul 1 – clădire P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâscos – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$;
- cazul 2 – clădire P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâscos – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$;
- cazul 3 – clădire P+10E neechipată antiseismic;
- cazul 4 – clădire P+5E echipată cu amortizori cu fluid vâscos – $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$ (Anexa A);
- cazul 5 – clădire P+5E echipată cu amortizori cu fluid vâscos – $c = 4000 \text{ kNs/m}^2$ (Anexa A);
- cazul 6 – clădire P+5E neechipată antiseismic (Anexa A).

Valorile coeficientului de amortizare c luate în calcul pentru variantele de amortizare de mai sus au fost determinate în funcție de o valoare maximală a forței de amortizare din amortizori, de 800 kN, respectiv 1000 kN, valori prezentate în literatura de specialitate ca reprezentând domeniul de variație al forțelor de amortizare la clădirile în cadre de beton armat [108]. Cazurile 1, 2 și 3 sunt prezentate în continuare, iar cazurile 4, 5 și 6 în Anexa A.

6.4.1 Cazul 1 – Clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâscos, $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$

Pentru primul caz de analiză am considerat structura în cadre de beton armat a clădirii P+10E echipată cu câte un amortizor cu fluid vâscos (cu $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$ și exponentul vitezei $\alpha_v = 1$) pe fiecare fațadă la fiecare nivel al clădirii.

Pentru o analiză comparativă detaliată a rezultatelor obținute cu cele două programe am folosit trei seturi a câte șapte accelerograme sintetice corespunzătoare valorilor de 0,7 s, 1,0 s și 1,6 s ale perioadei de colț T_c . Pentru fiecare accelerogramă am comparat rezultatele obținute cu cele două programe, și anume: deplasările, vitezele, accelerațiile și forțele axiale din amortizor.

Pentru $T_c = 0,7 \text{ s}$, rezultatele valorilor maxime ale deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative, obținute cu cele două programe sunt prezentate în tab. 6.5, în fig. 6.5 sunt evidențiate valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel pe toate cele 11 niveluri ale clădirii pentru trei din cele șapte accelerograme luate în calcul, iar în fig. 6.6 sunt prezentate două exemple de

variație în timp a deplasărilor relative de nivel pentru etajul 3 la care se atinge deplasarea relativă de nivel maximă.

Tab. 6.5 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$ ($T_c = 0,7 \text{ s}$)

Accelero- grama	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
01	10.8	10	7.4	0.050	0.05	0	2.54	2.48	2.3
02	10	9.6	4	0.046	0.044	4.3	2.50	2.34	6.4
03	10	9.5	5	0.050	0.049	2	3.09	2.95	4.5
04	9	8.73	3	0.047	0.049	4	2.76	2.63	4.7
17	9.3	9.05	2.6	0.054	0.057	5.2	2.95	2.79	5.4
18	8.5	8.3	2.3	0.050	0.048	4	2.64	2.47	6.4
22	9.8	9.5	3	0.050	0.052	3.8	2.54	2.71	6.2

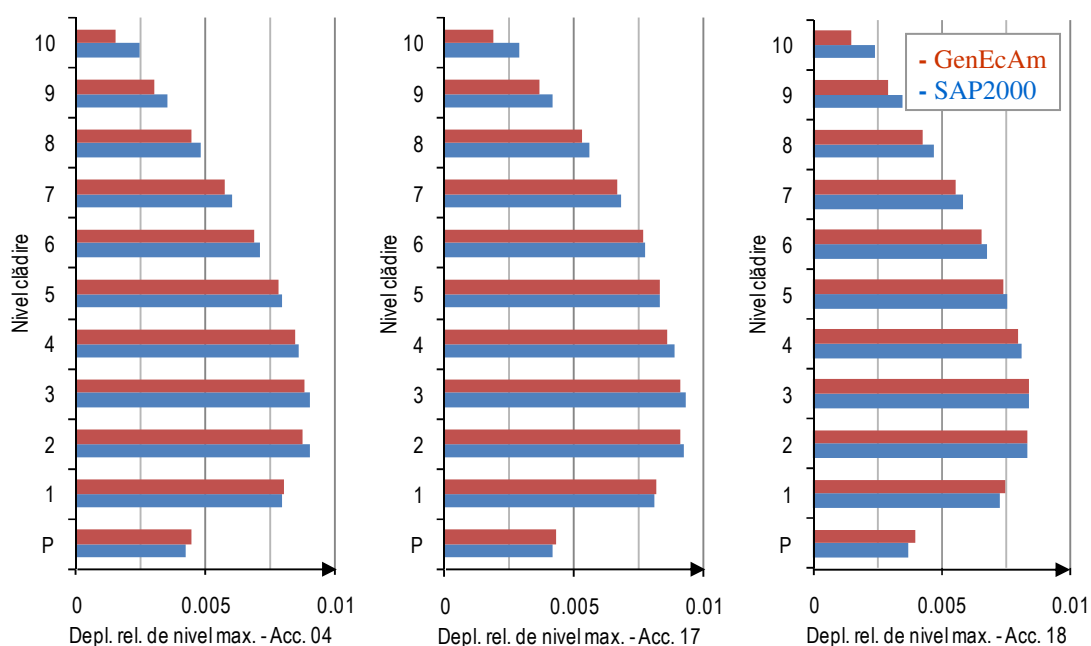


Fig. 6.5 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c = 0,7 \text{ s}$

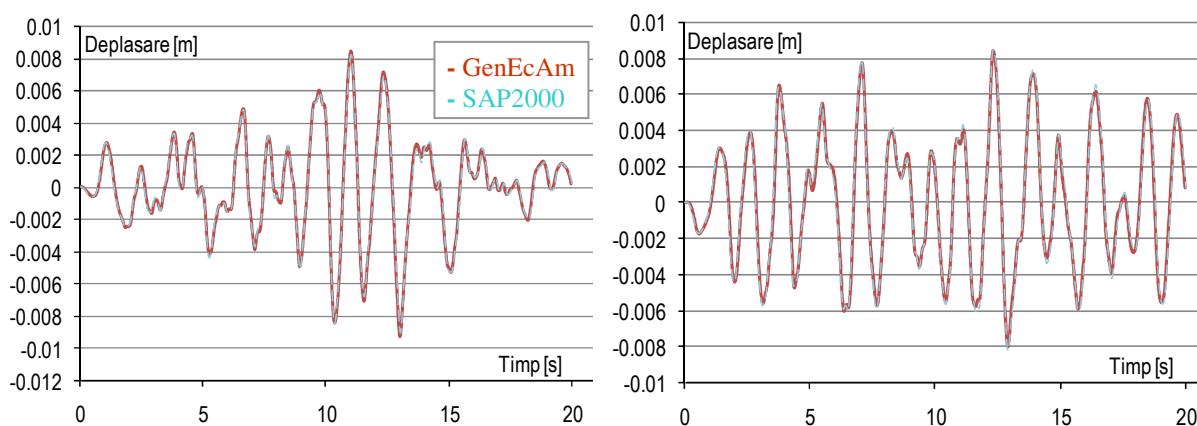


Fig. 6.6 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelero-gramele 17 și 18 ($T_c = 0.7 \text{ s}$)

În urma analizelor cazului 1 pentru $T_c = 0,7 \text{ s}$ realizate cu cele două programe, se poate observa că valorile obținute pentru deplasările și vitezele relative de nivel, dar și pentru accelerațiile relative, sunt foarte apropiate, diferențele fiind cuprinse între 0% și 7,4% pentru

valorile maxime, fapt evidențiat și în exemplele din figurile 6.5 și 6.6 care prezintă exemplificativ o mică parte din rezultatele obținute și comparate.

În tab. 6.6 am prezentat rezultatele prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de deplasări relative de nivel obținute pentru fiecare etaj în parte corespunzătoare setului de șapte accelerograme considerate pentru perioada de colț $T_c = 0,7s$.

Tab. 6.6 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm], P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$ ($T_c=0.7s$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [mm]	0.19	0.16	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.15	0.24	0.15
	Eroarea [%]	3.92	1.72	1.19	1.11	1.16	1.26	1.43	1.74	2.36	3.83	8.94	2.61
	Abaterea	0.16	0.13	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.14	0.22	0.12
	Dispersia	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.86
02	Media [mm]	0.18	0.15	0.13	0.12	0.11	0.11	0.12	0.13	0.13	0.15	0.23	0.14
	Eroarea [%]	4.11	1.80	1.35	1.17	1.15	1.26	1.55	1.98	2.64	4.12	9.21	2.76
	Abaterea	0.15	0.13	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.19	0.12
	Dispersia	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.81
03	Media [mm]	0.21	0.17	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.18	0.28	0.16
	Eroarea [%]	4.55	1.98	1.41	1.30	1.37	1.47	1.71	2.12	2.89	4.69	10.8	3.12
	Abaterea	0.16	0.15	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.14	0.21	0.13
	Dispersia	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
04	Media [mm]	0.21	0.18	0.15	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.17	0.27	0.16
	Eroarea [%]	4.93	2.33	1.62	1.37	1.34	1.46	1.75	2.19	2.97	4.82	11.2	3.27
	Abaterea	0.16	0.14	0.11	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.11	0.13	0.20	0.12
	Dispersia	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.79
17	Media [mm]	0.17	0.15	0.13	0.11	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.22	0.13
	Eroarea [%]	4.17	1.82	1.37	1.21	1.16	1.25	1.45	1.77	2.29	3.46	7.68	2.51
	Abaterea	0.15	0.14	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.21	0.12
	Dispersia	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.92
18	Media [mm]	0.22	0.19	0.15	0.14	0.14	0.13	0.13	0.14	0.16	0.19	0.31	0.17
	Eroarea [%]	6.02	2.66	1.83	1.64	1.67	1.73	1.96	2.40	3.32	5.52	12.7	3.77
	Abaterea	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.14	0.21	0.13
	Dispersia	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.76
22	Media [mm]	0.21	0.18	0.14	0.12	0.12	0.11	0.12	0.13	0.14	0.17	0.26	0.15
	Eroarea [%]	4.86	2.15	1.51	1.28	1.26	1.35	1.61	2.04	2.74	4.41	10.3	3.05
	Abaterea	0.16	0.14	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.14	0.21	0.13
	Dispersia	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.85

Media diferențelor pe set accelerograme $\overline{\Delta\varphi} = 0.15 \text{ mm}$

În urma prelucrării statistice a diferențelor a rezultat o diferență medie de 0,15 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe (fig. 6.7), valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic și computațional propus. Abaterea medie pătratică de 0,12 mm care s-a obținut în acest studiu arată că limitele între care variază diferențele sunt apropiate de valoarea medie, iar valorile dispersiei (0,02) și ale coeficientului de variație (aproximativ 0,85) arată faptul că distribuția diferențelor este omogenă.

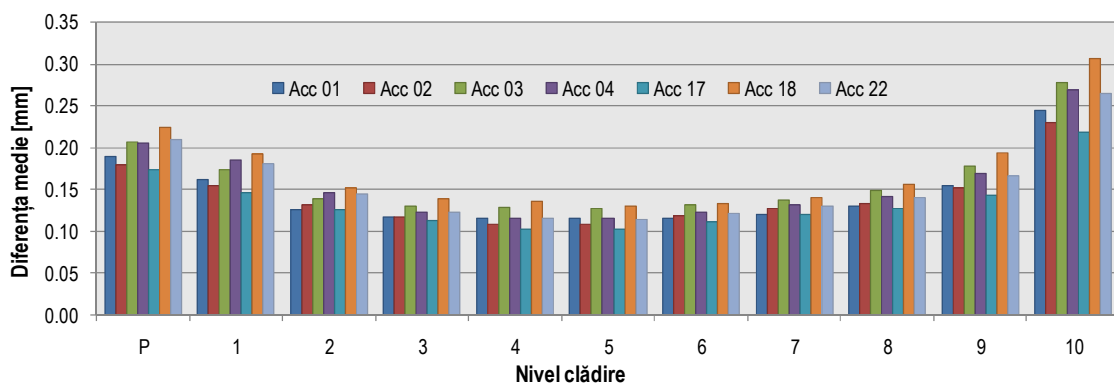


Fig. 6.7 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c = 0,7 \text{ s}$

În tab. 6.7 sunt prezentate rezultatele valorilor maxime ale deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative, obținute cu cele două programe, pentru $T_c = 1 \text{ s}$.

Tab. 6.7 – Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$ ($T_c = 1 \text{ s}$)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Accelerații relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
01	13.5	13.14	2.6	0.063	0.062	1.5	2.95	2.80	5
02	13	13.37	2.7	0.065	0.064	1.5	2.86	2.70	5.5
03	13.5	13.14	2.6	0.071	0.071	0	2.61	2.51	3.8
04	14	13.38	4.4	0.070	0.069	1.4	2.84	2.68	5.6
06	15	14.7	2	0.058	0.06	3.3	2.88	2.71	5.9
07	13	12.32	5.2	0.056	0.056	0	3.06	2.91	4.9
11	13	12.95	0.3	0.063	0.065	3	2.79	2.96	5.7

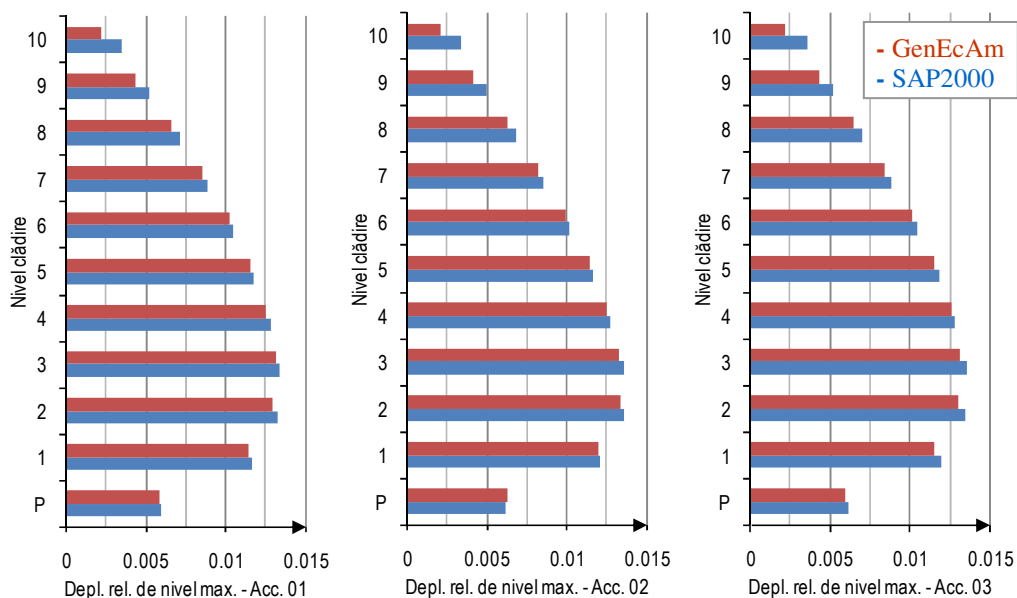


Fig. 6.8 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c = 1 \text{ s}$

În fig. 6.8 sunt evidențiate valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel pe toate cele 11 niveluri ale clădirii pentru trei din cele șapte accelerograme luate în calcul (pentru $T_c = 1 \text{ s}$), iar în fig. 6.9 sunt prezentate două exemple de variație în timp a deplasărilor relative de nivel pentru etajul 3 la care se atinge deplasarea relativă de nivel maximă.

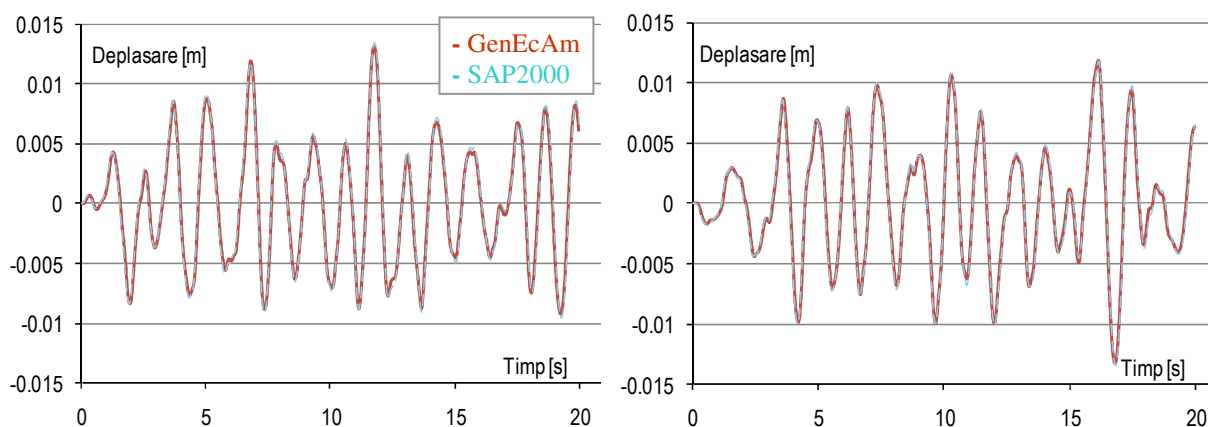


Fig. 6.9 Variația în timp a deplasării relative de nivel [m] la et. 3 al clădirii P+10E
 – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelerogramele 01 și 02 ($T_c = 1 \text{ s}$)

Diferența dintre datele obținute cu programele *SAP2000* și *GenEcAm* la analiza dinamică time-history cu accelerograme pentru $T_c = 1 \text{ s}$ pentru clădirea P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, este de:

- maxim 5.2% pentru deplasările relative de nivel maxime;
- maxim 3.3% pentru vitezele relative de nivel maxime;
- maxim 5.9% pentru accelerațiile relative maxime.

Diferențele sunt foarte mici, fapt evidențiat și în exemplele din figurile 6.8 și 6.9, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate.

Studiind variația în timp a deplasărilor relative de nivel (fig. 6.9) se observă că cele două curbe obținute cu cele două programe, practic se suprapun pe toată durata seismului, fapt care arată corectitudinea modelului analitic-computațional implementat în *GenEcAm* pentru acest caz de analiză.

Pentru o analiză mai detaliată a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe (*SAP2000* și *GenEcAm*) în cazul 1 de analiză (fig. 6.10), pentru $T_c = 1 \text{ s}$, în tab. 6.8 am prezentat rezultatele prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de deplasări relative de nivel obținute pentru fiecare etaj în parte.

Tab. 6.8 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] (P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1\text{s}$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [mm]	0.30	0.25	0.20	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.22	0.27	0.43	0.23
	Eroarea [%]	4.89	2.13	1.47	1.37	1.43	1.51	1.75	2.17	3.07	5.16	12.0	3.36
	Abaterea	0.21	0.18	0.15	0.13	0.13	0.12	0.12	0.13	0.14	0.18	0.29	0.16
	Dispersia	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.08	0.03
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7
02	Media [mm]	0.29	0.24	0.19	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.21	0.26	0.41	0.23
	Eroarea [%]	4.56	1.94	1.39	1.34	1.42	1.52	1.75	2.15	3.06	5.21	12.1	3.31
	Abaterea	0.21	0.18	0.15	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	0.19	0.30	0.17
	Dispersia	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.09	0.03
	Coef. var.	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.72
03	Media [mm]	0.23	0.19	0.15	0.14	0.13	0.13	0.14	0.14	0.16	0.20	0.32	0.18
	Eroarea [%]	3.77	1.61	1.12	1.01	1.04	1.12	1.30	1.64	2.29	3.83	9.13	2.53
	Abaterea	0.19	0.16	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.18	0.29	0.15
	Dispersia	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.08	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.87

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
04	Media [mm]	0.27	0.22	0.18	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.19	0.24	0.39	0.21
	Eroarea [%]	4.17	1.73	1.26	1.22	1.32	1.41	1.0	1.97	2.79	4.74	11.3	3.05
	Abateră	0.19	0.18	0.15	0.14	0.13	0.12	0.13	0.13	0.15	0.19	0.30	0.16
	Dispersia	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.09	0.03
	Coef. var.	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
06	Media [mm]	0.26	0.22	0.16	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.17	0.22	0.36	0.19
	Eroarea [%]	3.74	1.62	1.04	0.88	0.93	1.03	1.22	1.55	2.21	3.91	9.53	2.51
	Abateră	0.20	0.16	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.17	0.26	0.15
	Dispersia	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.07	0.03
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.84
07	Media [mm]	0.27	0.22	0.19	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.21	0.26	0.41	0.22
	Eroarea [%]	4.54	1.90	1.47	1.46	1.58	1.71	1.96	2.41	3.44	5.85	13.6	3.63
	Abateră	0.18	0.16	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.16	0.19	0.30	0.17
	Dispersia	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.09	0.03
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.77
11	Media [mm]	0.24	0.20	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.17	0.18	0.22	0.35	0.2
	Eroarea [%]	3.81	1.66	1.29	1.23	1.30	1.39	1.56	1.87	2.55	4.24	9.86	2.8
	Abateră	0.19	0.16	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.16	0.20	0.30	0.17
	Dispersia	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.09	0.03
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.86

Media diferențelor pe set accelerograme $\overline{\Delta\varphi} = 0.20 \text{ mm}$

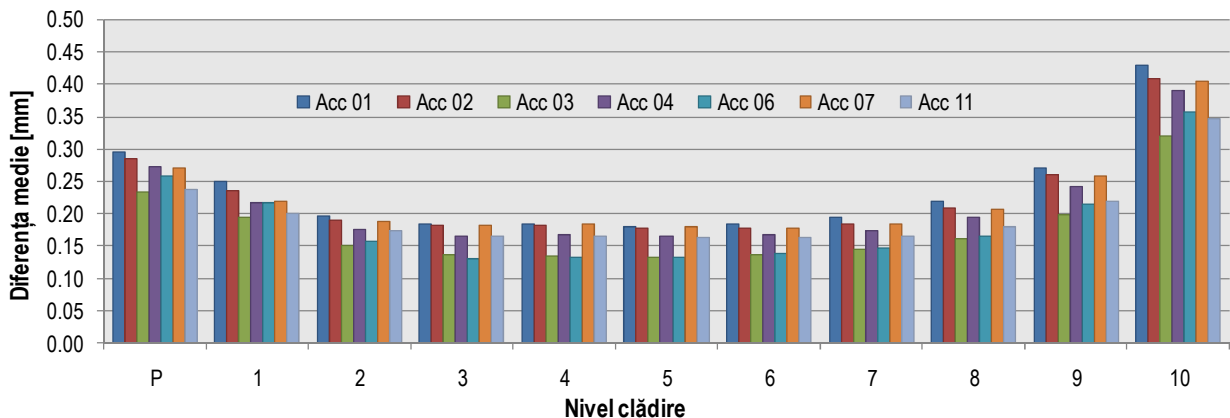


Fig. 6.10 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c = 1 \text{ s}$

În urma prelucrării statistice a diferențelor a rezultat o diferență medie de 0,20 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic și computațional propus în cadrul acestui studiu.

Abateră medie pătratică caracterizează gradul de reprezentativitate a valorii medii, iar valorile de $0,15 \div 0,17 \text{ mm}$ care s-au obținut în acest studiu arată că limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de $0,02 \div 0,03$ și ale coeficientului de variație $0,7 \div 0,87$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă într-un interval de variație mic.

Toate aceste rezultate ale prelucrării statistice validează modelul analitic-computațional implementat în programul *GenEcAm* și pentru cazul $T_c = 1 \text{ s}$.

În tab. 6.9 sunt prezentate rezultatele valorilor maxime ale deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative, obținute cu cele două programe, pentru cazul 1 de analiză și $T_c = 1,6 \text{ s}$.

Tab. 6.9 – Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$ ($T_c = 1,6 \text{ s}$)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
01	22	21.38	2.8	0.092	0.093	1	3.90	3.73	4.3
02	18	18.57	3	0.086	0.085	1.1	3.44	3.24	5.8
03	18	17.5	2.7	0.078	0.077	1.2	3.13	3.03	3.1
04	18	18.07	0.3	0.084	0.081	3.5	3.44	3.23	6.1
05	19	18.37	3.3	0.088	0.084	4.5	3.79	3.77	0.5
07	17.5	16.91	3.3	0.080	0.080	0	3.59	3.45	3.8
11	17.5	17.14	2	0.090	0.089	1.1	3.35	3.17	5.3

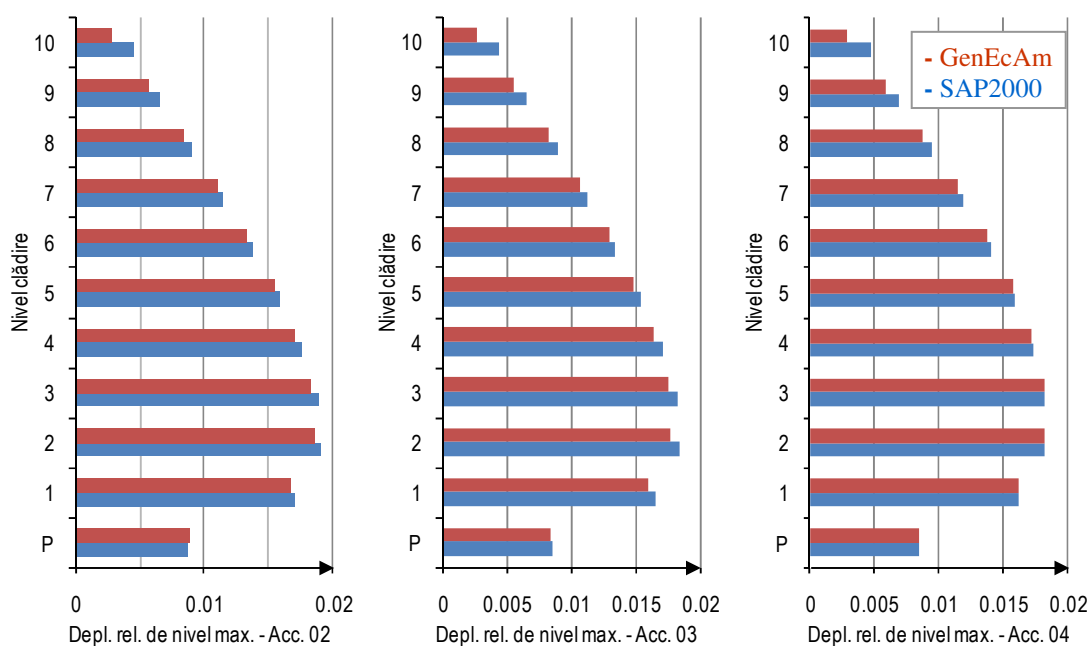


Fig. 6.11 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c = 1,6 \text{ s}$

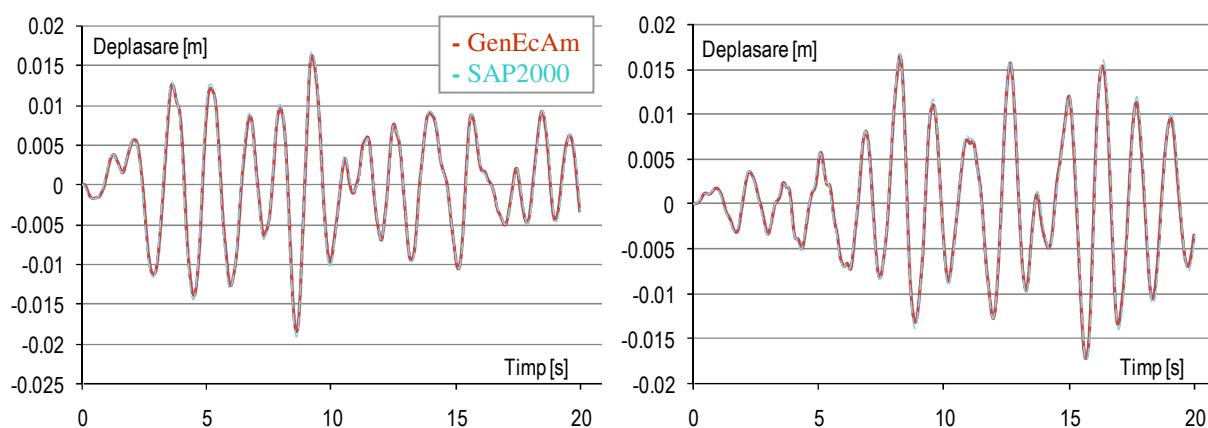


Fig. 6.12 Variația în timp a deplasării relative de nivel [m] la et. 3 al clădirii P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelerogramele 05 și 11 ($T_c = 1,6 \text{ s}$)

În acest caz, pentru $T_c = 1,6 \text{ s}$, se observă o creștere a valorilor maxime ale deplasărilor relative de nivel datorată apropierii perioadei proprii de vibrație T_1 a structurii de valoarea perioadei de colț a accelerogramelor folosite. Diferența dintre datele obținute cu cele două programe este de maxim 3,3% pentru deplasările relative de nivel maxime, maxim 4,5% pentru

vitezele relative de nivel maxime și de maxim 6,1% pentru accelerațiile relative maxime. Diferențele sunt relativ mici, fapt evidențiat și în exemplele din figurile 6.11 și 6.12, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate pentru acest caz de analiză.

În tabelele 6.10, 6.11 și 6.12 sunt prezentate valorile parametrilor statistici rezultați în urma prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de rezultate obținute pentru deplasările și vitezele relative de nivel precum și pentru accelerațiile relative la fiecare etaj.

Tab. 6.10 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] ($P+10E - c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1,6 \text{ s}$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [mm]	0.37	0.31	0.25	0.23	0.23	0.22	0.23	0.24	0.28	0.35	0.56	0.3
	Eroarea [%]	3.73	1.60	1.17	1.08	1.12	1.18	1.37	1.71	2.52	4.39	10.3	2.74
	Abaterea	0.24	0.21	0.17	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.19	0.24	0.38	0.21
	Dispersia	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.15	0.05
	Coef. var.	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.73
02	Media [mm]	0.30	0.25	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.21	0.24	0.30	0.48	0.26
	Eroarea [%]	3.45	1.47	1.12	1.10	1.19	1.28	1.49	1.85	2.66	4.55	10.6	2.8
	Abaterea	0.25	0.22	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16	0.17	0.19	0.24	0.39	0.21
	Dispersia	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.15	0.05
	Coef. var.	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.81
03	Media [mm]	0.26	0.22	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.21	0.27	0.43	0.22
	Eroarea [%]	3.05	1.32	0.94	0.96	1.07	1.16	1.34	1.66	2.38	4.08	9.63	2.51
	Abaterea	0.23	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.19	0.24	0.39	0.21
	Dispersia	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.15	0.05
	Coef. var.	0.9	0.8	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.94
04	Media [mm]	0.34	0.26	0.23	0.25	0.27	0.27	0.26	0.26	0.29	0.36	0.57	0.31
	Eroarea [%]	4.04	1.63	1.29	1.39	1.56	1.69	1.86	2.17	3.05	5.22	12.3	3.29
	Abaterea	0.25	0.21	0.20	0.19	0.18	0.17	0.17	0.17	0.20	0.26	0.43	0.22
	Dispersia	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.18	0.05
	Coef. var.	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
05	Media [mm]	0.31	0.24	0.21	0.23	0.24	0.23	0.22	0.22	0.25	0.33	0.53	0.27
	Eroarea [%]	3.62	1.46	1.12	1.19	1.30	1.36	1.48	1.74	2.52	4.47	10.5	2.8
	Abaterea	0.23	0.18	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.21	0.25	0.39	0.22
	Dispersia	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.06	0.16	0.05
	Coef. var.	0.7	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.81
07	Media [mm]	0.30	0.24	0.22	0.23	0.23	0.22	0.23	0.23	0.26	0.31	0.49	0.27
	Eroarea [%]	3.66	1.54	1.27	1.29	1.40	1.49	1.71	2.09	2.93	4.91	11.4	3.06
	Abaterea	0.23	0.19	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18	0.20	0.26	0.41	0.21
	Dispersia	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.17	0.05
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
11	Media [mm]	0.32	0.26	0.24	0.25	0.26	0.25	0.25	0.25	0.29	0.35	0.55	0.3
	Eroarea [%]	3.97	1.64	1.37	1.44	1.60	1.70	1.90	2.30	3.29	5.55	12.7	3.41
	Abaterea	0.25	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.20	0.22	0.27	0.42	0.23
	Dispersia	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.07	0.18	0.06
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta\varphi = 0.27 \text{ mm}$, Eroarea = 2.94%

În urma prelucrării statistice a diferențelor pentru deplasările relative de nivel (fig. 6.13), a rezultat o diferență medie de 0,27 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază și pentru cazul $T_c = 1,6 \text{ s}$, corectitudinea modelului analitic-computațional propus.

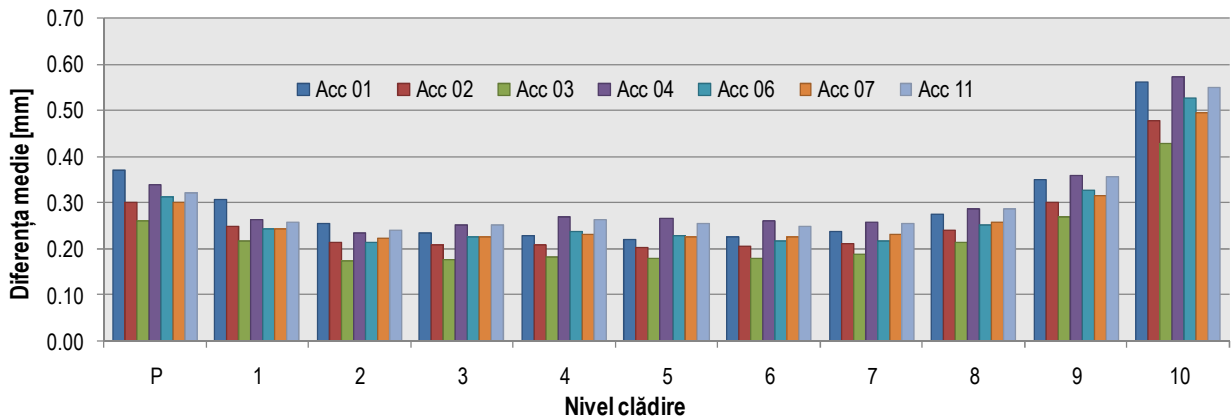


Fig. 6.13 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c=1.6 \text{ s}$

Abaterea medie pătratică pentru acest caz de analiză ia valori între $0,21 \div 0,23 \text{ mm}$ care arată reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de $0,05 \div 0,06$ și ale coeficientului de variație $0,7 \div 0,94$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic.

În tab. 6.11 sunt prezentate rezultatele prelucrării statistice a diferențelor între vitezele relative de nivel obținute cu cele două programe (fig. 6.14), pentru toate cele șapte accelerograme sintetice corespunzătoare perioadei de colț $T_c=1,6 \text{ s}$.

Tab. 6.11 Prelucrarea statistică a vitezelor relative de nivel [mm/s] (P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1,6 \text{ s}$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [mm/s]	2.14	2.05	1.98	1.90	1.78	1.70	1.76	1.86	1.90	2.03	2.81	1.99
	Eroarea [%]	5.02	2.53	2.14	2.05	2.04	2.14	2.51	3.12	3.95	5.69	11.6	3.89
	Abaterea	1.56	1.65	1.61	1.53	1.44	1.37	1.43	1.49	1.51	1.50	1.98	1.55
	Dispersia	2.42	2.73	2.58	2.34	2.06	1.88	2.04	2.23	2.27	2.24	3.91	2.43
	Coef. var.	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7
02	Media [mm/s]	1.90	1.90	1.82	1.76	1.65	1.58	1.66	1.74	1.76	1.81	2.42	1.82
	Eroarea [%]	4.86	2.51	2.11	2.02	2.01	2.11	2.52	3.14	4.00	5.56	10.9	3.79
	Abaterea	1.56	1.60	1.54	1.47	1.35	1.28	1.29	1.35	1.37	1.42	1.98	1.47
	Dispersia	2.42	2.55	2.38	2.16	1.83	1.63	1.67	1.82	1.87	2.01	3.93	2.21
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
03	Media [mm/s]	1.69	1.83	1.80	1.65	1.49	1.43	1.54	1.64	1.64	1.63	2.10	1.68
	Eroarea [%]	4.72	2.68	2.32	2.11	1.97	2.04	2.44	3.06	3.82	5.16	9.76	3.64
	Abaterea	1.58	1.64	1.58	1.52	1.41	1.33	1.37	1.42	1.44	1.46	1.96	1.52
	Dispersia	2.49	2.70	2.51	2.31	2.00	1.78	1.87	2.02	2.07	2.14	3.83	2.34
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.91
04	Media [mm/s]	1.88	1.88	1.90	1.89	1.80	1.70	1.69	1.73	1.79	1.94	2.78	1.91
	Eroarea [%]	4.66	2.47	2.26	2.23	2.16	2.16	2.37	2.84	3.64	5.38	11.4	3.78
	Abaterea	1.60	1.58	1.53	1.49	1.44	1.42	1.46	1.49	1.47	1.50	2.06	1.55
	Dispersia	2.55	2.50	2.34	2.21	2.08	2.02	2.14	2.22	2.17	2.24	4.22	2.43
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.81
05	Media [mm/s]	1.99	2.00	1.95	1.93	1.83	1.72	1.72	1.74	1.77	1.84	2.52	1.91
	Eroarea [%]	4.60	2.46	2.20	2.28	2.35	2.35	2.57	2.99	3.71	5.14	10.3	3.72
	Abaterea	1.54	1.70	1.72	1.64	1.47	1.34	1.34	1.40	1.42	1.48	1.98	1.55
	Dispersia	2.37	2.88	2.94	2.69	2.17	1.79	1.78	1.95	2.01	2.18	3.91	2.42
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.82

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
07	Media [mm/s]	2.01	2.16	2.14	1.98	1.79	1.74	1.86	1.96	1.96	1.95	2.49	2
	Eroarea [%]	5.49	3.13	2.76	2.47	2.29	2.34	2.73	3.31	4.01	5.35	10.0	3.99
	Abaterea	1.61	1.75	1.70	1.63	1.51	1.41	1.45	1.53	1.54	1.53	2.02	1.61
	Dispersia	2.59	3.06	2.88	2.66	2.27	1.99	2.11	2.36	2.37	2.33	4.10	2.61
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
11	Media [mm/s]	1.94	2.04	2.06	2.01	1.92	1.84	1.87	1.92	1.92	1.98	2.65	2.01
	Eroarea [%]	5.05	2.69	2.34	2.23	2.19	2.23	2.49	2.93	3.63	5.02	9.67	3.68
	Abaterea	1.62	1.63	1.68	1.66	1.55	1.44	1.46	1.53	1.57	1.60	2.14	1.63
	Dispersia	2.61	2.67	2.83	2.76	2.40	2.07	2.12	2.33	2.47	2.57	4.59	2.67
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta\varphi = 1.90 \text{ mm/s}$

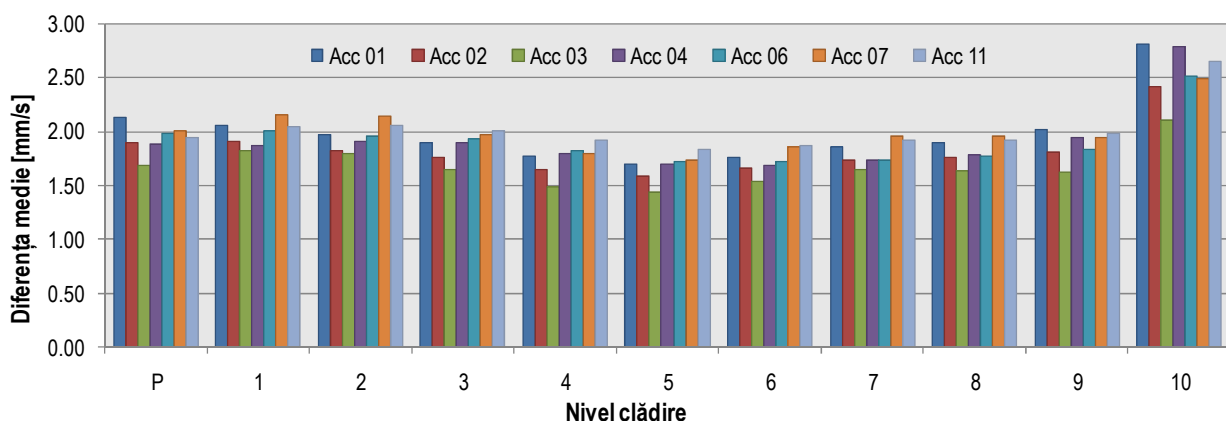


Fig. 6.14 Valoarea diferențelor medii între vitezele relative de nivel [mm/s] obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c=1,6 \text{ s}$

La analiza diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe pentru vitezele relative de nivel la fiecare etaj al clădirii studiate, în urma prelucrării statistice a rezultat o diferență medie de 1,90 mm/s între cele două seturi de date, valoare care validează corectitudinea modelului analitic și computațional propus în cadrul acestui studiu.

Valorile abaterii medii pătratice pentru acest caz de analiză sunt între 1,47÷1,63 mm/s evidențiind reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de 2,21÷2,67 și ale coeficientului de variație 0,77÷0,91, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic, ca și în cazul deplasărilor.

Am realizat prelucrări statistice și pentru compararea rezultatelor în cazul accelerațiilor relative la fiecare nivel al clădirii studiate (fig. 6.15), rezultatele fiind prezentate în tab. 6.12.

Tab. 6.12 Prelucrarea statistică a accelerațiilor relative [m/s^2] (P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1,6\text{s}$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [m/s^2]	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.06
	Eroarea [%]	12.3	6.88	4.69	3.39	2.67	2.12	1.65	1.39	1.44	1.65	1.95	3.65
	Abaterea	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002
	Coef. var.	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.81

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
02	Media [m/s^2]	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.07	0.05
	Eroarea [%]	12.9	6.83	4.33	3.11	2.57	2.19	1.76	1.48	1.52	1.73	1.97	3.67
	Abaterea	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.003	0.002
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.83
03	Media [m/s^2]	0.03	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05
	Eroarea [%]	10.2	5.73	4.21	3.27	2.71	2.21	1.76	1.44	1.45	1.69	2.00	3.33
	Abaterea	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.003	0.002
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.88
04	Media [m/s^2]	0.03	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.05
	Eroarea [%]	10.4	5.57	3.87	2.99	2.54	2.25	1.80	1.54	1.57	1.76	2.05	3.3
	Abaterea	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.04
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002
	Coef. var.	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.82
05	Media [m/s^2]	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.07	0.06
	Eroarea [%]	11.4	5.83	3.76	2.67	2.18	1.86	1.56	1.32	1.28	1.44	1.69	3.18
	Abaterea	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05
	Dispersia	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.88
07	Media [m/s^2]	0.04	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.06
	Eroarea [%]	11.3	6.20	4.24	3.21	2.63	2.21	1.81	1.56	1.56	1.79	2.07	3.51
	Abaterea	0.03	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05
	Dispersia	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
11	Media [m/s^2]	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08	0.06
	Eroarea [%]	12.5	6.80	4.69	3.51	2.89	2.40	1.96	1.68	1.67	1.90	2.23	3.84
	Abaterea	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05
	Dispersia	0.001	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002
	Coef. var.	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.81

Media diferențelor pe set accelerograme $\overline{\Delta\varphi} = 0.05 m/s^2$

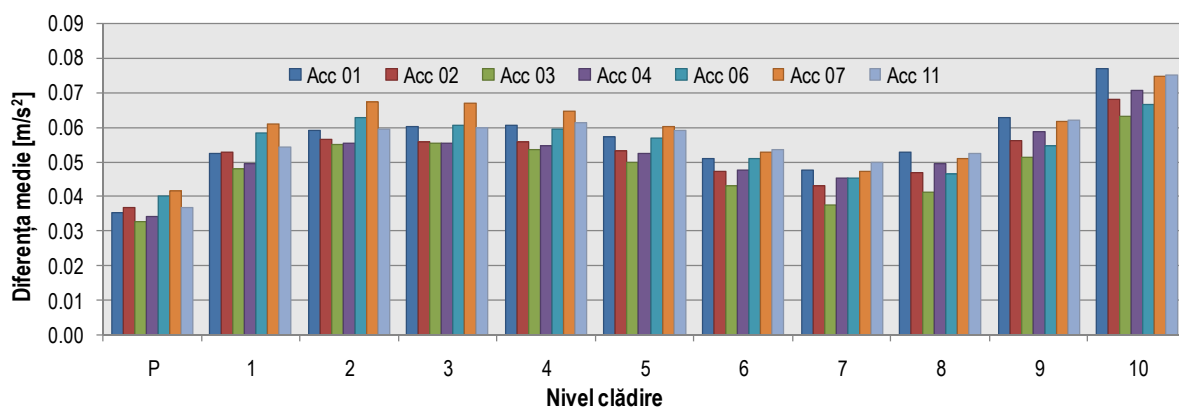


Fig. 6.15 Valoarea diferențelor medii între accelerațiile relative [m/s^2] obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+10E – $c = 10000 \text{ kN}/m^2$, pentru $T_c=1.6 \text{ s}$

La analiza diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe pentru accelerațiile relative la fiecare etaj al clădirii studiate, în urma prelucrării statistice a rezultat o diferență medie de $0,05 m/s^2$ între cele două seturi de date, valoare care validează corectitudinea modelului analitic și computațional propus în cadrul acestui studiu.

Valorile abaterii medii pătratice pentru acest caz de analiză sunt între $0,04 \div 0,05 \text{ m/s}^2$ evidențiind reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de 0,002 și ale coeficientului de variație $0,8 \div 0,88$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic, ca și în cazul deplasărilor și vitezelor relative de nivel.

Pentru un studiu comparativ complet al rezultatelor obținute cu cele două programe s-au analizat și diferențele între valorile forțelor axiale din amortizorii cu fluid vâcos folosiți la fiecare nivel al clădirii studiate, care sunt sintetizate în tab. 6.13.

Tab. 6.13 Forțele axiale maxime din amortizorii montați pe structura clădirii P+10E – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$

Forța axială maximă din amortizorii cu fluid vâcos											
$T_c = 0,7 \text{ s}$				$T_c = 1 \text{ s}$				$T_c = 1,6 \text{ s}$			
Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]
01	443	438	1.1	01	558	546	2.1	01	806	792	1.7
02	407	394	3.1	02	569	563	1	02	755	749	0.7
03	439	432	1.5	03	622	632	1.5	03	680	679	0.1
04	418	431	3	04	551	529	3.9	04	737	732	0.6
17	443	458	3.2	06	512	529	3.2	05	773	746	3.4
18	442	430	2.7	07	495	494	0.2	07	695	702	0.9
22	445	460	3.2	11	555	578	3.9	11	786	789	0.3

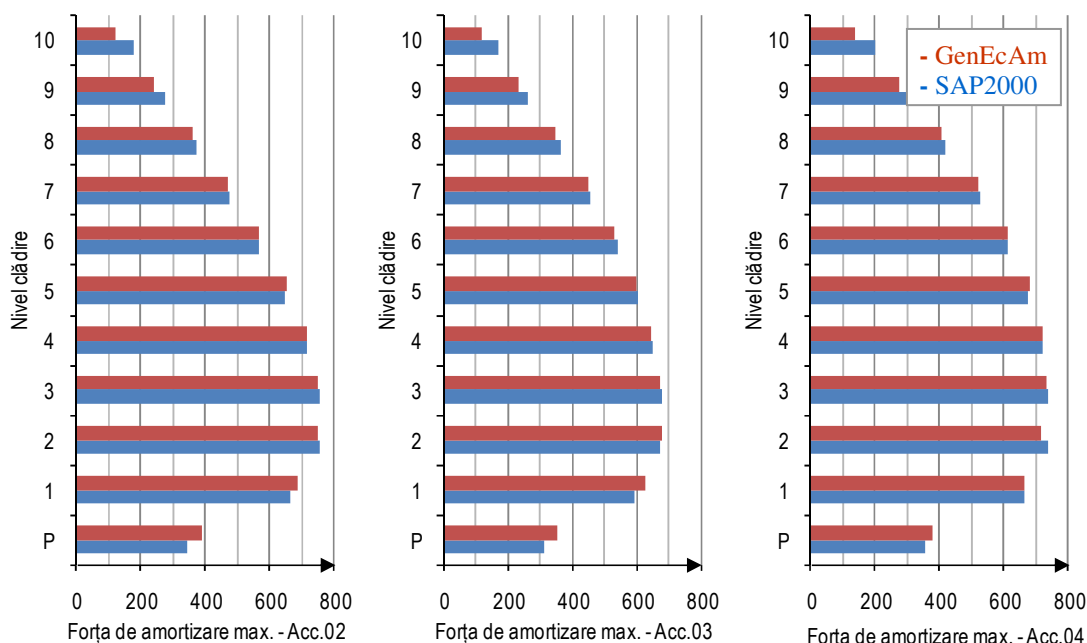


Fig. 6.16 Forțe axiale maxime din amortizorii cu fluid vâcos pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($c = 10000 \text{ kNs/m}^2$) pentru accelerogramele 02, 03, 04 ($T_c = 1,6 \text{ s}$)

În fig. 6.16 sunt evidențiate valorile maxime ale forțelor axiale din amortizori pe toate cele 11 niveluri ale clădirii pentru trei din cele șapte accelerograme luate în calcul, iar în fig. 6.17 sunt prezentate două exemple de variație în timp a acestor forțe pentru etajul 3 la care se atinge valoarea lor maximă. Se observă că pentru toate nivelurile clădirii valorile maxime ale forțelor axiale din amortizori obținute cu cele două programe sunt foarte apropiate, la etajele 2 și 3, diferența fiind minimă.

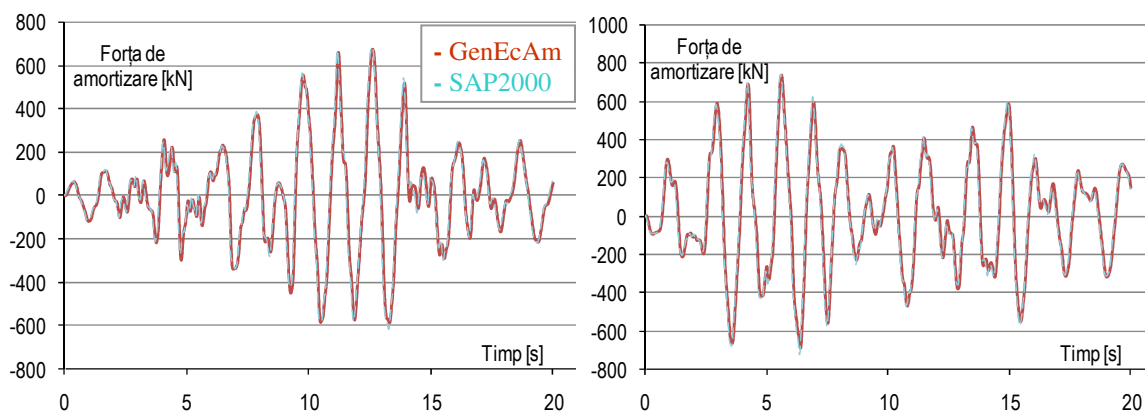


Fig. 6.17 Variația în timp a forței axiale din amortizori la et. 3 al clădirii P+10E
 – $c = 10000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelerogramele 03 și 04 ($T_c = 1.6 \text{ s}$)

Din fig. 6.17, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate pentru acest caz de analiză, se observă că și forțele axiale din amortizori sunt foarte apropiate, fapt care validează și din acest punct de vedere corectitudinea modelului analitic-computațional implementat în aplicația software *GenEcAm*.

6.4.2 Cazul 2 – Clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâcos, $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$

Acest caz de analiză a fost luat în calcul pe baza considerentului că forțele axiale maxime din amortizori sunt, pentru clădirea studiată, în jur de 1000 kN [108]. Pe baza acestei valori maxime a forței s-a determinat valoarea coeficientului de amortizare $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$ pentru amortizorii cu fluid vâcos folosiți, cunoscându-se valoarea maximă a vitezei relative de nivel.

Tab. 6.14 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$ ($T_c = 0,7 \text{ s}$)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
01	8.9	8.65	2.8	0.041	0.040	2.4	2.35	2.28	2.9
02	8	7.75	3.1	0.040	0.039	2.5	2.13	2.00	6.1
03	8.1	8.05	0.6	0.040	0.039	2.5	2.62	2.49	4.9
04	8	7.83	2.1	0.041	0.042	2.3	2.53	2.40	5.1
17	7.1	7.05	0.7	0.049	0.051	3.9	2.54	2.42	4.7
18	7.8	7.73	0.8	0.040	0.040	0	2.34	2.23	4.7
22	8	7.86	1.7	0.044	0.044	0	2.65	2.65	0

Rezultatele obținute cu cele două programe au fost comparate și prelucrate statistic după care au fost sintetizate în tabele. Datorită volumului mare de date comparate, reprezentarea grafică a acestora este prezentată doar exemplificativ și anume doar pentru câteva accelerograme (fig. 6.19). În urma analizelor cazului 2 pentru $T_c = 0,7 \text{ s}$ realizate cu cele două programe, se poate concluziona că rezultatele sunt foarte apropiate, diferențele fiind foarte mici:

- maxim 3,1% pentru valoarea maximă a deplasărilor relative de nivel;
- maxim 3,9% pentru valoarea maximă a vitezelor relative de nivel;
- maxim 6,1% pentru valoarea maximă a accelerațiilor relative.

Similitudinea rezultatelor obținute cu cele două programe este evidențiată și în exemplele din figurile 6.18 și 6.19 care prezintă o mică parte din rezultatele obținute și comparate.

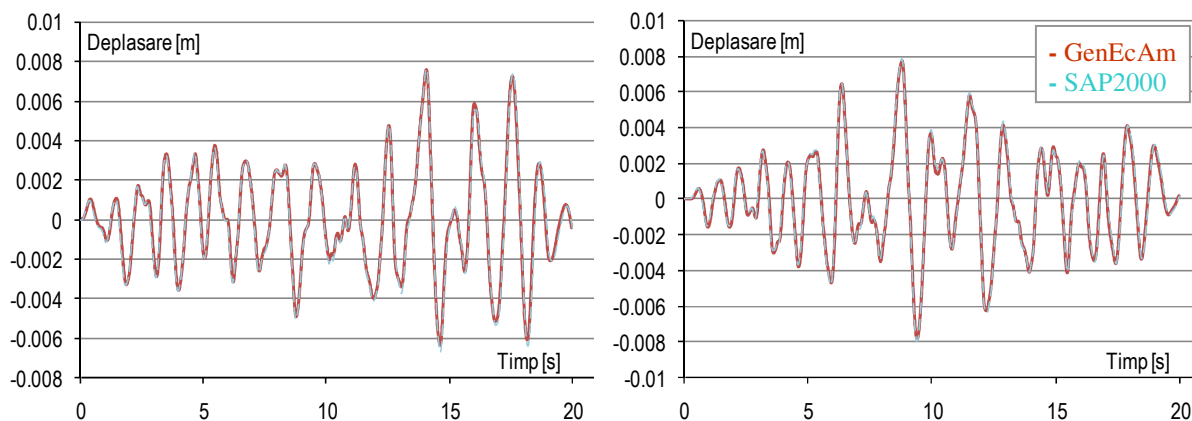


Fig. 6.18 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E (acc. 04 și 22, $T_c = 0,7$ s)

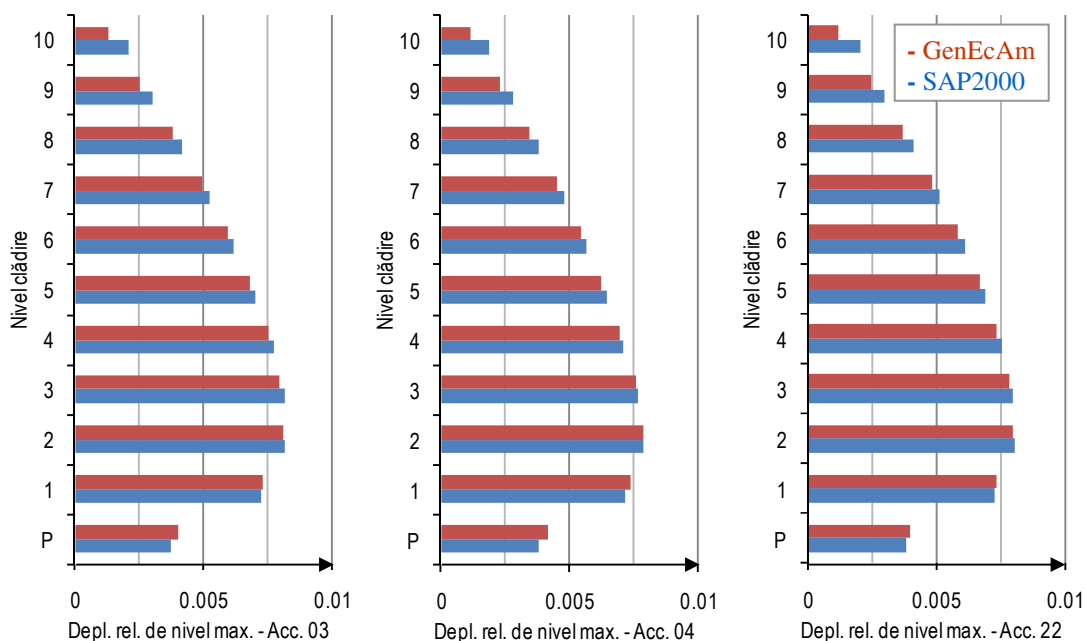


Fig. 6.19 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 17000$ kNs/m² ($T_c=0,7$ s)

Pentru o analiză mai detaliată a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe, în tab. 6.15 se prezintă rezultatele prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de rezultate (deplasări relative de nivel – fig. 6.20) obținute pentru fiecare etaj în parte, corespunzătoare celor șapte accelerograme specifice perioadei de colț $T_c = 0,7$ s.

Tab. 6.15 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] (P+10E – $c = 17000$ kNs/m², $T_c=0,7$ s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [mm]	0.24	0.16	0.10	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.14	0.21	0.13
	Eroarea [%]	5.86	2.06	1.13	1.07	1.24	1.40	1.60	1.89	2.51	4.07	9.39	2.93
	Abaterea	0.20	0.13	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.12	0.18	0.11
	Dispersia	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.85
02	Media [mm]	0.22	0.15	0.10	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.19	0.12
	Eroarea [%]	6.12	2.11	1.26	1.16	1.24	1.38	1.60	1.94	2.59	4.19	9.41	3
	Abaterea	0.18	0.13	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10	0.16	0.1
	Dispersia	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
	Coef. var.	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.81

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
03	Media [mm]	0.25	0.17	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.15	0.23	0.14
	Eroarea [%]	6.80	2.34	1.27	1.22	1.41	1.60	1.85	2.22	2.98	4.84	11.0	3.41
	Abateră	0.19	0.14	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.11	0.17	0.11
	Dispersia	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
04	Media [mm]	0.25	0.18	0.11	0.10	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.14	0.21	0.14
	Eroarea [%]	6.64	2.46	1.42	1.27	1.41	1.61	1.88	2.28	3.06	5.00	11.3	3.48
	Abateră	0.20	0.14	0.08	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.17	0.11
	Dispersia	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.79
17	Media [mm]	0.21	0.14	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.12	0.18	0.12
	Eroarea [%]	6.63	2.32	1.37	1.22	1.27	1.39	1.56	1.83	2.34	3.72	8.41	2.91
	Abateră	0.18	0.13	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.11	0.17	0.11
	Dispersia	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
18	Media [mm]	0.27	0.19	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.16	0.25	0.15
	Eroarea [%]	8.92	3.19	1.69	1.59	1.81	1.98	2.23	2.66	3.66	6.10	13.9	4.34
	Abateră	0.19	0.13	0.09	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11	0.17	0.11
	Dispersia	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.75
22	Media [mm]	0.26	0.18	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.22	0.14
	Eroarea [%]	6.77	2.47	1.39	1.21	1.35	1.53	1.79	2.16	2.90	4.71	10.8	3.37
	Abateră	0.19	0.14	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.17	0.11
	Dispersia	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
	Coef. var.	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta\phi = 0.13 \text{ mm}$

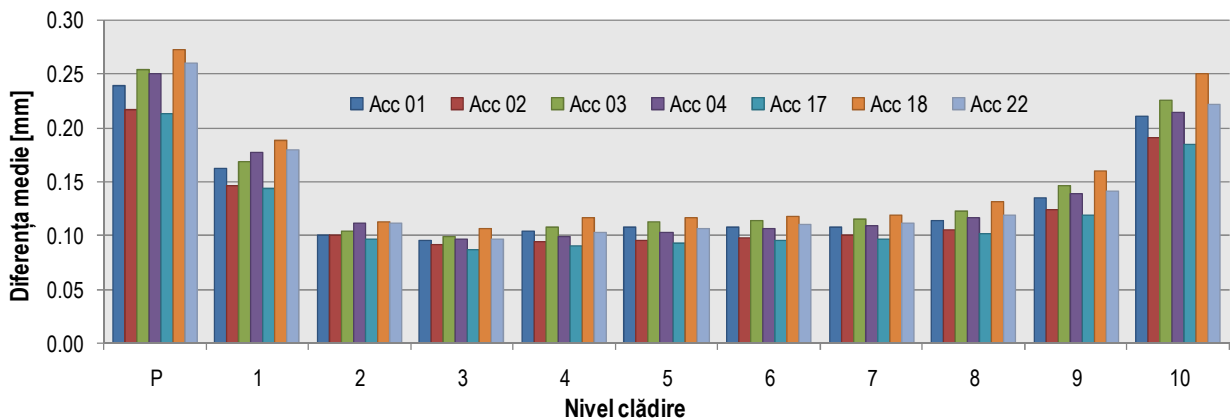


Fig. 6.20 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c=0,7 \text{ s}$

În urma prelucrării statistice a diferențelor a rezultat o diferență medie de 0,13 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic și computațional propus în cadrul acestui studiu.

Abateră medie pătratică caracterizează gradul de reprezentativitate a valorii medii, iar valorile de $0,1\div 0,11 \text{ mm}$ care s-au obținut în acest studiu arată că limitele între care variază diferențele sunt apropiate de valoarea medie, iar valorile dispersiei $0,01\div 0,02$ și ale coeficientului de variație $0,75\div 0,9$ arată faptul că distribuția diferențelor este omogenă, adică acestea nu sunt grupate în jurul unei valori.

În tab. 6.16 sunt prezentate rezultatele valorilor maxime ale deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative, obținute cu cele două programe, pentru tot setul de șapte accelerograme sintetice luate în considerare pentru perioada de colț $T_c = 1$ s. Pentru compararea rezultatelor, s-a calculat și diferența procentuală între rezultatele obținute cu cele două programe.

Tab. 6.16 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 17000$ kNs/m² ($T_c = 1$ s)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Accelerații relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
01	12	11.17	6.9	0.054	0.052	3.7	2.62	2.49	4.9
02	12	11.36	5.3	0.054	0.051	5.5	2.61	2.51	3.8
03	11	10.45	5	0.056	0.056	0	2.23	2.17	2.6
04	12	11.14	7.1	0.056	0.055	1.7	2.53	2.40	5.1
06	12.5	12.22	2.2	0.047	0.047	0	2.56	2.46	3.9
07	10.5	9.74	7.2	0.046	0.047	2.1	2.52	2.40	4.7
11	11.5	10.71	6.8	0.057	0.058	1.7	2.96	2.83	4.3

În fig. 6.21 sunt evidențiate valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel pe toate cele 11 niveluri ale clădirii pentru trei din cele șapte accelerograme luate în calcul (pentru $T_c = 1$ s), iar în fig. 6.22 sunt prezentate două exemple de variație în timp a deplasărilor relative de nivel pentru etajul 3 la care se atinge deplasarea relativă de nivel maximă.

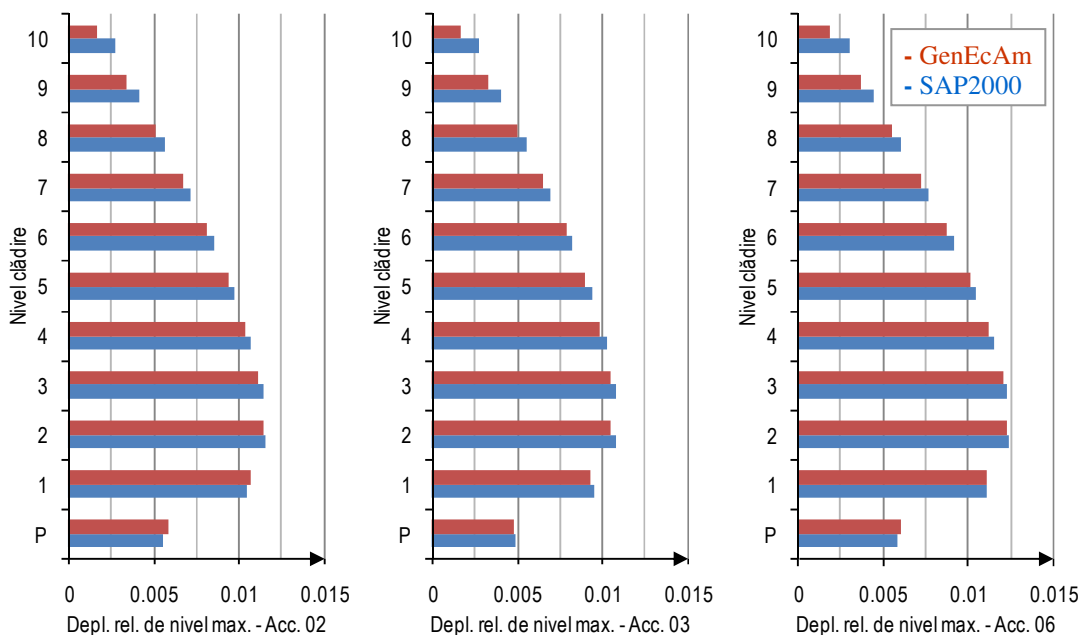


Fig. 6.21 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 17000$ kNs/m² (accelerogramele 02, 03, 06 pentru $T_c=1$ s)

Diferența dintre datele obținute cu programele SAP2000 și GenEcAm la analiza dinamică time-history cu accelerograme pentru $T_c = 1$ s pentru clădirea P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 17000$ kNs/m², este de maxim 7,2% pentru deplasările relative de nivel maxime, maxim 5,5% pentru vitezele relative de nivel maxime și de maxim 5,1% pentru accelerațiile relative maxime.

Diferențele sunt foarte mici, fapt evidențiat și în exemplele din fig. 6.22, care prezintă variația în timp a deplasărilor relative de nivel pentru etajul 3 la care aceste deplasări au valori

maxime. Aceste comparații s-au făcut pentru toate etajele observându-se aceleași diferențe mici între rezultatele oferite de cele două programe.

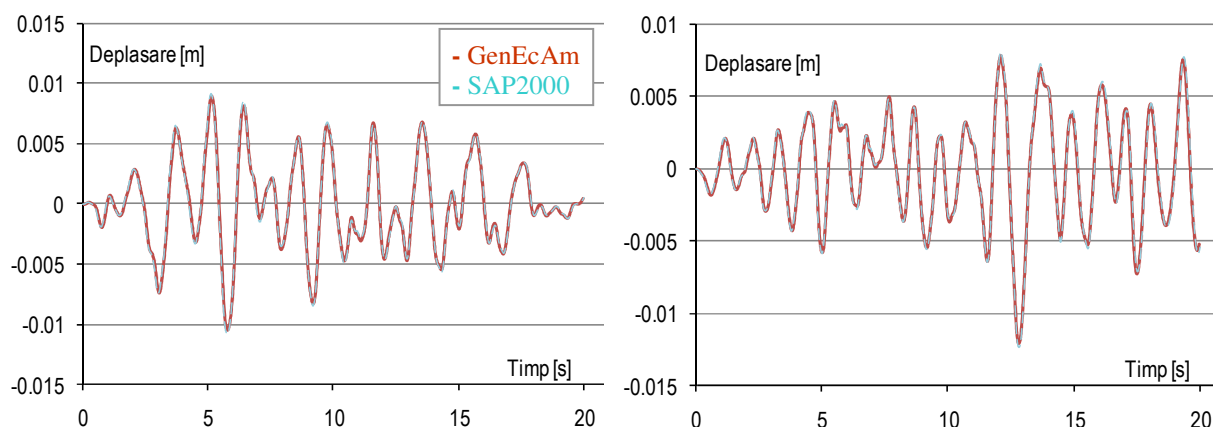


Fig. 6.22 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E
– $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelerogramele 03 și 06 ($T_c = 1 \text{ s}$)

Pentru o analiză mai detaliată a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe (*SAP2000* și *GenEcAm*) în cazul 2 de analiză pentru $T_c = 1 \text{ s}$, în tab. 6.17 am prezentat rezultatele prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de rezultate obținute pentru fiecare etaj în ceea ce privește deplasările relative de nivel (fig. 6.23). S-au folosit pentru analiză toate cele șapte accelerograme sintetice anterior alese pentru $T_c = 1 \text{ s}$.

Tab. 6.17 - Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] (P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1\text{s}$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [mm]	0.35	0.23	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.17	0.18	0.22	0.34	0.2
	Eroarea [%]	6.85	2.33	1.22	1.21	1.42	1.63	1.89	2.29	3.16	5.14	11.6	3.52
	Abaterea	0.26	0.17	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.15	0.24	0.14
	Dispersia	0.07	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	0.02
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.68
02	Media [mm]	0.35	0.23	0.14	0.14	0.15	0.16	0.16	0.16	0.18	0.21	0.33	0.2
	Eroarea [%]	6.22	2.16	1.20	1.23	1.43	1.62	1.86	2.25	3.09	5.12	11.6	3.43
	Abaterea	0.26	0.17	0.11	0.10	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.16	0.25	0.15
	Dispersia	0.07	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.03
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.79
03	Media [mm]	0.29	0.19	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.18	0.28	0.17
	Eroarea [%]	5.95	2.02	1.11	1.10	1.27	1.41	1.59	1.92	2.62	4.34	10.1	3.04
	Abaterea	0.24	0.16	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.15	0.23	0.14
	Dispersia	0.06	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.05	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.85
04	Media [mm]	0.34	0.21	0.13	0.13	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.21	0.32	0.19
	Eroarea [%]	6.18	2.02	1.17	1.22	1.47	1.69	1.97	2.39	3.28	5.43	12.4	3.57
	Abaterea	0.24	0.17	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.16	0.24	0.15
	Dispersia	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.06	0.02
	Coef. var.	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.78
06	Media [mm]	0.33	0.22	0.12	0.10	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.19	0.30	0.18
	Eroarea [%]	5.71	2.00	0.99	0.83	1.00	1.21	1.45	1.80	2.52	4.27	9.91	2.88
	Abaterea	0.24	0.16	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.22	0.14
	Dispersia	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.02
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.79

07	Media [mm]	0.33	0.21	0.14	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16	0.18	0.21	0.32	0.2	
	Eroarea [%]	6.84	2.26	1.37	1.45	1.72	1.95	2.22	2.65	3.59	5.85	13.1	3.91	
	Abaterea	0.22	0.14	0.10	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.16	0.24	0.14	
	Dispersia	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.06	0.02
	Coef. var.	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.74	
11	Media [mm]	0.29	0.19	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15	0.15	0.16	0.19	0.28	0.18	
	Eroarea [%]	5.86	1.96	1.21	1.21	1.44	1.65	1.88	2.23	2.98	4.81	10.8	3.28	
	Abaterea	0.23	0.15	0.10	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.16	0.24	0.15	
	Dispersia	0.05	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.02	
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.84	

Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta\varphi = 0.18 \text{ mm}$

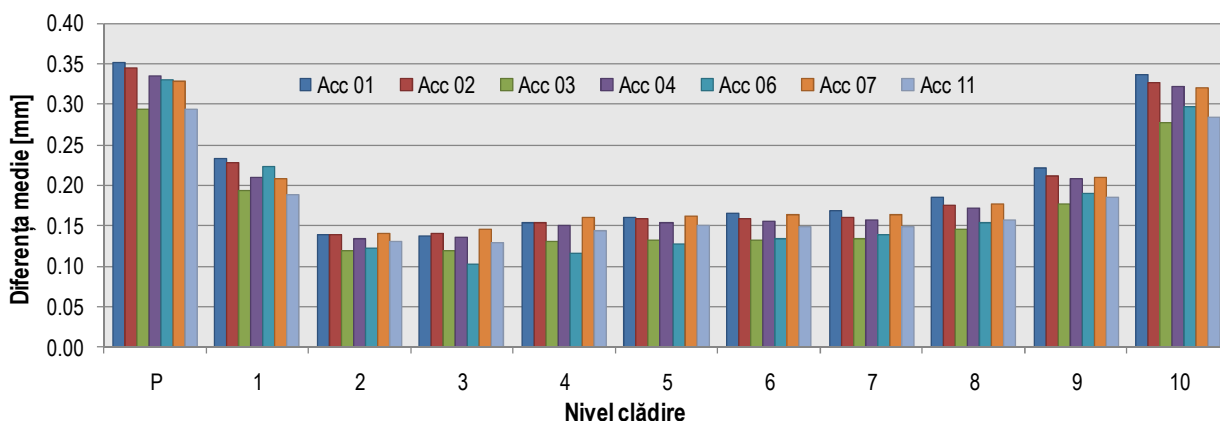


Fig. 6.23 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c=1 \text{ s}$

În urma prelucrării statistice a diferențelor a rezultat o diferență medie de 0,18 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Abaterea medie pătratică caracterizează gradul de reprezentativitate a valorii medii, iar valorile de $0,14 \div 0,15 \text{ mm}$ care s-au obținut în acest studiu arată că limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de $0,02 \div 0,03$ și ale coeficientului de variație $0,68 \div 0,85$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă într-un interval de variație mic.

În tab. 6.18 sunt prezentate rezultatele valorilor maxime ale deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative, obținute cu cele două programe, pentru cazul 2 de analiză corespunzător celor șapte accelerograme sintetice alese anterior pentru $T_c = 1,6 \text{ s}$.

Tab. 6.18 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$ ($T_c = 1,6 \text{ s}$)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
01	18	18.22	1.2	0.076	0.076	0	3.40	3.25	4.4
02	16	15.02	6.1	0.074	0.073	1.3	2.81	2.70	3.9
03	14	14.65	4.4	0.061	0.060	1.6	3.04	2.93	3.6
04	17	16.22	4.5	0.067	0.066	1.4	2.89	2.76	4.4
05	16	15.30	4.3	0.067	0.063	5.9	3.18	3.09	2.8
07	15.5	15.21	1.8	0.069	0.068	1.4	2.94	2.81	4.4
11	15	14.63	2.4	0.075	0.074	1.3	2.94	2.85	3

În acest caz, pentru $T_c = 1,6$ s, se observă o creștere a valorilor maxime ale deplasărilor relative de nivel datorată apropierii perioadei proprii de vibrație T_I a structurii de valoarea perioadei de colț a accelerogramelor folosite.

Diferența dintre datele obținute cu cele două programe este de maxim 6,1% pentru deplasările relative de nivel maxime, maxim 5,9% pentru vitezele relative de nivel maxime și de maxim 4,4% pentru accelerațiile relative maxime.

Diferențele sunt relativ mici, fapt evidențiat și în exemplele din figurile 6.24 și 6.25, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate pentru acest caz de analiză.

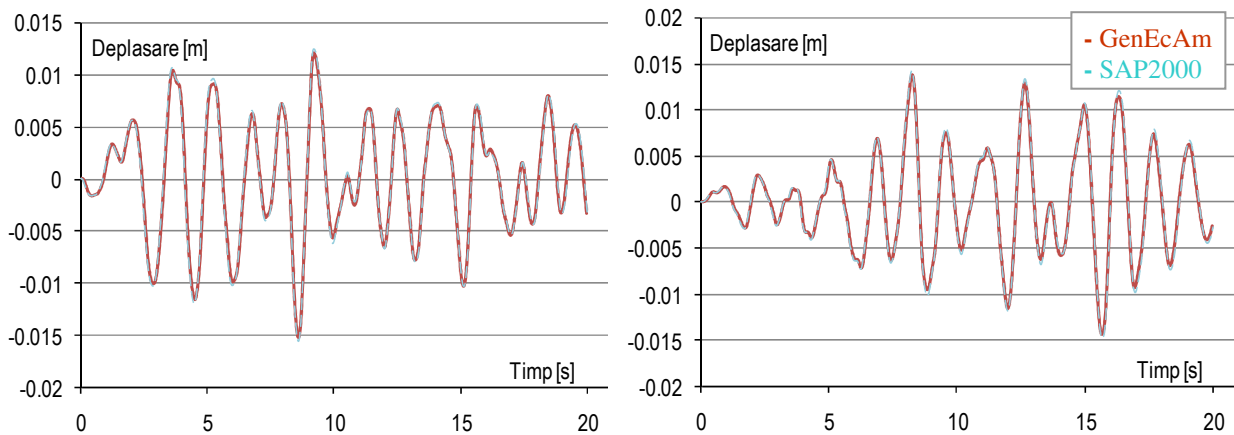


Fig. 6.24 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E (acc. 05 și 11, $T_c = 1,6$ s)

Din fig. 6.24 se observă că variația în timp a deplasării relative de nivel determinată cu cele două programe este aproape identică pentru etajul 3 la care se obține valoarea maximă a acestor deplasări.

Rezultate similare s-au obținut pentru toate cele șapte accelerograme corespunzătoare perioadei de colț $T_c = 1,6$ s, fapt care validează corectitudinea analizei folosind aplicația *GenEcAm*.

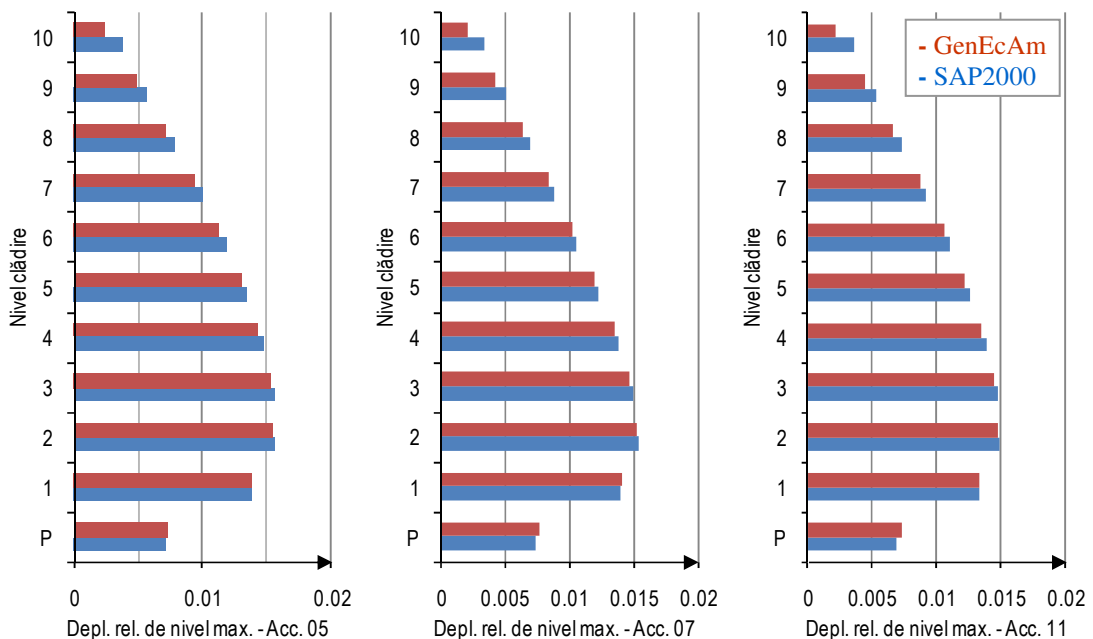


Fig. 6.25 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E – $c = 17000$ kNs/m² (accelerogramele 05, 07, 11 pentru $T_c=1,6$ s)

În tabelele 6.19, 6.20 și 6.21 sunt prezentate valorile parametrilor statistici rezultați în urma prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de rezultate obținute pentru deplasările relative de nivel, vitezele relative de nivel și respectiv accelerațiile relative la fiecare etaj în parte pentru analiza la seism cu setul de accelerograme corespunzător perioadei de colț $T_c = 1,6$ s.

Tab. 6.19 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel ($P+10E - c = 17000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1,6$ s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [mm]	0.43	0.28	0.17	0.18	0.20	0.20	0.21	0.21	0.24	0.29	0.44	0.26
	Eroarea [%]	5.06	1.67	0.94	0.97	1.14	1.30	1.51	1.84	2.58	4.28	9.65	2.81
	Abaterea	0.30	0.19	0.13	0.15	0.16	0.17	0.16	0.16	0.17	0.20	0.32	0.19
	Dispersia	0.09	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.10	0.04
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.75
02	Media [mm]	0.37	0.24	0.15	0.16	0.18	0.19	0.19	0.19	0.21	0.25	0.38	0.23
	Eroarea [%]	5.14	1.71	0.99	1.06	1.28	1.45	1.66	2.02	2.81	4.68	10.6	3.04
	Abaterea	0.30	0.19	0.13	0.14	0.15	0.16	0.15	0.15	0.17	0.20	0.31	0.19
	Dispersia	0.09	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.10	0.04
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.81
03	Media [mm]	0.33	0.20	0.14	0.16	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.23	0.36	0.21
	Eroarea [%]	4.93	1.59	0.96	1.12	1.32	1.47	1.63	1.91	2.59	4.24	9.56	2.85
	Abaterea	0.29	0.17	0.13	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.21	0.32	0.19
	Dispersia	0.08	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.04	0.10	0.04
	Coef. var.	0.9	0.8	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
04	Media [mm]	0.44	0.26	0.19	0.22	0.25	0.25	0.25	0.24	0.26	0.31	0.48	0.29
	Eroarea [%]	5.94	1.83	1.14	1.36	1.63	1.82	2.02	2.34	3.15	5.17	11.7	3.46
	Abaterea	0.31	0.19	0.14	0.15	0.17	0.17	0.17	0.17	0.19	0.23	0.35	0.2
	Dispersia	0.10	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.12	0.05
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.71
05	Media [mm]	0.40	0.24	0.17	0.19	0.22	0.22	0.21	0.21	0.23	0.28	0.44	0.26
	Eroarea [%]	5.57	1.75	1.06	1.23	1.49	1.65	1.82	2.13	2.97	4.94	11.2	3.26
	Abaterea	0.29	0.17	0.14	0.15	0.17	0.17	0.17	0.16	0.17	0.20	0.31	0.19
	Dispersia	0.09	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.10	0.04
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.75
07	Media [mm]	0.38	0.23	0.17	0.19	0.22	0.22	0.21	0.21	0.22	0.27	0.41	0.25
	Eroarea [%]	5.12	1.61	1.07	1.28	1.56	1.77	1.98	2.33	3.16	5.18	11.6	3.33
	Abaterea	0.30	0.18	0.13	0.15	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.22	0.34	0.2
	Dispersia	0.09	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.11	0.04
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
11	Media [mm]	0.39	0.23	0.18	0.21	0.23	0.23	0.22	0.22	0.24	0.29	0.43	0.26
	Eroarea [%]	5.64	1.76	1.18	1.42	1.68	1.84	2.05	2.42	3.31	5.41	12.0	3.52
	Abaterea	0.31	0.19	0.14	0.15	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19	0.22	0.34	0.2
	Dispersia	0.10	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.11	0.04
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.78

Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta\varphi = 0.25 \text{ mm}$, Eroarea = 3.18 %

În urma prelucrării statistice a diferențelor pentru deplasările relative de nivel, a rezultat o diferență medie de 0,25 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu. În fig. 6.26 sunt prezentate toate diferențele medii obținute pentru deplasările relative de nivel corespunzătoare accelerogramelor considerate.

Abaterea medie pătratică pentru acest caz de analiză ia valori între $0,19 \div 0,2$ mm și arată reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele oferite de cele două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de $0,04 \div 0,05$ și ale coeficientului de variație $0,71 \div 0,9$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic.

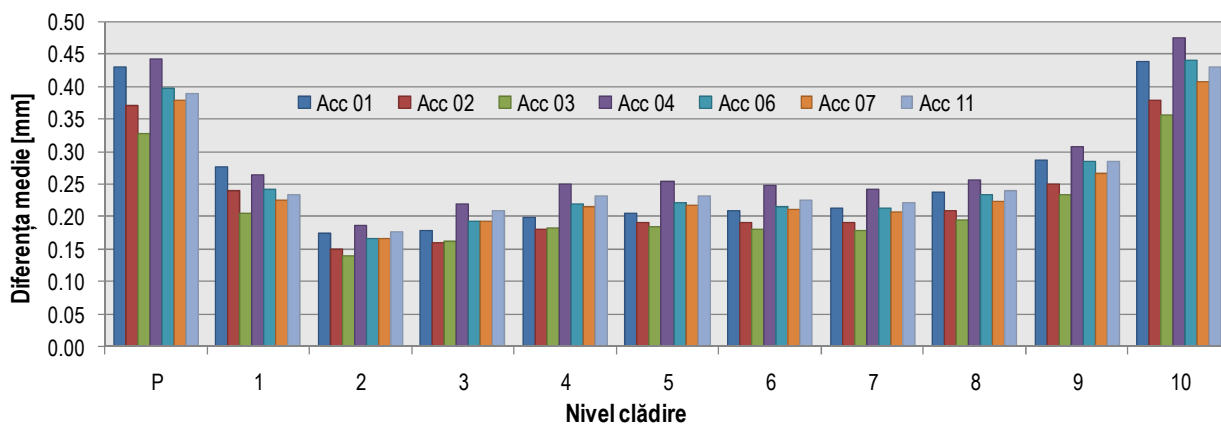


Fig. 6.26 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+10E – $c = 17000$ kNs/m², pentru $T_c=1,6$ s

Aceleași prelucrări statistice s-au realizat și pentru compararea vitezelor relative de nivel, rezultatele fiind prezentate în tab. 6.20.

Tab. 6.20 Prelucrarea statistică a vitezelor relative de nivel [mm/s], P+10E – $c = 17000$ kNs/m² ($T_c=1,6$ s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [mm/s]	2.52	1.80	1.46	1.44	1.46	1.45	1.45	1.42	1.39	1.50	2.14	1.64
	Eroarea [%]	6.79	2.59	1.91	1.91	2.07	2.28	2.59	3.01	3.71	5.46	11.5	3.98
	Abaterea	1.80	1.39	1.19	1.16	1.16	1.14	1.13	1.09	1.05	1.10	1.56	1.25
	Dispersia	3.24	1.95	1.41	1.34	1.35	1.30	1.28	1.19	1.09	1.21	2.44	1.62
	Coef. var.	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.77
02	Media [mm/s]	2.25	1.65	1.37	1.35	1.35	1.34	1.35	1.32	1.27	1.33	1.87	1.5
	Eroarea [%]	6.61	2.52	1.85	1.82	1.93	2.10	2.40	2.79	3.40	4.88	10.1	3.67
	Abaterea	1.79	1.39	1.13	1.08	1.07	1.04	1.02	0.98	0.96	1.06	1.55	1.19
	Dispersia	3.21	1.94	1.28	1.17	1.15	1.08	1.04	0.97	0.93	1.12	2.41	1.48
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.79
03	Media [mm/s]	1.99	1.53	1.33	1.27	1.23	1.20	1.20	1.17	1.12	1.18	1.66	1.35
	Eroarea [%]	7.00	2.82	2.17	2.06	2.11	2.24	2.53	2.90	3.51	5.03	10.3	3.88
	Abaterea	1.82	1.43	1.20	1.17	1.16	1.12	1.10	1.07	1.02	1.08	1.52	1.24
	Dispersia	3.30	2.05	1.45	1.38	1.34	1.26	1.21	1.14	1.05	1.16	2.32	1.61
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
04	Media [mm/s]	2.35	1.65	1.43	1.47	1.52	1.50	1.46	1.41	1.41	1.55	2.27	1.64
	Eroarea [%]	7.34	2.74	2.17	2.17	2.31	2.45	2.65	2.99	3.73	5.58	11.9	4.18
	Abaterea	1.87	1.37	1.13	1.17	1.21	1.21	1.19	1.14	1.07	1.11	1.60	1.28
	Dispersia	3.51	1.88	1.29	1.37	1.45	1.46	1.42	1.29	1.15	1.24	2.55	1.69
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.78
05	Media [mm/s]	2.34	1.71	1.47	1.46	1.46	1.44	1.41	1.35	1.31	1.41	2.05	1.58
	Eroarea [%]	7.02	2.73	2.17	2.28	2.40	2.51	2.70	3.00	3.60	5.24	11.1	4.07
	Abaterea	1.82	1.47	1.26	1.22	1.16	1.09	1.06	1.02	0.99	1.05	1.48	1.24
	Dispersia	3.31	2.15	1.58	1.49	1.36	1.18	1.13	1.05	0.99	1.11	2.20	1.6
	Coef. var.	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
07	Media [mm/s]	2.34	1.83	1.58	1.51	1.49	1.47	1.45	1.40	1.34	1.39	1.96	1.61
	Eroarea [%]	7.76	3.10	2.32	2.18	2.23	2.35	2.58	2.90	3.44	4.85	10.1	3.98
	Abaterea	1.88	1.47	1.28	1.25	1.19	1.14	1.13	1.10	1.06	1.12	1.56	1.29
	Dispersia	3.55	2.16	1.63	1.55	1.42	1.30	1.29	1.21	1.12	1.25	2.43	1.72
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
11	Media [mm/s]	2.28	1.74	1.50	1.51	1.53	1.49	1.46	1.41	1.36	1.43	2.01	1.61
	Eroarea [%]	6.98	2.72	2.04	2.01	2.12	2.23	2.43	2.72	3.30	4.71	9.50	3.71
	Abaterea	1.87	1.39	1.28	1.27	1.22	1.18	1.16	1.13	1.09	1.16	1.64	1.31
	Dispersia	3.51	1.92	1.64	1.60	1.50	1.39	1.34	1.27	1.19	1.34	2.70	1.76
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.81

Media diferențelor pe set accelerograme $\overline{\Delta\varphi} = 1.56 \text{ mm/s}$

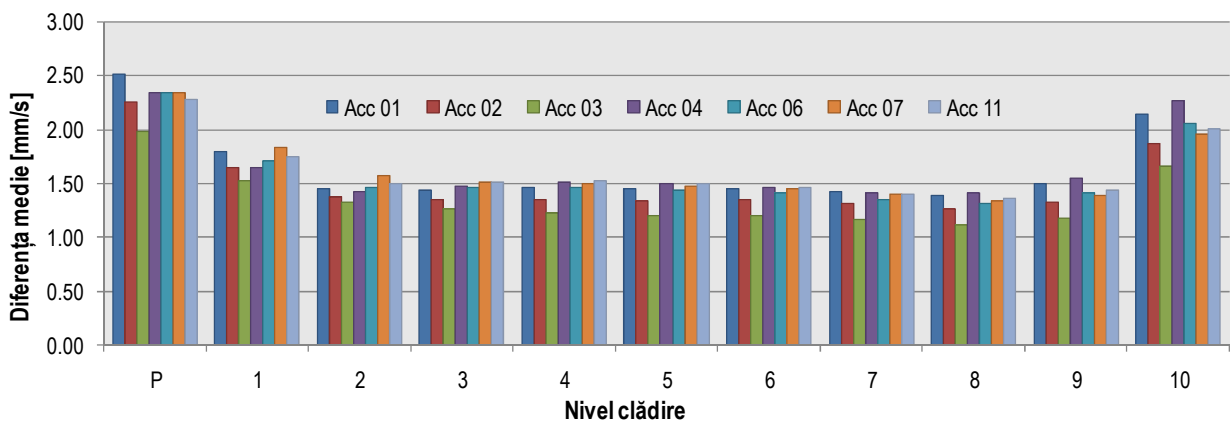


Fig. 6.27 Diferențe medii între vitezele relative de nivel [m/s] obținute cu cele două programe (cazul P+10E, $T_c=1,6$ s)

La analiza diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe pentru vitezele relative de nivel la fiecare etaj al clădirii studiate (fig. 6.27), în urma prelucrării statistice a rezultat o diferență medie de 1,56 mm/s între cele două seturi de date, valoare care raportată la valoarea maximă a vitezei relative de nivel de aproximativ 70 mm/s, reprezintă doar 2,2%, procent acceptabil ca diferență medie între cele două seturi de rezultate și care validează corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu și implementat în aplicația *GenEcAm*.

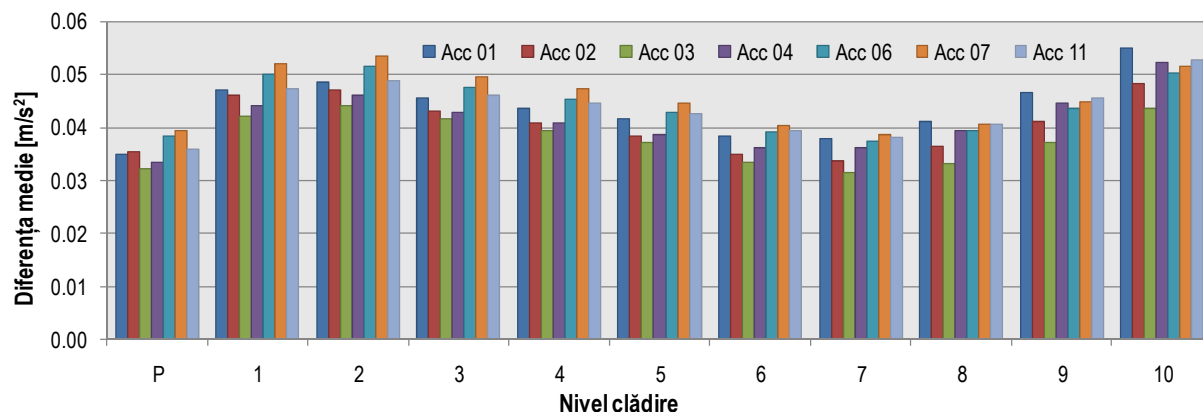
Valorile abaterii medii pătratice pentru acest caz de analiză sunt între 1,19÷1,31 mm/s evidențiind reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de 1,48÷1,76 și ale coeficientului de variație 0,77÷0,9, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic, ca și în cazul deplasărilor relative de nivel.

Pentru completarea analizei statistice a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe (*SAP2000* și *GenEcAm*), am realizat prelucrări statistice și pentru compararea rezultatelor în cazul accelerațiilor relative la fiecare nivel al clădirii studiate. Aceste rezultate le-am prezentat sintetic în tab. 6.21 și în fig. 6.28 în care am sintetizat toate diferențele medii între accelerațiile relative obținute cu cele două programe pentru toate cele șapte accelerograme considerate pentru $T_c = 1,6$ s.

Tab. 6.21 Prelucrarea statistică a accelerațiilor relative [m/s²], P+10E – c = 17000 kNs/m² (T_c=1,6s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
01	Media [m/s ²]	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05
	Eroarea [%]	14.4	7.16	4.32	2.86	2.16	1.74	1.42	1.27	1.30	1.40	1.61	3.6
	Abaterea	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
	Dispersia	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
	Coef. var.	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.79
02	Media [m/s ²]	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04
	Eroarea [%]	15.2	7.13	4.36	2.95	2.32	1.87	1.50	1.34	1.36	1.48	1.69	3.75
	Abaterea	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.82
03	Media [m/s ²]	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
	Eroarea [%]	11.1	5.49	3.67	2.64	2.10	1.74	1.42	1.23	1.19	1.27	1.43	3.03
	Abaterea	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
04	Media [m/s ²]	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04
	Eroarea [%]	12.0	5.87	3.86	2.76	2.25	1.95	1.60	1.44	1.46	1.58	1.79	3.32
	Abaterea	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03
	Dispersia	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.82
05	Media [m/s ²]	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04
	Eroarea [%]	12.6	5.90	3.69	2.54	2.01	1.69	1.44	1.31	1.31	1.39	1.56	3.22
	Abaterea	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
	Coef. var.	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.81
07	Media [m/s ²]	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04
	Eroarea [%]	12.6	6.20	3.97	2.83	2.28	1.95	1.65	1.50	1.49	1.57	1.75	3.44
	Abaterea	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
11	Media [m/s ²]	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04
	Eroarea [%]	14.4	6.99	4.43	3.08	2.44	2.00	1.64	1.46	1.46	1.57	1.76	3.75
	Abaterea	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.81

Media diferențelor pe set acceleroграме $\Delta\phi = 0.04 \text{ m/s}^2$


 Fig. 6.28 Valoarea diferențelor medii între accelerațiile relative [m/s²] obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+10E – c = 17000 kNs/m², pentru T_c=1,6 s

La analiza diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe pentru accelerațiile relative la fiecare etaj al clădirii studiate, în urma prelucrării statistice a rezultat o diferență medie de $0,04 \text{ m/s}^2$ între cele două seturi de date, valoare care validează corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Valorile abaterii medii pătratice pentru acest caz de analiză sunt între $0,03 \div 0,04 \text{ m/s}^2$ evidențiind reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de $0,001$ și ale coeficientului de variație $0,79 \div 0,9$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic, ca și în cazul deplasărilor și vitezelor relative de nivel.

Pentru un studiu comparativ complet al rezultatelor obținute cu cele două programe s-au analizat și diferențele între valorile forțelor axiale din amortizorii cu fluid vâcos folosiți la fiecare nivel al clădirii studiate, care sunt sintetizate în tab. 6.22.

Tab. 6.22 Rezultate pe structura clădirii P+10E – $c = 17000 \text{ kNs/m}^2$

Forța axială maximă din amortizorii cu fluid vâcos											
$T_c = 0,7 \text{ s}$				$T_c = 1 \text{ s}$				$T_c = 1,6 \text{ s}$			
Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]
01	608	600	1.3	01	801	789	1.4	01	1129	1134	0.4
02	596	587	1.5	02	801	776	3.1	02	1099	1099	0
03	607	591	2.6	03	832	835	0.3	03	909	903	0.6
04	610	638	4.3	04	840	829	1.3	04	1002	996	0.5
17	735	768	4.2	06	713	711	0.2	05	1001	951	4.9
18	594	611	2.7	07	693	715	3	07	1024	1028	0.3
22	661	671	1.4	11	851	876	2.8	11	1108	1108	0

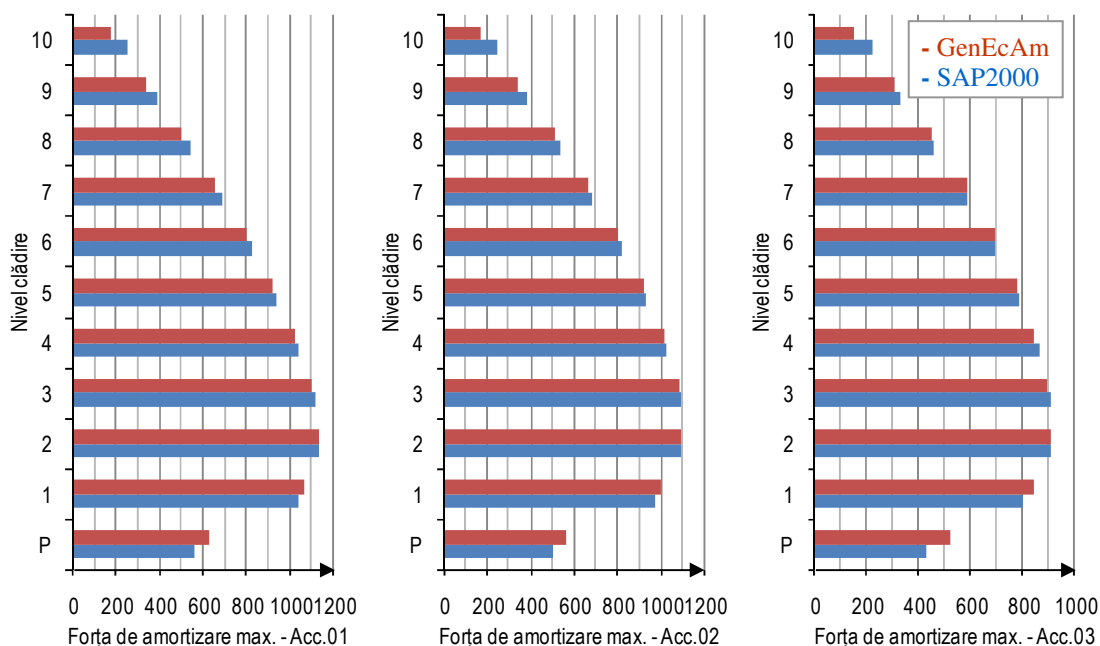


Fig. 6.29 Forțe de amortizare maxime în amortizorii cu fluid vâcos pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($c = 17000 \text{ kNs/m}^2$) pentru acceleroamele 01, 02, 03 ($T_c = 1,6 \text{ s}$)

Din fig. 6.29, care prezintă doar o parte din rezultatele obținute, se observă că și valorile forțelor axiale maxime din amortizori, obținute cu cele două programe, sunt foarte apropiate, fapt

care validează și din acest punct de vedere corectitudinea modelului analitic-computațional implementat în aplicația software *GenEcAm*.

La studiul comparativ al forțelor axiale din dispozitivele de amortizare folosite, diferența dintre datele obținute cu cele două programe este de maxim 4,3% pentru $T_c = 0,7$ s, maxim 3,1% pentru $T_c = 1$ s și maxim 4,9% pentru $T_c = 1.6$ s.

În fig. 6.30 sunt prezentate exemplificativ variațiile forțelor axiale din amortizorii de la etajul 3 al clădirii P+10E (la care se ating valori maxime) pentru două din cele șapte accelerograme cu $T_c = 1,6$ s considerate pentru studiu.

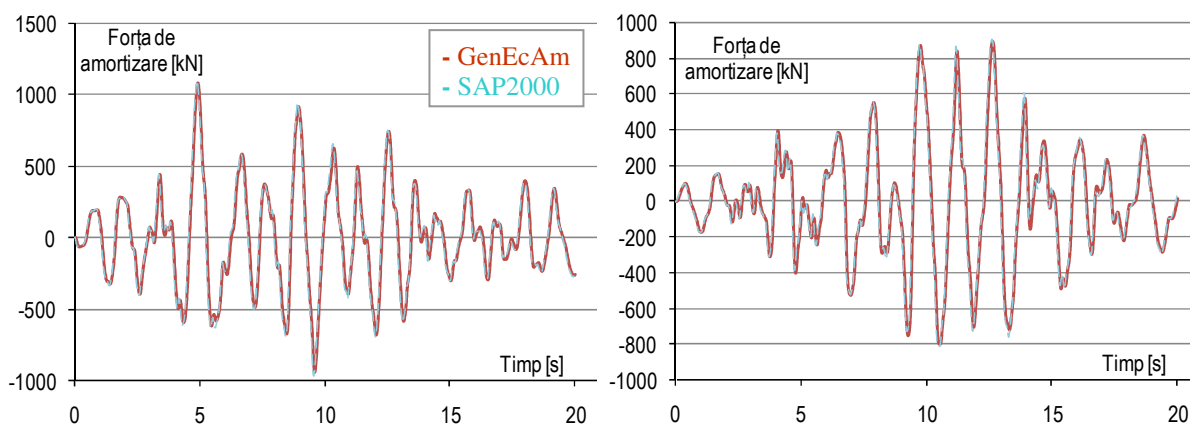


Fig. 6.30 Variația în timp a forței axiale din amortizori [kN] la et. 3 al clădirii P+10E
– $c = 17000$ kNs/m², pentru accelerogramele 02 și 03 ($T_c = 1.6$ s)

Se observă din fig. 6.30 că variațiile valorilor forței axiale din amortizori obținute cu cele două programe, pe durata seismului modelat cu accelerogramele 02 și 03, se suprapun aproape în totalitate, fapt care validează corectitudinea aplicației *GenEcAm*. Aceeași situație se întâlnește la toate accelerogramele care au fost luate în considerare pentru studiul de față.

6.4.3 Cazul 3 – Clădire P+10E fără amortizori

Acest caz a fost analizat cu intenția de a completa validarea modelului analitic-computațional implementat în aplicația *GenEcAm*, cu situația în care clădirea cu regim de înălțime P+10E nu este echipată antisismic. Clădirea a fost analizată la seism cu cele două programe având ca sursă seismică același set de accelerograme considerat și la analizele anterioare. Rezultatele prelucrării statistice au fost sintetizate în tabelele 6.23 și 6.24.

Tab. 6.23 Date obținute pe structura clădirii P+10E fără amortizori

Deplasari relative de nivel maxime											
$T_c = 0,7$ s				$T_c = 1$ s				$T_c = 1,6$ s			
Acc.	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	Acc.	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	Acc.	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]
01	16.51	16.42	0.5	01	22.12	22.16	0.1	01	31.95	31.17	2.4
02	15.01	14.99	0.1	02	19.63	21.03	6.6	02	28.65	28.90	0.8
03	15.91	15.24	4.2	03	21.29	21.59	1.3	03	31.49	30.21	4
04	14.65	13.92	4.9	04	22.25	22.64	1.7	04	30.56	30.38	0.5
17	16.24	16.71	2.8	06	22.10	22.58	2.1	05	31.04	30.70	1
18	14.45	15.56	7.1	07	19.25	19.73	2.4	07	27.87	27.45	1.5
22	14.63	15.71	6.8	11	21.10	22.5	6.2	11	28.96	29	0.1

Diferența dintre datele obținute cu cele două programe (*SAP2000* și *GenEcAm*) pentru deplasările relative de nivel maxime este de maxim 1,1 mm pentru $T_c = 0,7$ s, maxim 1,4 mm pentru $T_c = 1$ s și de maxim 1,2 mm pentru $T_c = 1,6$ s. Diferențele sunt relativ mici, fapt evidențiat și în exemplele din figurile 6.31 și 6.32, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate, corespunzătoare celor 21 de accelerograme considerate în acest studiu. Datorită volumului mare de date comparate, reprezentarea grafică a acestora este prezentată în cele ce urmează doar exemplificativ.

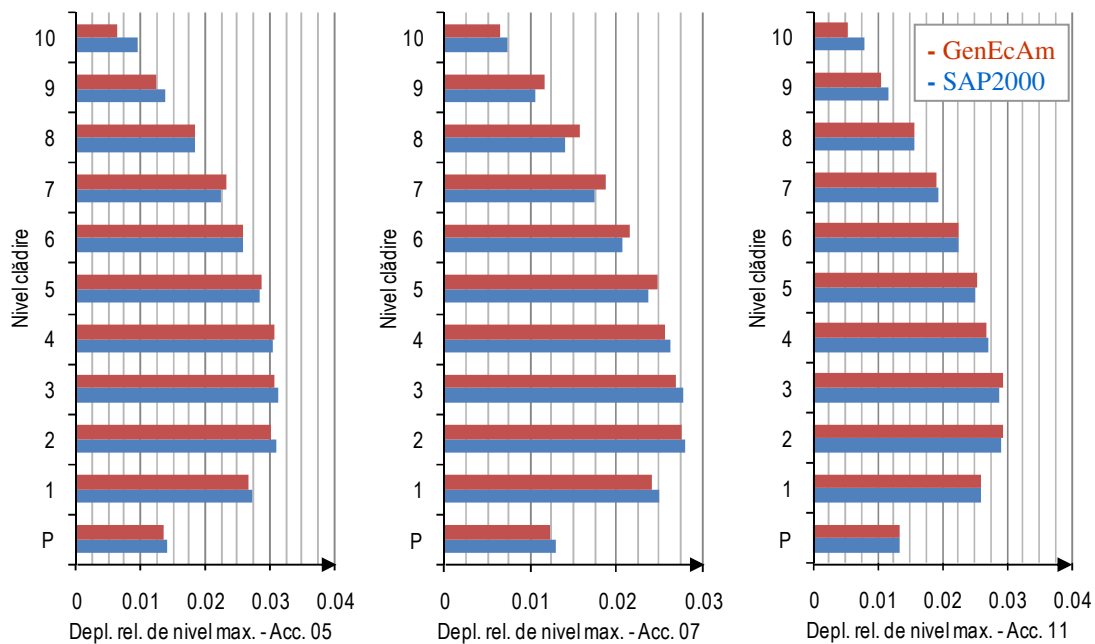


Fig. 6.31 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+10E fără amortizori (accelerogramele 05, 07, 11 pentru $T_c=1,6$ s)

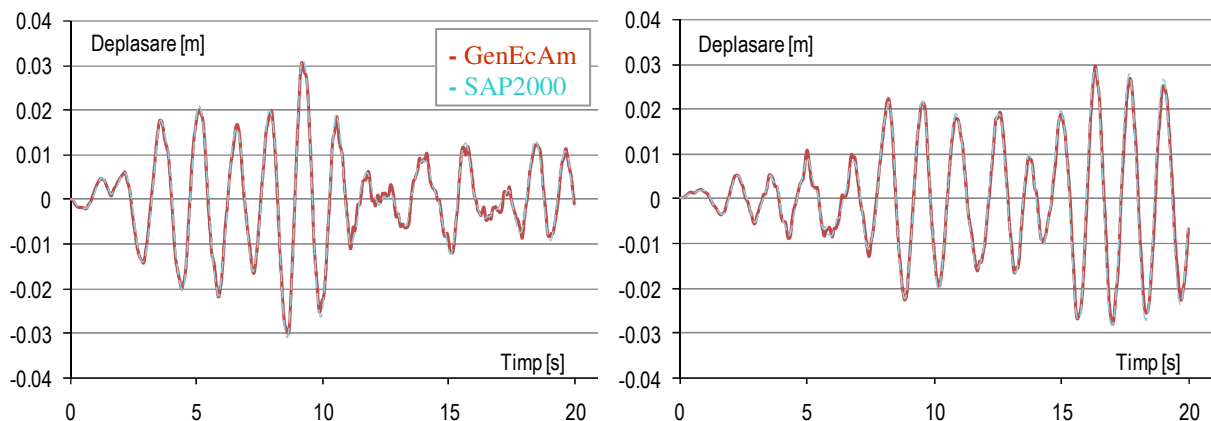


Fig. 6.32 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E fără amortizori, pentru accelerogramele 05 și 11 ($T_c = 1,6$ s)

Se observă din fig. 6.32 că variațiile valorilor deplasărilor relative de nivel pe durata seismului corespunzător accelerogramelor 05 și 11 se suprapun aproape în totalitate, fapt care validează corectitudinea modelului implementat. Aceeași similaritate se întâlnește la toate accelerogramele care au fost luate în considerare pentru studiul de față.

În tab. 6.24 sunt prezentate valorile parametrilor rezultați în urma prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de rezultate (*SAP2000* și *GenEcAm*) obținute pentru deplasările relative de nivel la fiecare etaj în parte pentru $T_c = 1,6$ s.

Tab. 6.24 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel [mm] (P+10E fără amortizori, $T_c=1,6s$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii											Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
02	Media [mm]	0.60	1.04	0.96	0.69	0.56	0.75	1.06	1.25	1.27	1.12	1.02	0.94
	Eroarea [%]	4.58	4.11	3.34	2.39	2.06	2.97	4.72	6.46	8.07	9.50	12.5	5.52
	Abaterea	0.48	0.83	0.77	0.56	0.47	0.61	0.84	0.98	1.00	0.90	0.90	0.76
	Dispersia	0.23	0.69	0.60	0.32	0.22	0.37	0.71	0.97	0.99	0.81	0.80	0.61
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.81
03	Media [mm]	0.63	1.10	0.97	0.66	0.56	0.81	1.14	1.37	1.40	1.22	0.96	0.98
	Eroarea [%]	4.27	3.88	3.07	2.13	1.96	3.16	5.23	7.41	9.44	11.2	12.9	5.88
	Abaterea	0.54	0.93	0.83	0.60	0.48	0.68	0.98	1.14	1.15	1.03	0.86	0.84
	Dispersia	0.29	0.87	0.68	0.36	0.23	0.46	0.96	1.30	1.33	1.07	0.74	0.75
	Coef. var.	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.85
04	Media [mm]	0.63	1.08	0.94	0.74	0.67	0.83	1.08	1.27	1.33	1.25	1.12	0.99
	Eroarea [%]	4.37	3.92	3.08	2.45	2.38	3.21	4.71	6.51	8.68	11.1	14.6	5.91
	Abaterea	0.47	0.81	0.75	0.56	0.53	0.68	0.86	0.96	0.96	0.89	0.90	0.76
	Dispersia	0.22	0.66	0.56	0.32	0.28	0.46	0.73	0.92	0.93	0.79	0.80	0.61
	Coef. var.	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.76
05	Media [mm]	0.64	1.10	0.98	0.70	0.68	0.84	1.09	1.32	1.39	1.26	1.09	1.01
	Eroarea [%]	4.59	4.07	3.20	2.23	2.24	2.96	4.25	5.91	7.62	9.26	11.6	5.27
	Abaterea	0.52	0.90	0.77	0.61	0.61	0.78	0.95	1.02	1.04	0.98	0.86	0.82
	Dispersia	0.27	0.80	0.59	0.38	0.37	0.61	0.91	1.04	1.09	0.95	0.74	0.7
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.84
11	Media [mm]	0.53	0.91	0.83	0.65	0.63	0.77	0.92	1.03	1.09	1.06	1.11	0.87
	Eroarea [%]	3.97	3.51	2.85	2.25	2.31	3.07	4.09	5.33	6.96	9.12	13.8	5.21
	Abaterea	0.48	0.83	0.72	0.51	0.51	0.65	0.82	0.97	1.03	0.95	0.93	0.76
	Dispersia	0.23	0.69	0.51	0.26	0.26	0.42	0.67	0.93	1.06	0.90	0.86	0.62
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.86

Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta\phi = 0.95 \text{ mm}$

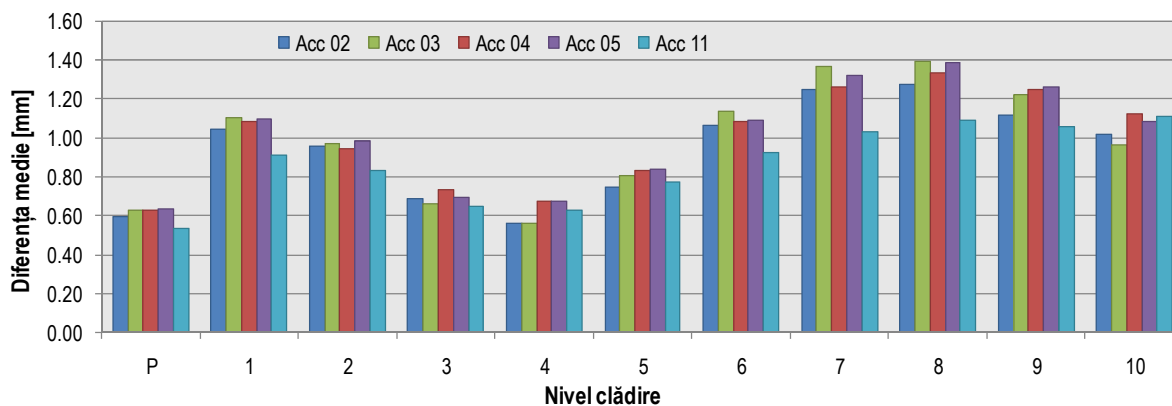


Fig. 6.33 Diferențele medii între deplasările relative de nivel [mm] obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+10E fără amortizori, pentru $T_c=1,6 \text{ s}$

Comparațiile s-au realizat și pentru $T_c = 0,7 \text{ s}$ și $T_c = 1 \text{ s}$, rezultatele fiind similare cu cele obținute la $T_c = 1,6 \text{ s}$.

În urma prelucrării statistice a diferențelor pentru deplasările relative de nivel, a rezultat o diferență medie de $0,95 \text{ mm}$ între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care raportată la valoarea maximă a deplasării relative de nivel de aproximativ $16,5 \text{ mm}$ reprezintă doar $5,7\%$, procent acceptabil pentru validarea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Abateră pătratică medie pentru acest caz de analiză ia valori între $0,76 \div 0,84$ mm și arată reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de $0,61 \div 0,75$ și ale coeficientului de variație $0,76 \div 0,86$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă într-un interval de variație mic. Și în acest caz, ca și în cele anterioare, rezultatele oferite de aplicația *GenEcAm* sunt foarte apropiate de cele oferite de programul *SAP2000*, fapt care validează modelul analitic-computațional de analiză la seism a clădirilor echipate antiseismic propus în acest studiu, pe care l-am implementat în setul de patru programe software: *HistPlot*, *ProConfig*, *GenEcAm* și *ProAnim*, precum și în aplicațiile *Matlab/Simulink* asociate.

6.5 Concluzii

 n vederea evaluării performanțelor diferitelor sisteme de protecție antiseismică care să contribuie la proiectarea rațională a acestora, am realizat un model analitic-computațional pentru modelarea comportamentului la seism a clădirilor echipate antiseismic, care poate reprezenta fenomenul de histerezis indus de amortizori cu ajutorul mai multor modele teoretice clasice și adaptate corespunzător în funcție de amortizorii folosiți. Acest model analitic-computațional este necesar să fie validat înainte de a fi utilizat în procesul de proiectare a sistemelor de protecție antiseismică a clădirilor.

 n procesul de validare am realizat compararea rezultatelor obținute cu aplicația *GenEcAm* cu rezultatele obținute cu programul *SAP2000* deoarece, acesta din urmă, este un program de analiză clasic, de referință, care are o bibliotecă de dispozitive de amortizare bine dezvoltată, dar care nu permite modelarea matematică corectă a buclelor de histerezis specifice amortizorilor românești ȘERB. Acest studiu comparativ cuprinde și prelucrarea statistică a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe în ceea ce privește deplasările, vitezele, accelerațiile dar și a forțelor axiale din amortizori. Rezultatele prelucrării statistice au fost prezentate pentru fiecare caz de analiză, pentru fiecare etaj în parte, rezultând astfel un volum mare de date pentru fiecare din cele 21 de accelerograme sintetice de proiectare considerate în studiu. Parametrii statistici calculați în fiecare caz de analiză sunt: valoarea medie a diferențelor $\overline{\Delta x}$, abaterea pătratică medie σ , dispersia σ^2 și coeficientul de variație *CV*.

 n studiul comparativ am considerat două structuri în cadre de beton armat în c te trei variante de echipare antiseismică, variante analizate atât în *SAP2000* c t și în *GenEcAm* prin analize dinamice liniare, având ca excitație seismică un set de 21 de accelerograme de proiectare (câte șapte pentru fiecare T_c). Am ales echiparea structurilor analizate cu amortizori cu fluid vâscos pentru care ambele programe au modele teoretice de modelare a buclei de histerezis. Pentru fiecare structură analizată am ales două valori ale coeficientului de amortizare *c* care să permită obținerea unor valori ale forțelor de amortizare din amortizori care se încadrează în dolmeniul de valori 800 kN – 1000 kN, valori considerate capabile să asigure o eficiență amortizare a clădirilor la seism [108].

 n tabelele următoare am prezentat centralizat diferențele obținute între rezultatele oferite de *SAP2000* și *GenEcAm* precum și indicatorii variației la analiza celor două clădiri în cadre de beton armat analizate pentru comparație și validarea rezultatelor, pentru întregul set de accelerograme luate în considerare la fiecare caz analizat. Astfel, în tabelele 7,45 și 7,46 s-au centralizat următorii parametri mediați pe fiecare set de accelerograme corespunzătoare fiecărui caz de analiză:

- $\overline{\Delta\varphi}$ – media diferențelor între deplasările relative de nivel obținute cu cele două programe [mm];
- σ – abaterea standard (abaterea pătratică medie) a diferențelor între deplasările relative de nivel;
- σ^2 – dispersia diferențelor între deplasările relative de nivel;
- ΔF_{\max} - diferența în procente între forțele axiale din amortizori obținute cu cele două programe.

Tab. 6.25 Indicatori de variație medii pentru diferențele între rezultatele obținute cu SAP2000 și GenEcAm (deplasări relative de nivel și forțe axiale din amortizori)

Caz analiză	$T_c = 0,7$ s				$T_c = 1$ s				$T_c = 1,6$ s			
	$\overline{\Delta\varphi}$ [mm]	σ	σ^2	ΔF_{\max} [%]	$\overline{\Delta\varphi}$ [mm]	σ	σ^2	ΔF_{\max} [%]	$\overline{\Delta\varphi}$ [mm]	σ	σ^2	ΔF_{\max} [%]
A	0.15	0.12	0.02	3.2	0.20	0.16	0.02	3.9	0.27	0.21	0.05	3.4
B	0.13	0.10	0.01	4.3	0.18	0.14	0.02	3.1	0.25	0.19	0.04	4.9
C	0.17	0.14	0.02	3.1	0.18	0.15	0.02	5.4	0.17	0.13	0.02	1
D	0.13	0.10	0.01	2.7	0.14	0.12	0.01	4.1	0.14	0.11	0.01	2.7

unde: Cazul A – structura P+10E cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 10000$ kNs/m²;

Cazul B – structura P+10E cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 17000$ kNs/m²;

Cazul C – structura P+5E cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 2000$ kNs/m² (Anexa A);

Cazul D – structura P+5E cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 4000$ kNs/m² (Anexa A).

Diferența medie între deplasările relative de nivel obținute cu cele două programe se situează între 0,13 mm și 0,27 mm, valori care confirmă corectitudinea modelului matematic-computațional implementat în aplicația GenEcAm.

Abaterea medie pătratică în acest caz ia valori între 0,10 mm și 0,21 mm, valori apropiate de diferența medie, și care arată reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele calculate.

Dispersia are valori de la 0,01 la 0,05 și arată că valorile diferențelor sunt apropiate de valoarea medie a diferenței între deplasările relative de nivel obținute cu cele două programe.

În tab. 6.46 sunt centralizate diferențele procentuale medii între rezultatele obținute cu cele două programe și anume deplasările relative de nivel, vitezele relative de nivel și accelerațiile relative.

Tab. 6.26 Indicatori de variație medii pentru diferențele între rezultatele obținute cu SAP2000 și GenEcAm (viteze relative de nivel și accelerații relative pentru $T_c = 1,6$ s)

Caz analiză	Deplasări relative de nivel				Viteze relative de nivel				Accelerații relative			
	$\overline{\Delta\varphi}$ [mm]	Dif. [%]	σ	σ^2	$\overline{\Delta\dot{\varphi}}$ [mm/s]	Dif. [%]	σ	σ^2	$\overline{\Delta\ddot{\varphi}}$ [mm/s ²]	Dif. [%]	σ	σ^2
A	0.27	2.94	0.21	0.05	1.90	3.78	1.55	2.44	0.05	3.49	0.04	0.002
B	0.25	3.18	0.19	0.04	1.56	3.92	1.25	1.64	0.04	3.44	0.03	0.001
C	0.17	1.93	0.13	0.02	2.53	3.79	2.12	4.65	0.08	4.62	0.07	0.005
D	0.14	1.97	0.11	0.01	1.63	2.94	1.32	1.79	0.05	3.55	0.04	0.002

Pentru vizualizarea grafică a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe, în fig. 6.62 am prezentat variația acestor diferențe mediate pe toate nivelurile pentru deplasări, viteze și accelerații exprimate în procente, corespunzător setului de accelerograme cu $T_c = 1,6$ s folosit la modelarea seismului pentru cele două tipuri de structuri (P+10E și P+5E) echipate fiecare cu câte două variante de sisteme de amortizare (prezentate în tabelele 6.45 și 6.46).

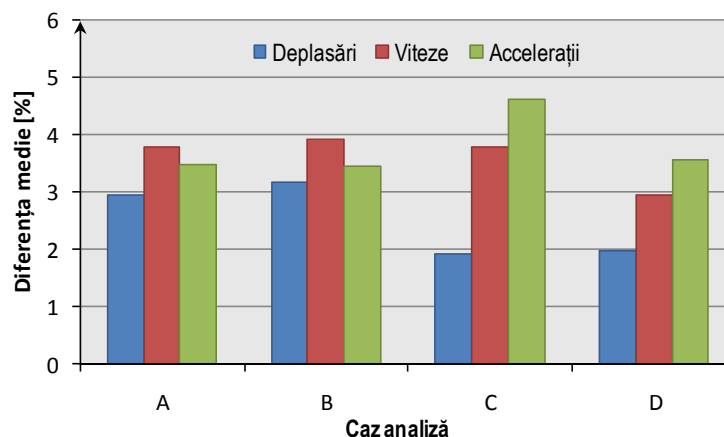


Fig. 6.34 Diferența medie între rezultatele obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* pentru $T_c = 1,6$ s

În concluzie, conform datelor sintetizate prezentate în tabelele 6.45 și 6.46, diferențele între rezultatele obținute cu cele două programe sunt foarte mici în toate cazurile analizate (maxim 4,62%), fapt care validează modelul analitic-computațional și aplicațiile *GenEcAm* și *HistPlot* realizate în acest studiu.

Concluziile studiului comparativ sunt:

- formele proprii de vibrație ale clădirilor studiate, obținute cu programul *GenEcAm* sunt cele reale, identice cu cele furnizate de programul *SAP2000* pentru cele două structuri analizate, iar valoarea perioadelor proprii de vibrație se apropie până la 2,4% pentru prima perioadă proprie și 4,2% pentru a doua perioadă proprie de valorile furnizate de *SAP2000*;

- cel mai important aspect al comparației între rezultatele obținute prin cele două metode distincte folosite de cele două programe *SAP2000* și *GenEcAm* este suprapunerea aproape perfectă a curbelor de variație în timp a deplasărilor relative de nivel, dar și a deplasărilor relative pentru fiecare etaj în parte, pentru toate variantele de echipare antiseismică și pentru tot setul de accelerograme sintetice considerate. Suprapunerea curbelor de variație în timp, așa cum se observă din figurile prezentate anterior în acest capitol, are loc pe toată durata seismului, diferențele minore care apar fiind izolate. Deși analiza structurilor considerate folosind programul *SAP2000*, utilizează metoda elementului finit aplicată pe o structură formată din elemente finite de tip bară și de tip placă, asamblate tridimensional, iar programul *GenEcAm* folosește un model matematic clasic specific unei bare cu mai multe noduri, rezultatele sunt foarte apropiate mergând până la suprapunere, fapt care validează corectitudinea modelului analitic-computațional asamblat în acest studiu;

- diferențele între curbele de variație a deplasărilor relative de nivel maxime apar izolat doar în câteva momente ale duratei seismului, acestea fiind sub 7,4%;

- diferențele maxime sunt sub 5,9% pentru vitezele relative de nivel și mai mici de 6,4% pentru accelerațiile relative;

- diferențele maxime pentru forțele axiale din amortizorii cu fluid vâscos nu depășesc 5,4% pentru cazuri izolate;

- volumul mare de analize comparative și diferențele mici între rezultatele obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm*, validează cu succes atât corectitudinea de calcul a programului *GenEcAm* cât și a modelului analitic-computațional implementat în acesta;

- datorită complexității și corectitudinii rezultatelor furnizate, programul *GenEcAm* poate fi folosit cu succes pentru modelarea corectă a comportamentului dinamic la seism al clădirilor echipate antiseismic, utilizatorul programului putând selecta pentru amortizorii și izolatorii

folosiți, modele teoretice clasice, dar și modele teoretice novatoare care nu se regăsesc în facilitățile programelor uzuale de analiză la seism a structurii clădirilor;

- programul *GenEcAm* permite o pregătire a modelului de analizat foarte facilă și rapidă precum și o durată de soluționare foarte mică (de ordinul secundelor); rezultatele oferite de programul *GenEcAm* și aplicația *Simulink* asociată sunt prezentate într-o manieră elegantă în *Excel* și cuprind variația în timp a deplasărilor, vitezelor, accelerațiilor și forțelor de amortizare specifice fiecărui etaj și fiecărui amortizor în parte.

Aplicațiile *GenEcAm* și *HistPlot* astfel validate pot fi folosite cu succes în procesul de proiectare rațională a sistemului de protecție antiseismică format în special din dispozitive de disipare a energiei seismice a căror buclă de histerezis se pretează a fi modelată cu modelele clasice de histerezis, dar și cu modelul Bouc-Wen clasic și adaptat.

CAPITOLUL 7

CONTRIBUȚII PRIVIND EVALUAREA PERFORMANȚELOR ANTISEISMICE A SISTEMELOR DE PROTECȚIE LA SEISM CU AMORTIZORI ȘERB

7.1 Introducere

În literatura de specialitate există puține studii conexe cu amortizorii românești ȘERB, iar performanțele acestor amortizori nu au fost până în prezent temeinic evaluate și nici comparate cu performanțele amortizorilor uzual folosiți cum sunt amortizorii cu fluid vâcos. Amortizorii românești au marele avantaj al prețului de cost redus care reprezintă doar 25% din prețul de cost al unui amortizor cu fluid vâcos.

Realizarea unui studiu care să evidențieze posibilitatea echipării clădirilor cu sisteme de amortizare românești care reduc costul aferent echipării cu 50% - 75%, este extrem de important în condițiile economice și seismice românești.

Studiile care s-au realizat până în prezent în acest sens se bazează pe ipoteze simplificatoare care induc obținerea de rezultate mai mult sau mai puțin precise, fapt care se datorează inexistenței modelelor matematice de histerezis adecvate amortizorilor românești în bibliotecile programelor comerciale de analiză cu metoda elementelor finite a clădirilor supuse acțiunilor seismice.

Datorită formei specifice a buclei de histerezis, amortizorii ȘERB asigură atât limitarea deplasărilor relative de nivel cât și disiparea energiei seismice. Caracteristica neliniară progresivă a buclei de histerezis este rar întâlnită în cazul amortizorilor des utilizați, deși are multiple avantaje în reducerea deplasărilor și disiparea energiei seismice.

Pentru a evalua performanțele amortizorilor românești la seism am realizat analiza comparativă a acestora în raport cu performanțele antiseismice ale amortizorilor folosiți la ora actuală, cum sunt amortizorii cu fluid vâcos.

În acest capitol, am prezentat studiile privind posibilitatea înlocuirii unui sistem de amortizare antiseismică realizat cu amortizori folosiți în mod uzual (cu fluid vâcos), cu un sistem de amortizare realizat cu amortizori românești de tip ȘERB care au marele avantaj că permit reducerea prețului de cost al sistemului de amortizare de patru ori față de un sistem de amortizare clasic cu amortizori cu fluid vâcos fabricați de firmele Taylor-Devices SUA sau ALGA Italia. Acest deziderat este extrem de important deoarece sistemul de amortizare al unei clădiri mărește prețul de cost al acesteia, fapt care constituie un motiv pentru care în România, se renunță la echiparea antiseismică a clădirilor.

Procesul de comparare a performanțelor celor două sisteme de amortizare constă în modelarea comportamentului dinamic la seism a unei clădiri echipate antiseismic cu fiecare din cele două sisteme cu ajutorul aplicației *GenEcAm* și analiza comparativă a rezultatelor obținute.

Programul *GenEcAm* realizează analize dinamice liniare ale structurilor echipate antiseismic supuse acțiunii seismice. Fiind vorba de analize dinamice liniare, PGA pentru accelerogramele folosite s-a considerat ca fiind jumătate din a_g conform P100-1-2013 în cazul verificării la SLS.

7.2 Evaluarea performanțelor antiseismice ale amortizorilor ȘERB pentru suprastructură

Pentru compararea performanțelor celor două tipuri de sisteme antiseismice, care folosesc amortizori ȘERB, respectiv amortizori cu fluid vâscos (Taylor, ALGA), am ales compararea următorilor parametri:

- valoarea maximă a deplasărilor relative de nivel pentru toate etajele;
- valoarea maximă a vitezelor relative de nivel pentru toate etajele;
- valoarea maximă a accelerațiilor relative pentru toate etajele;
- valoarea maximă a forțelor de amortizare pe amortizori la fiecare nivel;
- valoarea energiilor absorbite de amortizori la fiecare nivel.

Pentru comparație am ales clădirea în cadre din beton armat P+10E analizată în capitolele anterioare. În acest proces am folosit cinci accelerograme sintetice generate cu programul *MSIMQKE* [111], pentru $T_c = 1,6$ s și $a_g = 0,3g$. În fig. 7.1 sunt prezentate datele de intrare în aplicația *GenEcAm* la modelarea amortizorilor ȘERB cu modelul Bouc-Wen_Exp.

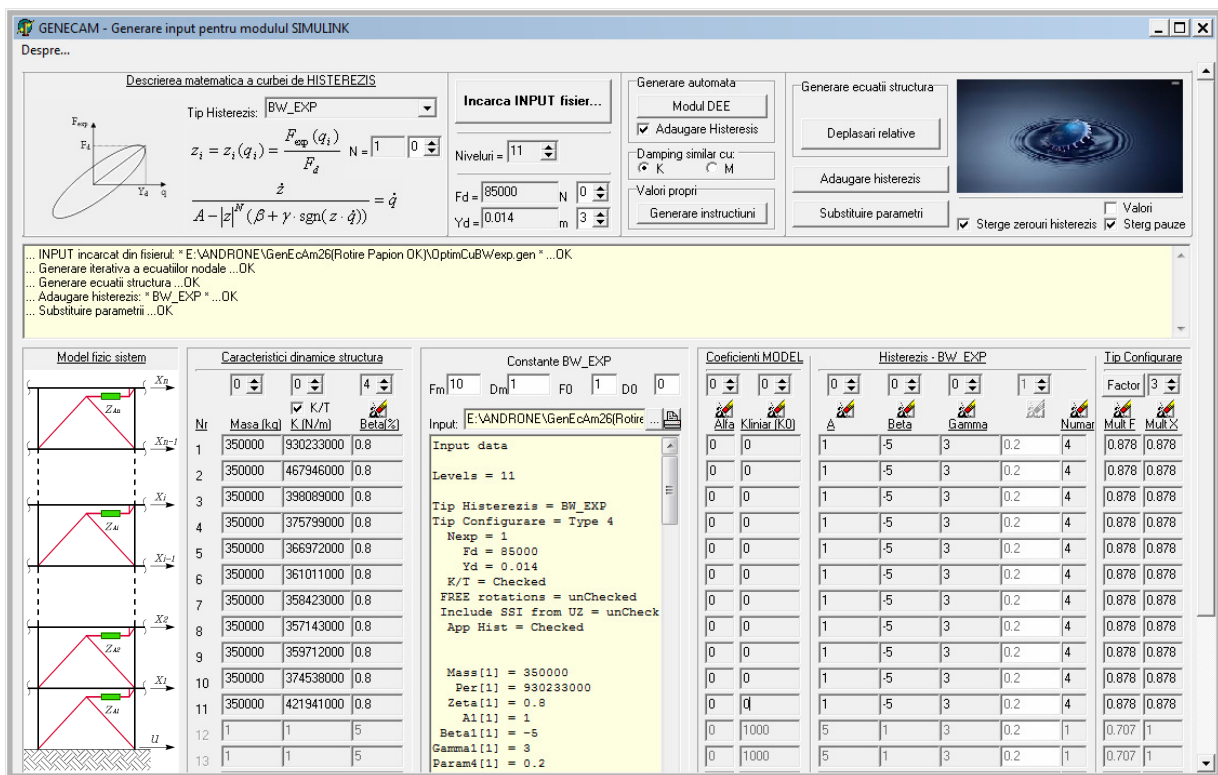


Fig. 7.1 Interfața *GenEcAm* – datele de intrare pentru modelarea analizei la seism a clădirii P+10E echipată cu amortizori ȘERB

În vederea comparării performanțelor celor două sisteme de echipare antiseismică, în continuare sunt prezentate centralizat rezultatele pe care le-am obținut cu programul *GenEcAm* pentru clădirea P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâscos sau cu amortizori ȘERB, aceștia din urmă fiind modelați cu cele două modele teoretice propuse în capitolele anterioare, și anume: modelul Bouc-Wen clasic și modelul Bouc-Wen-Exp pe care l-am propus în această lucrare.

În studiul comparativ am urmărit efectul dublării numărului de amortizori ȘERB în vederea îmbunătățirii performanțelor sistemelor de amortizare, caz în care sistemul de amortizare este de două ori mai ieftin decât un sistem de amortizare clasic cu amortizori cu fluid vâscos.

Rezultatele obținute cu *GenEcAm* sunt prezentate în trei variante: tabelar, sub formă de diagrame și sub formă de grafice de variație în timp. Volumul datelor obținute pentru această comparație este imens și a fost sintetizat pentru a prezenta într-o formă cât mai compactă datele importante pentru analiza comparativă.

Prima etapă a procesului de comparare constă în determinarea diferenței între rezultatele obținute prin folosirea modelelor de histerezis Bouc-Wen clasic și Bouc-Wen-Exp, la modelarea comportamentului amortizorilor ȘERB în timpul seismului. Pentru aceasta, am realizat cu ajutorul aplicației *GenEcAm*, analize dinamice ale clădirii P+10E echipată cu câte un amortizor pe fiecare fațadă și cu câte doi amortizori pe fiecare fațadă, pentru a determina astfel performanțele acestui sistem de amortizare în funcție de numărul de amortizori folosiți.

În prima fază a analizei am comparat rezultatele obținute cu câte un amortizor ȘERB pe fiecare fațadă (câte doi pe etaj) modelați cu cele două modele Bouc-Wen (clasic și modificat).

7.2.1 Comparație între rezultatele modelării sistemului de amortizare ȘERB folosind cele două modele de histerezis: Bouc-Wen clasic (BW) și Bouc-Wen-Exp (BW-Exp)

Pentru modelarea amortizorilor ȘERB folosiți s-au ales, cu ajutorul aplicației *HistPlot*, următorii parametri ai modelului Bouc-Wen (atât pentru modelul clasic – BW, cât și pentru cel modificat – BW-Exp): $A = 1$, $\beta = -5$, $\gamma = 3$ și $n = 1$. Amortizorii au fost montați în contravânturii.

În urma modelării comportamentului la seism cu cele cinci accelerograme sintetice cu $T_c = 1,6$ s, folosind aplicația *GenEcAm*, au rezultat deplasările, vitezele, accelerațiile pentru fiecare nivel în parte, precum și forțele și energiile de amortizare specifice fiecărui amortizor folosit.

Rezultatele au fost sintetizate tabelar și grafic în tabelele 7.1 și 7.2 și figurile 7.2, 7.3, 7.4 și 7.5, unde cu 2BW s-a notat cazul clădirii echipate cu doi amortizori ȘERB pe etaj modelați cu modelul BW clasic și cu 2BW-Exp, cazul similar în care s-a folosit modelul Bouc-Wen-Exp.

Tab. 7.1 Rezultate clădire P+10E cu doi amortizori ȘERB pe etaj - BW clasic și BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative maxime		
	2BW [mm]	2BW-Exp [mm]	Dif. [%]	2BW [m/s]	2BW-Exp [m/s]	Dif. [%]	2BW [m/s ²]	2BW-Exp [m/s ²]	Dif. [%]
01	21,38	19,62	8,2	0,145	0,131	9,6	6,04	5,41	10,4
02	21,0	19,7	6,1	0,140	0,130	7,1	6,07	5,39	11,2
04	21,22	20,20	4,8	0,135	0,127	5,9	6,24	5,73	8,1
07	20,95	19,54	6,7	0,139	0,119	14,3	6,07	4,85	20
11	22,09	20,92	5,2	0,132	0,130	1,5	5,49	5,07	7,6

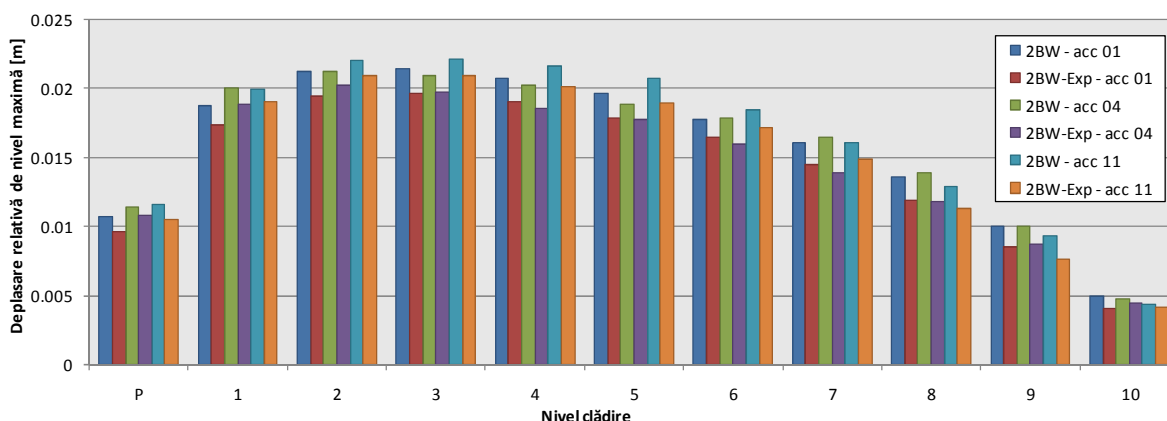


Fig. 7.2 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori ȘERB - 2BW și 2BW-Exp (pentru $T_c=1,6$ s)

Se observă că folosirea modelului Bouc-Wen-Exp conduce la obținerea de deplasări relative de nivel maxime mai mici decât în cazul folosirii modelului Bouc-Wen clasic, la toate etajele indiferent de accelerograma folosită ca input seismic în programul *GenEcAm*.

În cazul folosirii accelerogramei 01 ca input seismic pentru clădirea P+10E considerată, la $t = 4,2$ s și la $t = 4,35$ s se ating valorile maxime ale deplasării relative de nivel la etajul 3. Pentru aceste valori ale lui t , în fig. 7.3 am prezentat deplasările fiecărui nivel în parte obținute cu ajutorul aplicației *ProAnim*, acestea fiind necesare pentru o comparație corectă între rezultatele pe care le-am obținut cu cele două modele de histerezis. Aceste comparații au fost realizate pentru toate cele cinci accelerograme sintetice de proiectare.

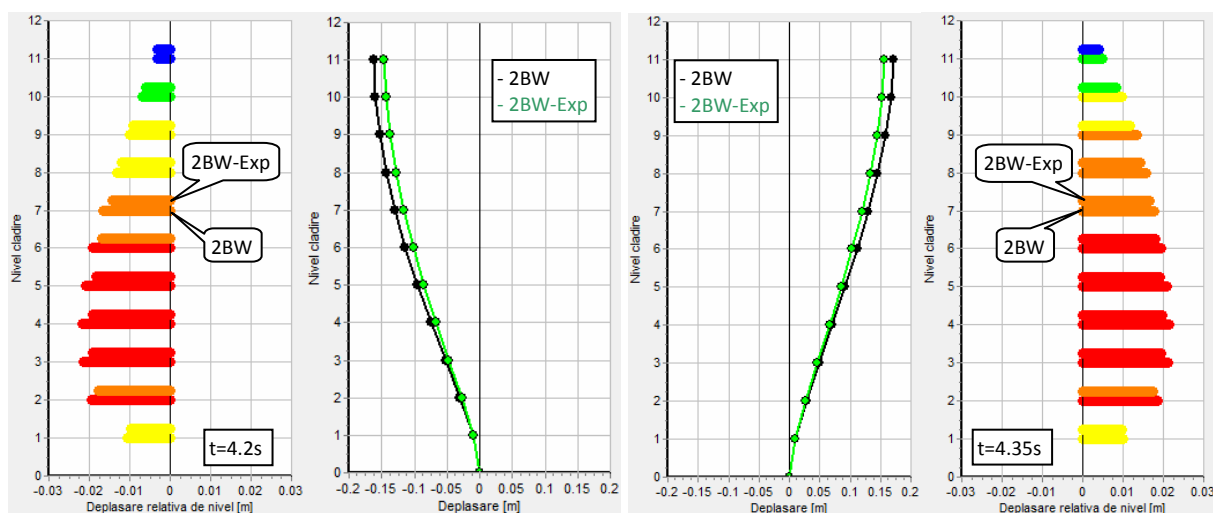


Fig. 7.3 Aplicația ProAnim - Deplasări maxime la modelarea cu *GenEcAm* a comportamentului la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB modelați cu modelele teoretice BW și BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6$ s)

În fig. 7.4 am prezentat două exemple de variație a deplasării relative de nivel pe care le-am obținut pentru două accelerograme sintetice de proiectare, la etajul 3 al clădirii considerate la care apar valori maxime ale acestor deplasări. Se observă că există diferențe în ceea ce privește mărimea deplasărilor relative de nivel între cele două cazuri de modelare a amortizorilor ȘERB.

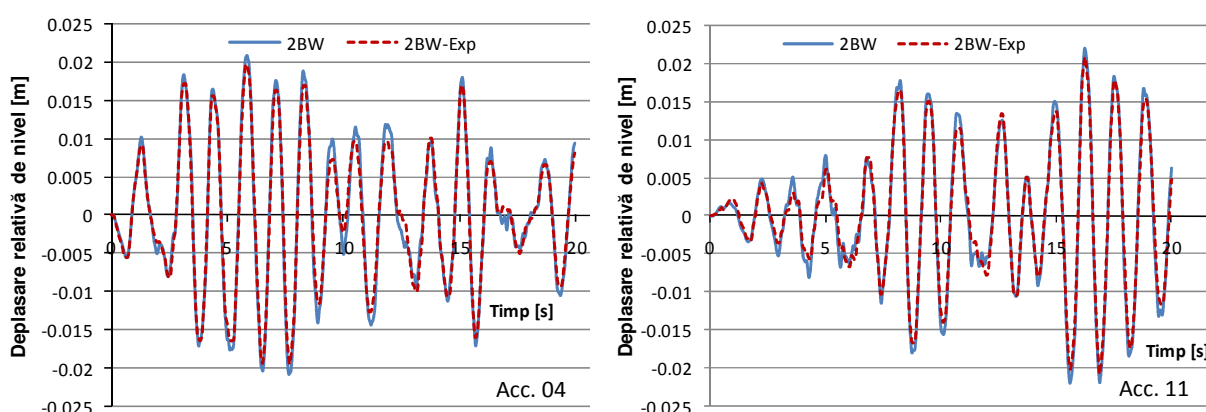


Fig. 7.4 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E (modelare cu *GenEcAm*)

Din analiza tuturor rezultatelor pe care le-am obținut cu cele cinci accelerograme la modelarea cu *GenEcAm*, din care o parte au fost prezentate în figurile 7.2, 7.3, 7.4 și tab. 7.1, se observă că deplasările obținute folosind modelul Bouc-Wen-Exp sunt mai mici în medie cu 6,2% decât deplasările obținute folosind modelul Bouc-Wen clasic. În cazul vitezelor diferența este de 7,68% în medie, iar în cazul accelerațiilor este în medie de 11,46%. Am realizat aceleași comparații și pentru forțele axiale și energiile absorbite de amortizori (tab. 7.2 și fig. 7.5).

Tab. 7.2 Rezultate clădire P+10E cu doi amortizori ȘERB pe etaj - BW clasic și BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Forța axială maximă din amortizori			Energia maximă absorbită de amortizori pe nivel		
	2BW [kN]	2BW-Exp [kN]	Dif. [%]	2BW [J]	2BW-Exp [J]	Dif. [%]
01	874	650	25,6	533597	1134869	52,9
02	845	641	24,1	502798	1024973	50,9
04	701	692	1,2	455420,6	1000039	54,4
07	836	646	22,7	347831,2	830122	58
11	909	818	10	440118	932597,9	52,8

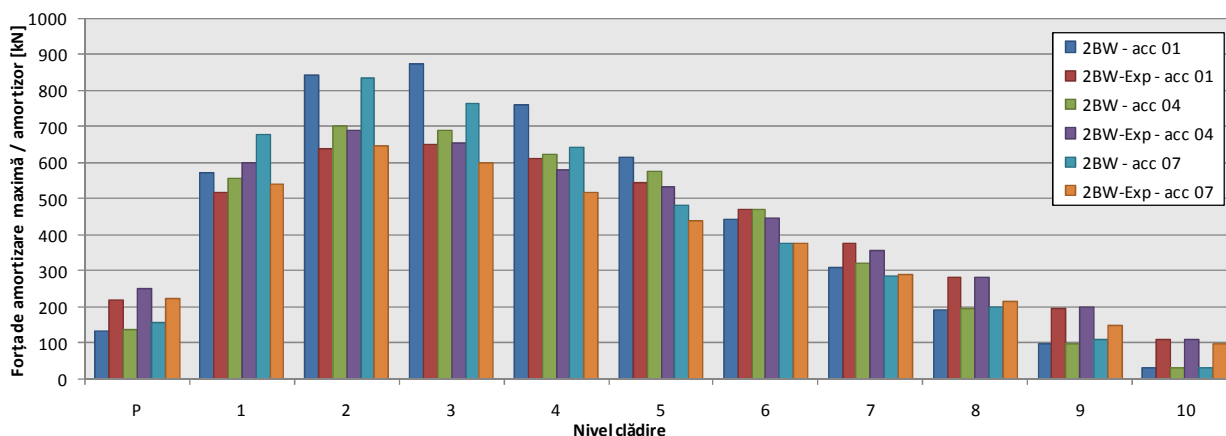


Fig. 7.5 Forțe axiale maxime din amortizorii ȘERB modelați cu BW clasic și cu BW-Exp, pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)

În urma analizei comparative a forțelor axiale și energiilor absorbite de amortizori, se observă că forțele axiale maxime din amortizori obținute cu modelul BW clasic sunt în medie cu 16,72% mai mari decât cele obținute cu modelul BW-Exp. Energia absorbită pe nivel este în medie cu 53,8% mai mare în cazul utilizării modelului BW-Exp decât în cazul folosirii modelului clasic Bouc-Wen. În cazul particular al acceleroگرامei 04 se observă că valorile maxime ale forțelor axiale din amortizori obținute cu cele două modele de histerezis Bouc-Wen sunt aproximativ egale pentru etajele 1 până la 7.

Se poate concluziona că există diferențe semnificative ale valorilor maxime ale parametrilor de dinamică seismică obținuți cu cele două modele Bouc-Wen însă graficele de variație în timp ale acestora au o alură foarte asemănătoare.

Pentru studiul comparativ am considerat și ipoteza în care se folosește un număr dublu de amortizori față de cazul precedent, adică doi amortizori ȘERB pe fiecare fațadă la fiecare etaj, montați în contravântuiri.

7.2.2 Cazul clădirii echipate cu patru amortizori ȘERB pe nivel pe direcția O_x a seismului, modelați cu modelele de histerezis Bouc-Wen clasic și respectiv Bouc-Wen-Exp

Pentru a determina influența numărului de amortizori ȘERB folosiți într-un sistem de amortizare asupra eficienței acestuia în amortizarea seismică a clădirii, am considerat important în acest studiu comparativ, cazul sistemului de amortizare cu doi amortizori ȘERB pe fiecare fațadă la fiecare nivel, adică patru amortizori pe direcția O_x a seismului, montați în contravântuiri. Astfel, rezultă un sistem de amortizare care conține un număr dublu de amortizori ȘERB, care deși are un preț de cost dublu, este cu 50% mai mic decât cel al sistemului de amortizare clasic care utilizează amortizori cu fluid vâscos.

Am considerat, pentru comparația între cele două modele de histerzis BW clasic și BW-Exp, aceeași clădire P+10E și aceleași cinci accelerograme sintetice pentru $T_c = 1,6$ s. Rezultatele obținute în urma modelării cu *GenEcAm* sunt prezentate în tabelele 7.3 și 7.4 și figurile 7.6 - 7.9 unde s-au notat cu 4BW și 4BW-Exp cele două cazuri de modelare a amortizorilor ȘERB.

Tab. 7.3 Rezultate - clădire P+10E cu 4 amortizori ȘERB pe etaj: 4BW clasic și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative maxime		
	4BW [mm]	4BW-Exp [mm]	Dif. [%]	4BW [m/s]	4BW-Exp [m/s]	Dif. [%]	4BW [m/s ²]	4BW-Exp [m/s ²]	Dif. [%]
01	18,33	16,3	11	0,144	0,114	20,8	6,00	5,71	4,8
02	19,93	17,15	13,9	0,140	0,111	20,7	5,93	5,62	5,2
04	17,61	16,02	9	0,134	0,108	19,4	6,00	5,24	12,6
07	17,34	14,67	15,4	0,115	0,103	10,4	5,55	4,80	13,5
11	18,7	16,9	9,6	0,138	0,109	21	6,01	5,02	16,4

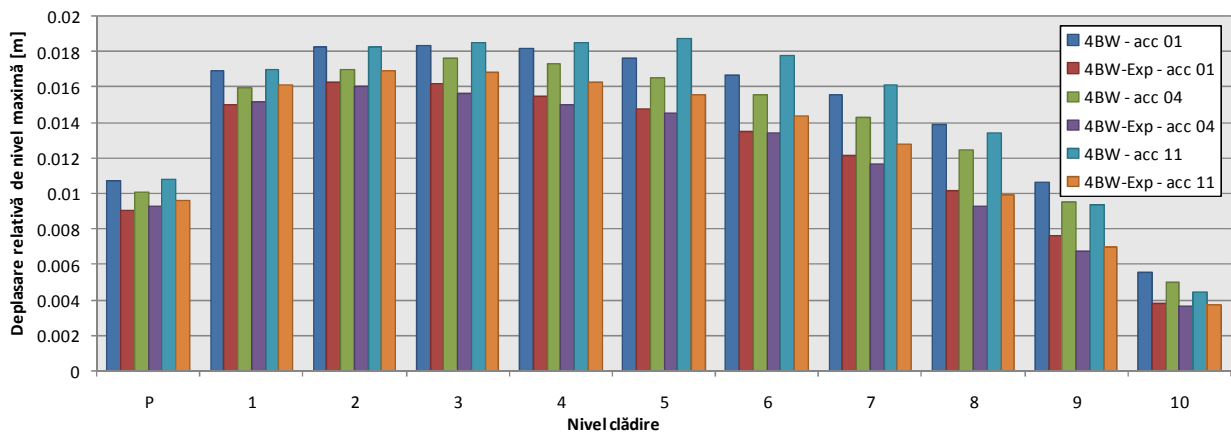


Fig. 7.6 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu patru amortizori ȘERB pe nivel - 4BW și 4BW-Exp (pentru $T_c=1,6$ s)

Pentru accelerograma 01, valorile maxime ale deplasării relative de nivel la etajul 3 se ating la $t = 4,19$ s și la $t = 4,80$ s. Pentru aceste valori ale lui t , pentru care se ating deplasările maxime la vârful clădirii, în fig. 7.7 sunt prezentate deplasările fiecărui nivel în parte, pe care le-am reprezentat cu ajutorul aplicației *ProAnim*.

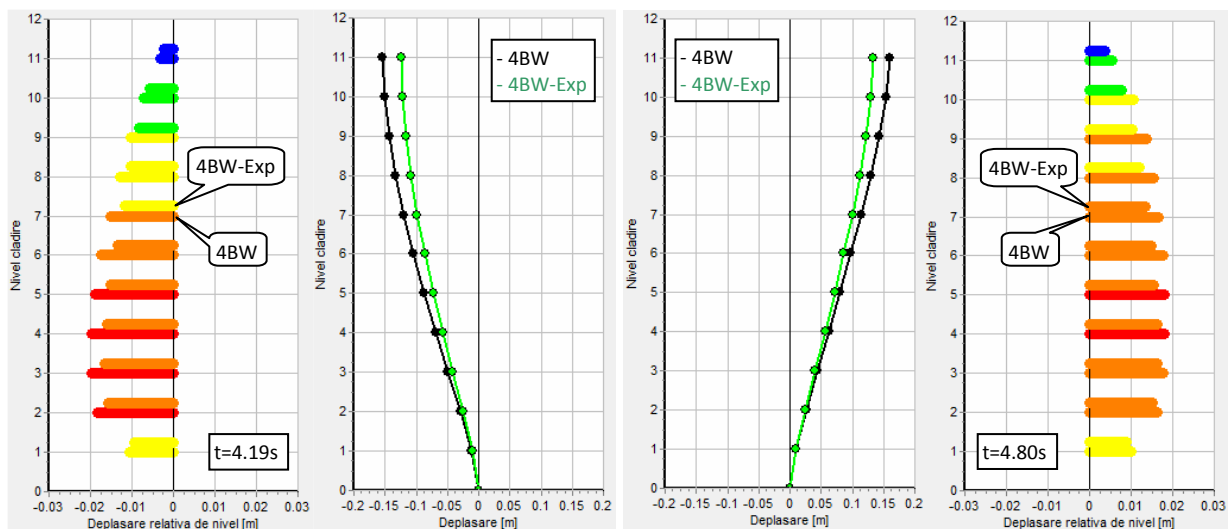


Fig. 7.7 Aplicația *ProAnim* - Deplasări maxime la modelarea cu *GenEcAm* a comportamentului la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB modelați cu modelele teoretice BW și BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6$ s)

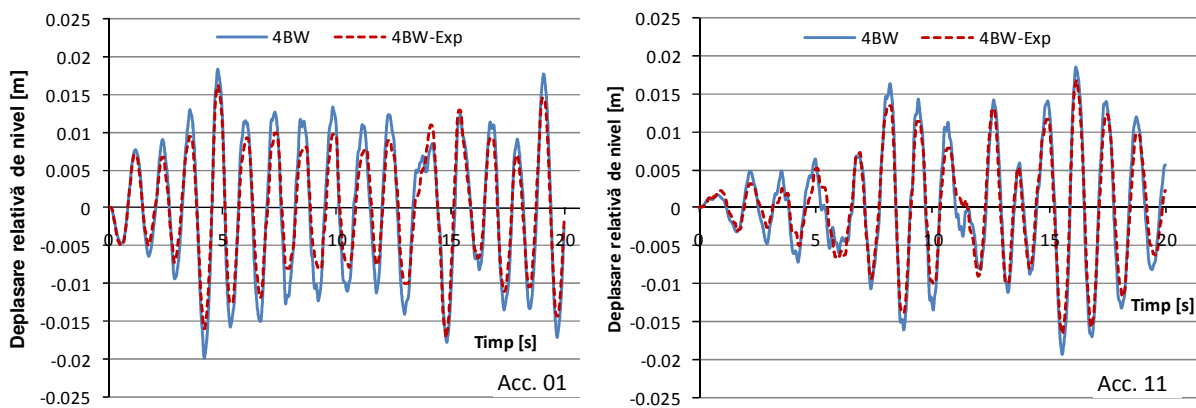


Fig.7.8 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E

Din analiza tuturor rezultatelor pe care le-am obținut cu cele cinci accelerograme la modelarea cu *GenEcAm*, din care o parte au fost prezentate în figurile 7.6, 7.7, 7.8 și tab. 7.3 se observă că deplasările relative de nivel maxime obținute folosind modelul Bouc-Wen-Exp sunt, și în acest caz, al dublării numărului de amortizori, mai mici în medie cu 11,78% decât deplasările obținute folosind modelul Bouc-Wen clasic. În cazul vitezelor diferența este în medie de 18,46%, și respectiv de 10,5% în cazul accelerațiilor. Am realizat aceleași comparații și pentru forțele axiale și energiile absorbite de amortizori, prezentate în tab. 7.4 și fig. 7.9.

Tab. 7.4 Rezultate - clădire P+10E cu 4 amortizori ȘERB pe etaj: 4BW clasic și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Forța axială maximă din amortizori			Energia maximă absorbită pe nivel		
	4BW [kN]	4BW-Exp [kN]	Dif. [%]	4BW [J]	4BW-Exp [J]	Dif. [%]
01	822	647	21,2	921008.1	1636530	43,7
02	797	620	22,2	903009.8	1596732	43,4
04	565	623	9,3	879680	1640000	46,3
07	754	600	20,42	682232.4	1274482	46,4
11	791	696	12	708956.8	1335180	46,9

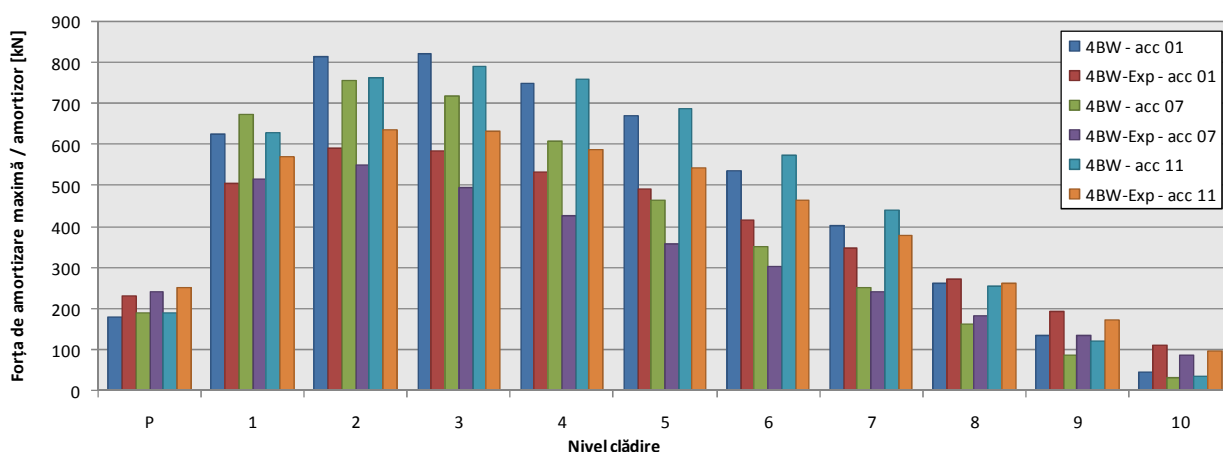


Fig. 7.9 Forțe axiale maxime din amortizorii ȘERB (4BW și 4BW-Exp) pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)

Comparând valorile maxime ale forțelor axiale și energiilor absorbite de amortizori se observă că:

- forțele axiale din amortizori sunt în medie cu 17,02% mai mari în cazul folosirii modelului BW clasic decât în cazul folosirii modelului BW-Exp;

- energiile absorbite de amortizori pe nivel sunt în medie cu 45,34% mai mari în cazul folosirii modelului BW-Exp decât în cazul folosirii modelului BW clasic.

Tab. 7.5 Comparație între diferențele medii la dublarea numărului de amortizori ȘERB

Parametru	Cazuri de comparație		Diferența la dublarea numărului de amortizori
	Diferența medie între 2BW și 2BW-Exp	Diferența medie între 4BW și 4BW-Exp	
Deplasarea relativă de nivel maximă	6,2 %	11,78 %	+ 5,58 %
Viteza relativă de nivel maximă	7,68 %	18,46 %	+ 10,78 %
Accelerația relativă maximă	11,46 %	10,5 %	- 0,96 %
Forța axială maximă din amortizori	16,72 %	17,02 %	+ 0,3 %
Energia absorbită de amortizori	53,8 %	45,34 %	- 8,46 %

În cazul dublării numărului de amortizori ȘERB se observă că media diferențelor între rezultatele obținute cu cele două modele de histererezis este nesemnificativă, variind între 0,3 % și 10,78 % în funcție de parametrul analizat.

Din analiza datelor centralizate tabelar și grafic și prezentate exemplificativ în acest subcapitol, rezultă că folosirea modelului Bouc-Wen-Exp determină obținerea de parametri specifici sistemului de amortizare cu aproximativ 9% - 17%, în medie, mai mari pentru deplasări, viteze, accelerații și forțe de amortizare și cu aproximativ 50% în medie mai mari pentru energia de amortizare pe nivel, față de folosirea modelului Bouc-Wen clasic la modelarea amortizorilor românești ȘERB.

7.2.3 Cazul clădirii echipate cu doi și respectiv patru amortizori ȘERB pe nivel, pe direcția Ox a seismului, modelați cu Bouc-Wen clasic

Pentru a observa efectul dublării numărului de amortizori ȘERB modelați cu modelul BW clasic asupra valorilor parametrilor dinamici ai clădirii supuse la seism, am realizat cu ajutorul aplicației *GenEcAm*, analizele la seism ale clădirii P+10E echipată cu doi și respectiv patru amortizori ȘERB pe fiecare nivel folosind un set de cinci accelerograme de proiectare pentru $T_c = 1,6$ s, realizate cu aplicația *MSIMQKE* [111].

Tab. 7.6 Rezultate pe structura clădirii P+10E cu amortizori ȘERB -2BW și 4BW ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Accelerații relative maxime		
	2BW [mm]	4BW [mm]	Dif. [%]	2BW [m/s]	4BW [m/s]	Dif. [%]	2BW [m/s ²]	4BW [m/s ²]	Dif. [%]
01	21,38	18,33	14,2	0,145	0,144	0,6	6,04	6,00	0,6
02	21,0	19,93	5	0,140	0,140	0	6,07	5,93	2,3
04	21,22	17,61	17	0,135	0,134	0,7	6,24	6,00	3,8
07	20,95	17,34	17,2	0,139	0,115	17,2	6,07	5,55	8,5
11	22,09	18,7	15,3	0,132	0,138	4,3	5,49	6,01	8,6

Din centralizarea datelor prezentate în tab. 7.6 se observă că valorile maxime ale parametrilor răspunsului la seism al clădirii P+10E se micșorează odată cu dublarea numărului de amortizor în medie cu 13,74% pentru deplasările relative de nivel, cu 4,56 % pentru vitezele

relative de nivel și respectiv cu 4,76 % pentru accelerațiile relative, în cazul folosirii modelului BW clasic la modelarea amortizorilor ȘERB. Acest lucru se evidențiază în fig. 7.10 și fig. 7.11, în care am prezentat, cu ajutorul aplicației *ProAnim*, deplasările relative de nivel la timpii la care se ating valorile maxime ale acestora.

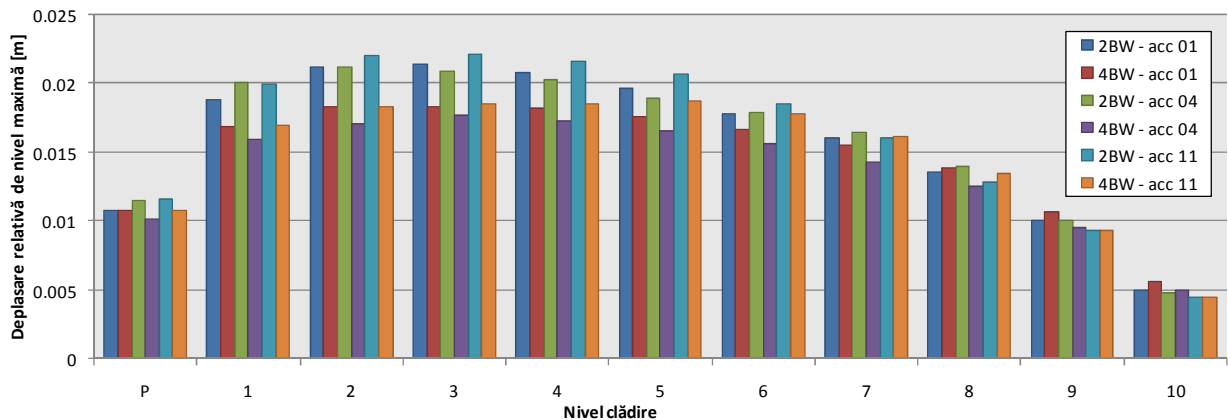


Fig. 7.10 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori ȘERB - 2BW și 4BW ($T_c=1,6$ s)

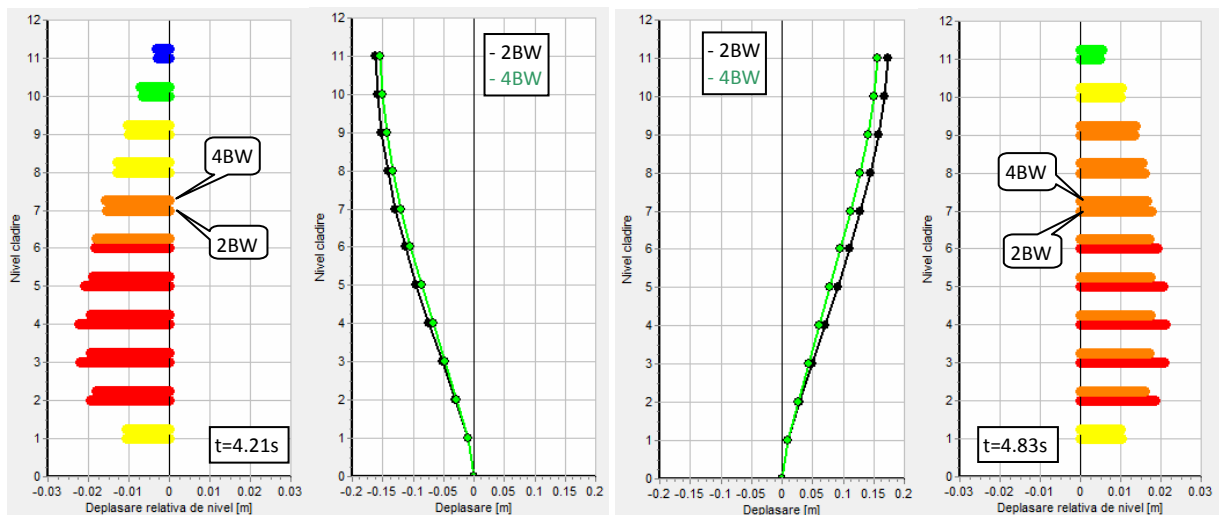


Fig. 7.11 Aplicația *ProAnim* - Deplasări maxime la modelarea cu *GenEcAm* a comportamentului la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW (acc. 01, $T_c=1,6$ s)

În fig. 7.12 se prezintă două exemple de variație a deplasării relative de nivel pe care le-am obținut pentru două acceleroگرامe sintetice de proiectare, la etajul 3 al clădirii considerate la care se obțin valori maxime ale acestor deplasări. Se observă că există diferențe în ceea ce privește mărimea deplasărilor relative de nivel influențate de numărul amortizorilor ȘERB.

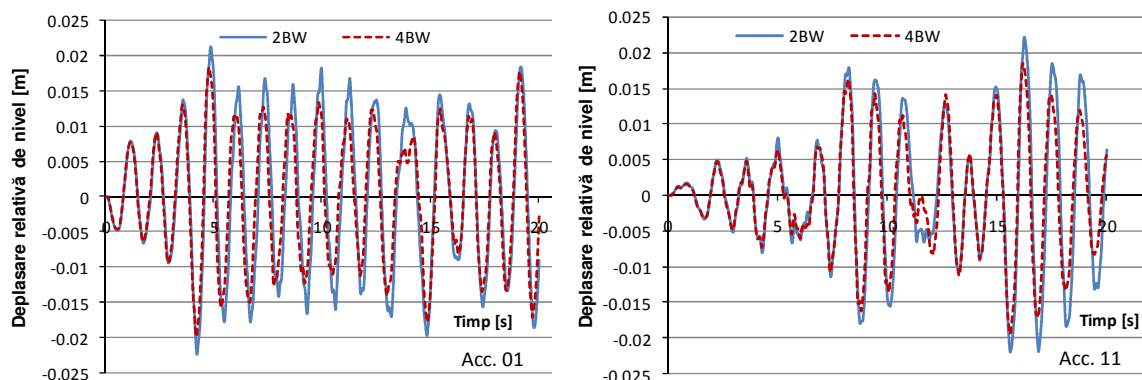


Fig. 7.12 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E

Tab. 7.7 Rezultate pe structura clădirii P+10E cu amortizori ȘERB - 2BW și 4BW ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Forța axială maximă din amortizori			Energia maximă absorbită pe nivel		
	2BW [kN]	4BW [kN]	Dif. [%]	2BW [J]	4BW [J]	Dif. [%]
01	874	822	5,9	533597	921008.1	42
02	845	797	5,6	502798	903009.8	44,3
04	701	565	19,4	455420.6	879680	48,2
07	836	754	9,8	347831.2	682232.4	49
11	909	791	12,9	440118	708956.8	37,9

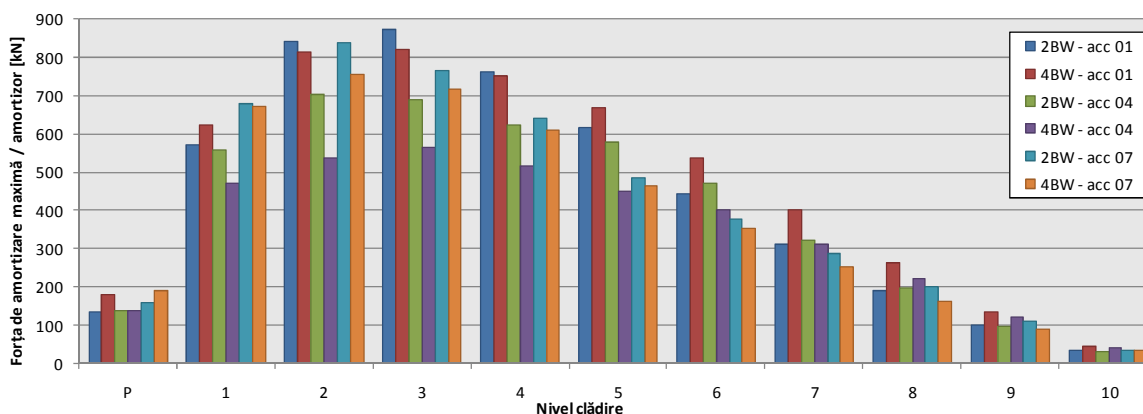


Fig. 7.13 Forțe de amortizare maxime în amortizorii ȘERB (2BW și 4BW) pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)

Comparând valorile maxime ale forțelor axiale (fig. 7.13) și energiilor absorbite de amortizori se observă că în cazul dublării numărului de amortizori ȘERB modelați cu modelul BW clasic forțele axiale maxime sunt în medie cu 10,72% mai mici, iar energiile absorbite pe nivel sunt în medie cu 44,28% mai mari.

7.2.4 Cazul clădirii echipate cu doi și respectiv patru amortizori ȘERB pe nivel, pe direcția Ox a seismului, modelați cu modelul Bouc-Wen-Exp

Pentru a studia efectul dublării numărului de amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp asupra valorilor parametrilor dinamici ai clădirii supuse la seism, am realizat cu ajutorul aplicației *GenEcAm*, analizele la seism ale clădirii P+10E echipată cu doi și respectiv patru amortizori ȘERB pe fiecare nivel folosind același set de cinci accelerograme de proiectare pentru $T_c = 1,6$ s, realizate cu aplicația *MSIMQKE* [111]. Acest studiu comparativ este util pentru a evidenția diferențele între cele două modele: Bouc-Wen clasic și Bouc-Wen-Exp.

Tab. 7.8 Rezultate pe structura clădirii P+10E cu amortizori ȘERB -2BW-Exp și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Deplasări relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Accelerații relative maxime		
	2BW- Exp [mm]	4BW- Exp [mm]	Dif. [%]	2BW- Exp [m/s]	4BW- Exp [m/s]	Dif. [%]	2BW- Exp [m/s ²]	4BW- Exp [m/s ²]	Dif. [%]
01	19,62	16,3	16,9	0,131	0,114	12,9	5,41	5,71	5,2
02	19,7	17,15	12,9	0,130	0,111	14,6	5,39	5,62	4
04	20,20	16,02	20,7	0,127	0,108	14,9	5,73	5,24	8,5
07	19,54	14,67	24,9	0,119	0,103	13,4	4,85	4,80	1
11	20,92	16,9	19,2	0,130	0,109	16,1	5,07	5,02	0,9

Din centralizarea datelor prezentate în tab. 7.8 se observă că valorile maxime ale parametrilor răspunsului la seism al clădirii P+10E se micșorează odată cu dublarea numărului de amortizor în medie cu 18,92 % pentru deplasările relative de nivel, cu 14,38 % pentru vitezele relative de nivel și respectiv cu 3,92 % pentru accelerațiile relative, în cazul folosirii modelului BW-Exp la modelarea amortizorilor ȘERB.

Pentru o vizualizare integrală a diferențelor între deplasările relative de nivel obținute cu aplicația *GenEcAm* la dublarea numărului de amortizori ȘERB modelați cu modelul Bouc-Wen-Exp, în fig. 7.14 se prezintă comparativ valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel pe care le-am obținut la fiecare din cele 11 niveluri ale clădirii considerate, pentru fiecare din cele trei accelerograme sintetice de proiectare folosite pentru studiu.

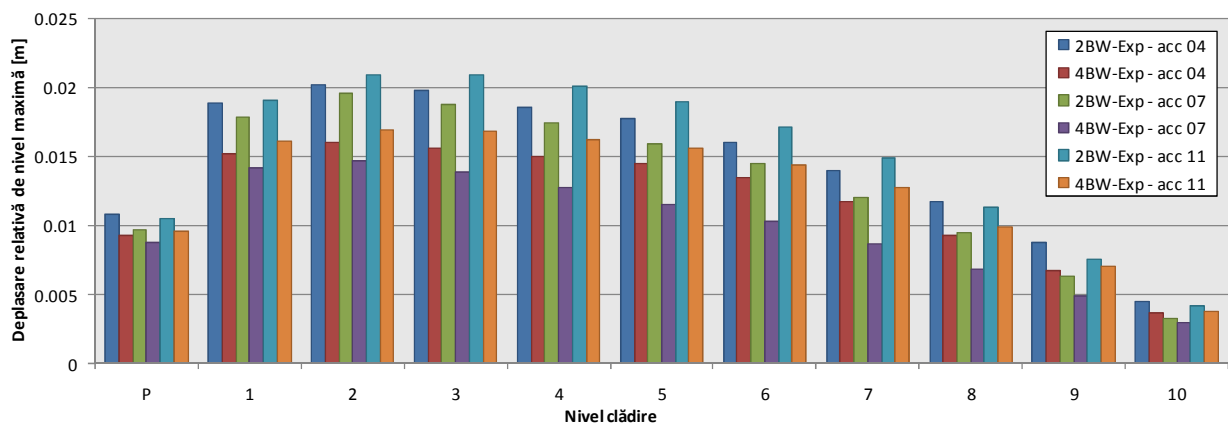


Fig. 7.14 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori ȘERB - 2BW-Exp și 4BW-Exp ($T_c=1,6$ s)

Diferența între deplasările relative de nivel la diferite momente de timp pe durata seismului este evidențiată în fig. 7.15, în care am prezentat, cu ajutorul aplicației *ProAnim*, deplasările relative de nivel la timpii la care se ating valorile maxime ale acestora de o parte și de cealaltă a poziției de echilibru a clădirii analizate.

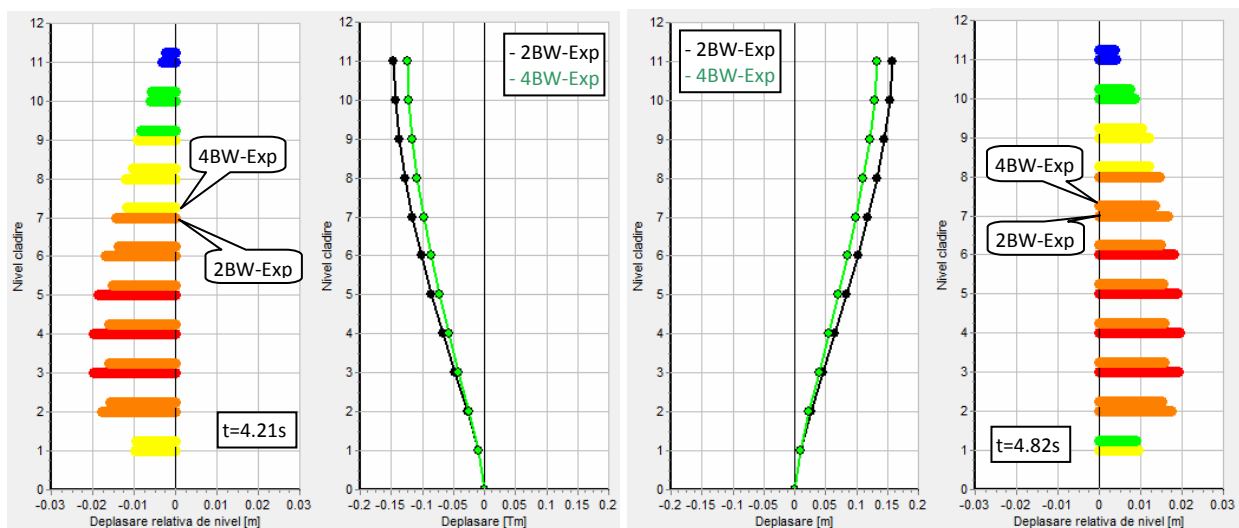


Fig. 7.15 Aplicația *ProAnim* - Deplasări maxime la modelarea cu *GenEcAm* a comportamentului la seism a clădirii P+10E cu amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6$ s)

În fig. 7.16 se prezintă două exemple de variație a deplasării relative de nivel obținute pentru două accelerograme sintetice de proiectare, la etajul 3 al clădirii considerate la care se obțin valori maxime ale acestor deplasări. Se observă că există diferențe în ceea ce privește

mărima deplasărilor relative de nivel influențate de numărul amortizorilor ȘERB.

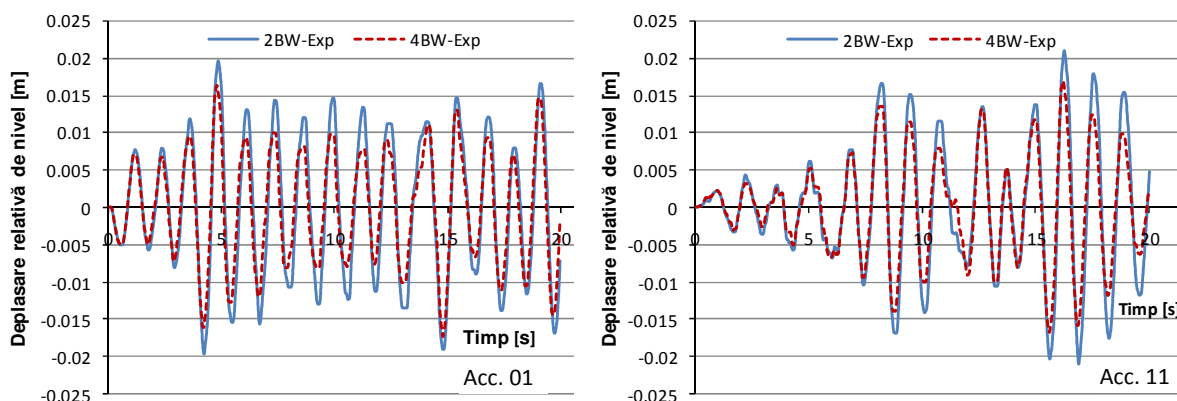


Fig. 7.16 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E

Din fig. 7.16 se observă că deși valorile maxime ale deplasării relative de nivel diferă la dublarea numărului de amortizori ȘERB modelați cu BW-Exp, totuși alura graficului de variație în timp a deplasării relative de nivel se păstrează.

Tab. 7.9 Rezultate pe structura clădirii P+10E cu amortizori ȘERB -2BW-Exp și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Forța axială maximă din amortizori			Energia maximă absorbită pe nivel		
	2BW- Exp [kN]	4BW- Exp [kN]	Dif. [%]	2BW-Exp [J]	4BW-Exp [J]	Dif. [%]
01	650	647	0,4	1134869	1636530	30,6
02	641	620	3,2	1024973	1596732	35,8
04	692	623	9,9	1000039	1640000	39
07	646	600	7,1	830122	1274482	34,8
11	818	696	14,9	932597.9	1335180	30,1

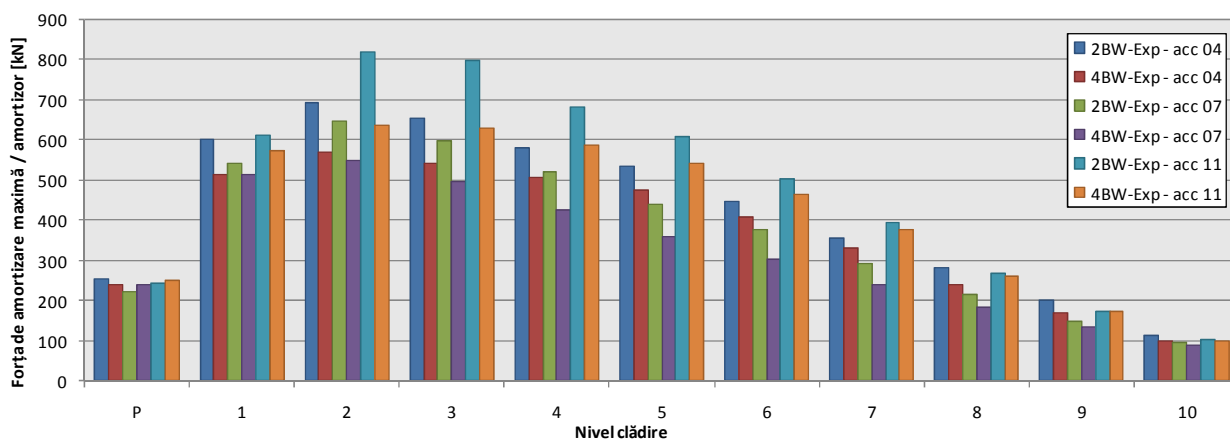


Fig. 7.17 Forțele axiale maxime din amortizorii ȘERB (2BW-Exp și 4BW-Exp) pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)

Comparând valorile maxime ale forțelor axiale și energiilor absorbite de amortizori, prezentate în tab. 7.9 și fig. 7.17, se observă că:

- forțele axiale din amortizori sunt în medie cu 7,1% mai mici în cazul dublării numărului de amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp;
- energiile absorbite de amortizori pe nivel sunt în medie cu 34,06% mai mari în cazul dublării numărului de amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp.

7.2.5 Cazul clădirii echipate pe nivel cu doi amortizori cu fluid vâcos (FV) și respectiv doi amortizori ȘERB (modelați cu Bouc-Wen-Exp), pe direcția Ox a seismului

Pentru a studia eficiența sistemului de amortizare cu amortizori ȘERB am realizat compararea rezultatelor analizei la seism a unei clădiri echipată cu un astfel de sistem de amortizare, cu rezultatele obținute pe aceeași clădire echipată cu un sistem de amortizare uzual folosit, și anume cu amortizori cu fluid vâcos (FV). Pentru aceasta, coeficientul de amortizare c considerat, a fost ales ($c = 10500 \text{ kNs/m}^2$) astfel încât forța maximă de amortizare pe durata seismului să fie aproximativ egală cu forța axială maximă din amortizorii ȘERB.

Tab. 7.10 Rezultate - clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâcos (FV) și 2BW-Exp ($T_c = 1,6 \text{ s}$)

Accele- rograma	Deplasări relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Accelerații relative maxime		
	FV [mm]	2BW-Exp [mm]	Dif. [%]	FV [m/s]	2BW-Exp [m/s]	Dif. [%]	FV [m/s ²]	2BW-Exp [m/s ²]	Dif. [%]
01	19,71	19,62	0,4	0,088	0,131	32,8	3,53	5,41	34,7
02	17,54	19,7	10,9	0,081	0,130	37,6	3,48	5,39	35,4
04	17,04	20,20	15,6	0,077	0,127	39,3	3,04	5,73	46,9
07	15,71	19,54	19,6	0,075	0,119	36,9	3,17	4,85	34,6
11	16,1	20,92	23	0,085	0,130	34,6	2,98	5,07	41,2

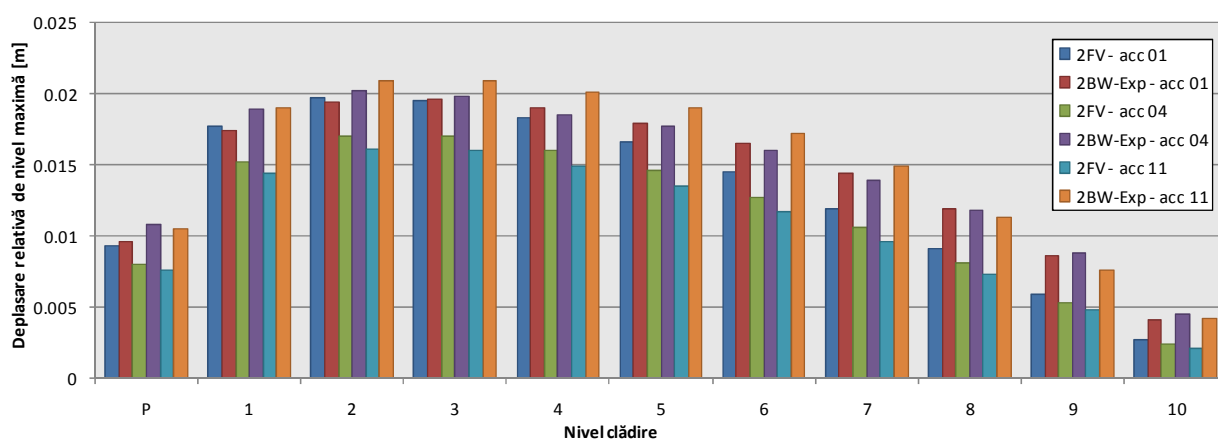


Fig. 7.18 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori cu fluid vâcos (FV) și amortizori ȘERB - 2BW-Exp ($T_c=1,6 \text{ s}$)

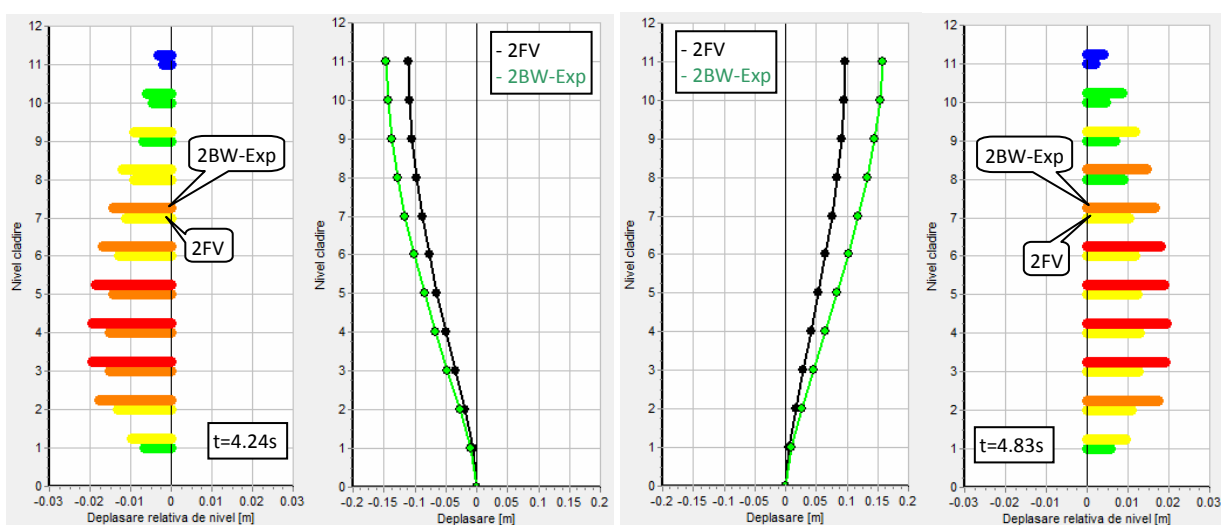


Fig. 7.19 Aplicația ProAnim - Deplasări maxime - clădire P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâcos (FV) și amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6 \text{ s}$)

Din analiza tuturor rezultatelor pe care le-am obținut cu cele cinci accelerograme la modelarea cu *GenEcAm*, din care o parte au fost prezentate în figurile 7.18 – 7.20 și tab. 7.10 se observă că deplasările obținute cu sistemul de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos sunt în medie mai mici cu 13,9% decât deplasările obținute cu sistemul de amortizare ȘERB. În cazul vitezelor diferența este de 36,24% în medie, iar în cazul accelerațiilor este în medie de 38,56%. Am realizat aceleași comparații și pentru forțele axiale și energiile absorbite de amortizori (tab. 7.11 și fig. 7.21).

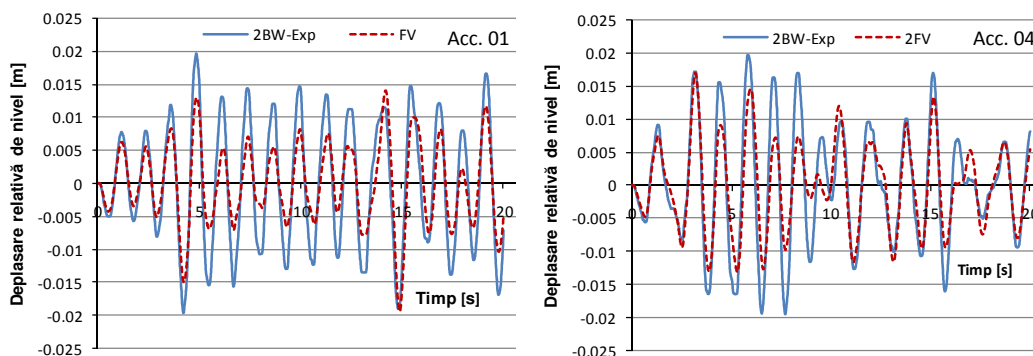


Fig.7.20 Variația în timp a deplasării relative de nivel la etajul 3 al clădirii P+10E

Se observă că graficul variației în timp pentru deplasări are alura asemănătoare pentru ambele sisteme de amortizare, deși valorile maxime diferă în proporție semnificativă. Totuși valoarea maximă a deplasării relative de nivel este în medie cu 13,9% mai mare în cazul amortizorilor ȘERB, dar nu depășește valoarea limită corespunzătoare SLS reprezentând deci o modalitate viabilă de protecție antisismică.

Tab. 7.11 Rezultate - clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâcos și 2BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Forța axială maximă din amortizori			Energia maximă absorbită pe nivel		
	FV [kN]	2BW-Exp [kN]	Dif. [%]	FV [J]	2BW-Exp [J]	Dif. [%]
01	773	650	15,9	1803009	1134869	37
02	653	641	1,8	1743092	1024973	41,1
04	665	692	3,9	1931933	1000039	48,2
07	658	646	1,8	1535852	830122	45,9
11	745	818	8,9	1713761	932597.9	45,5

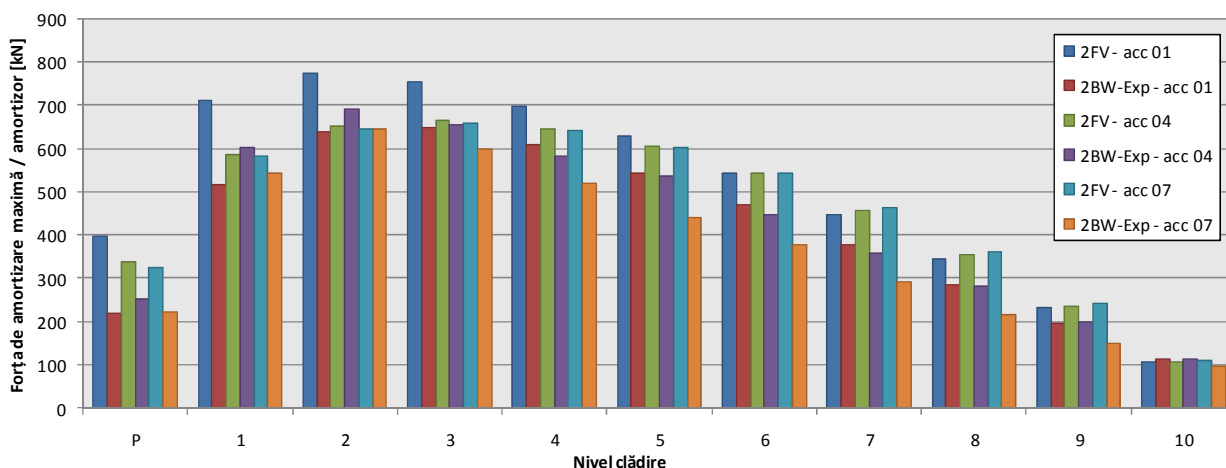


Fig. 7.21 Forțe axiale maxime din amortizorii cu fluid vâcos și amortizorii ȘERB - 2BW-Exp pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)

Comparând valorile maxime ale forțelor și energiilor de amortizare din amortizori, prezentate în tabelul 7.11 și figura 7.21, se observă că:

- forțele axiale din amortizori sunt în medie cu 6,46% mai mari în cazul sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos față de cel cu amortizori ȘERB;
- energiile absorbite de amortizori pe nivel sunt în medie cu 43,54% mai mari în cazul sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos față de cel cu amortizori ȘERB.

7.2.6 Cazul clădirii echipate pe nivel cu doi amortizori cu fluid vâcos (FV) și respectiv patru amortizori ȘERB modelați cu Bouc-Wen-Exp, pe direcția Ox a seismului

7.2.6.1 Analiza cu accelerograme având a_g specific SLS

Așa cum se observă din comparația anterioară, sistemul de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos are performanțe superioare sistemului cu amortizori ȘERB în ceea ce privește protecția antiseismică, când numărul de amortizori este același în ambele sisteme de amortizare. Este interesant de evaluat comparația performanțelor antiseismice ale celor două sisteme de amortizare când sistemul cu amortizori ȘERB are un număr dublu de amortizori pe nivel.

Rezultatele obținute la analiza la seism folosind *GenEcAm* a clădirii P+10E echipată cu cele două variante de sistem de amortizare sunt prezentate centralizat în tabelele 7.12, 7.13 și în figurile 7.22-7.30.

Tab. 7.12 Rezultate - clădire P+10E cu doi amortizori cu fluid vâcos (FV) și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative maxime		
	FV [mm]	4BW-Exp [mm]	Dif. [%]	FV [m/s]	4BW-Exp [m/s]	Dif. [%]	FV [m/s ²]	4BW-Exp [m/s ²]	Dif. [%]
01	19,71	16,3	17,3	0,088	0,114	22,8	3,53	5,71	38,1
02	17,54	17,15	2,2	0,081	0,111	27	3,48	5,62	38
04	17,04	16,02	5,9	0,077	0,108	28,7	3,04	5,24	41,9
07	15,71	14,67	6,6	0,075	0,103	27,1	3,17	4,80	33,9
11	16,1	16,9	4,7	0,085	0,109	22	2,98	5,02	40,6

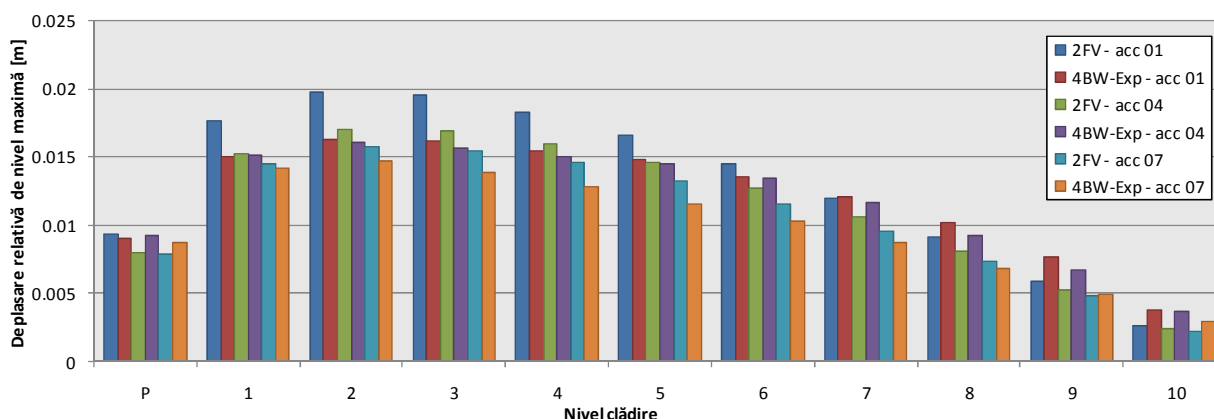


Fig. 7.22 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu doi amortizori cu fluid vâcos (FV) și patru amortizori ȘERB - 4BW-Exp ($T_c=1,6$ s)

Din analiza rezultatelor prezentate în cadrul acestei comparații, se poate concluziona că dublarea numărului de amortizori ȘERB atrage după sine îmbunătățirea performanțelor acestui sistem de amortizare, astfel încât performanțele sale, în ceea ce privește deplasările relative de

nivel, le depășesc în medie cu 7,34% pe cele ale sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos. În ceea ce privește vitezele relative de nivel și accelerațiile relative, acestea sunt mai mari decât cele obținute folosind sistemul de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos în medie cu 25,52% și respectiv cu 38,5%.

Diferența între deplasările relative de nivel la diferite momente de timp pe durata seismului le-am evidențiat în fig. 7.23, în care sunt prezentate, cu ajutorul aplicației *ProAnim*, deplasările relative de nivel la timpii la care se ating valorile maxime ale acestora de o parte și de cealaltă a poziției de echilibru a clădirii analizate.

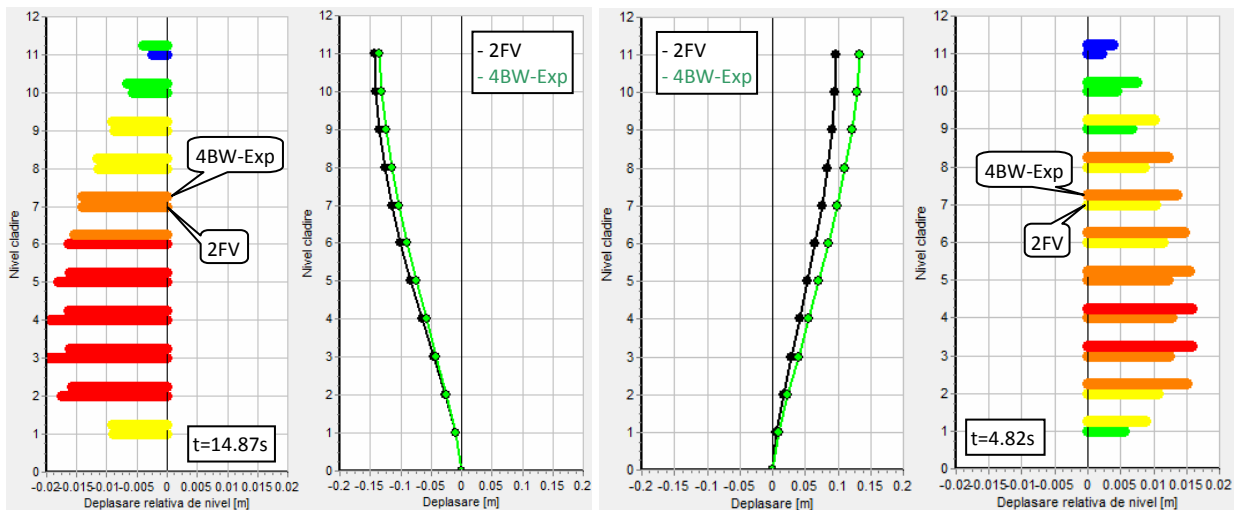


Fig. 7.23 Aplicația ProAnim - Deplasări maxime - clădire P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâcos (FV) și amortizori ̐ERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp (acc. 01, $T_c=1,6$ s)

În fig. 7.24 am prezentat două exemple de variație a deplasării relative de nivel obținute pentru două accelerograme sintetice de proiectare, la etajul 3 al clădirii considerate la care se obțin valori maxime ale acestor deplasări. Se observă că există diferențe în ceea ce privește mărimea deplasărilor relative de nivel influențate de tipul și numărul amortizorilor.

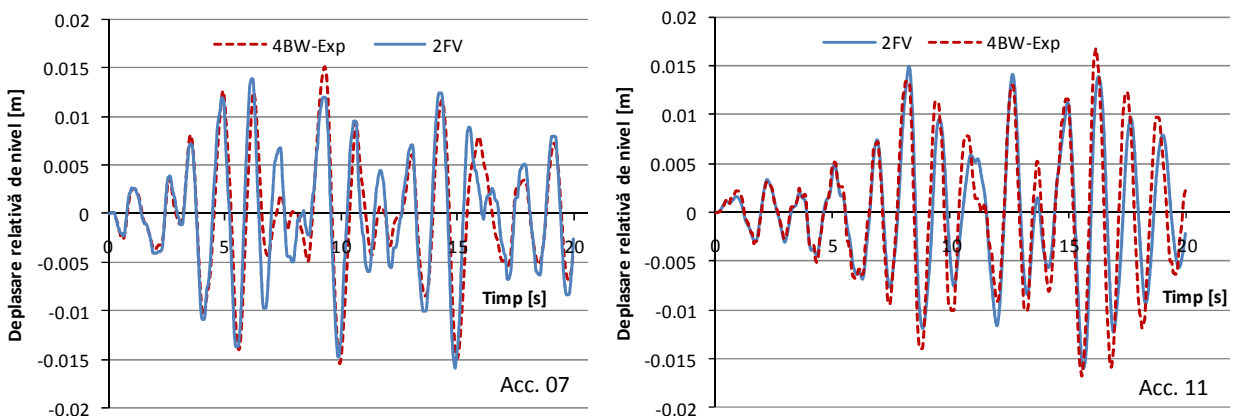


Fig. 7.24 Variația deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E cu doi amortizori cu fluid vâcos pe nivel (FV) și patru amortizori ̐ERB pe nivel (4BW-Exp), pentru accelerogramele 07 și 11 ($T_c = 1,6$ s)

Se observă că graficul variației în timp pentru deplasări are alura asemănătoare pentru ambele sisteme de amortizare, iar valorile maxime sunt apropiate. Deși deplasările relative de nivel obținute cu sistemul de amortizare ̐ERB sunt mai mici decât cele obținute cu sistemul de amortizori cu fluid vâcos, vitezele și accelerațiile sunt mai mari, fapt care arată că energia seismică preluată de clădire este mai mare în cazul sistemului de amortizare ̐ERB.

Pentru un studiu comparativ complet este necesară și compararea forțelor axiale maxime și a energiei absorbite de amortizori specifică fiecărui sistem de amortizare folosit. Acest lucru este util deoarece, forțele axiale din amortizori, în cazul amortizorilor ȘERB, sunt dependente de deplasările relative de nivel, iar în cazul amortizorilor cu fluid vâscos (FV), de vitezele relative de nivel. Rezultatele obținute cu *GenEcAm* sunt sintetizate în tab. 7.13 și figurile 7.25-7.30.

Tab. 7.13 Rezultate - clădire P+10E cu doi amortizori cu fluid vâscos (FV) și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Forța axială maximă din amortizori			Energia totală absorbită de toți amortizorii		
	FV [kN]	4BW-Exp [kN]	Dif. [%]	FV [J]	4BW-Exp [J]	Dif. [%]
01	773	647	16,3	1803009	1636530	9,2
02	653	620	5	1743092	1596732	8,3
04	665	623	6,3	1931933	1640000	15,1
07	658	600	8,8	1535852	1274482	17
11	745	696	6,5	1713761	1335180	22

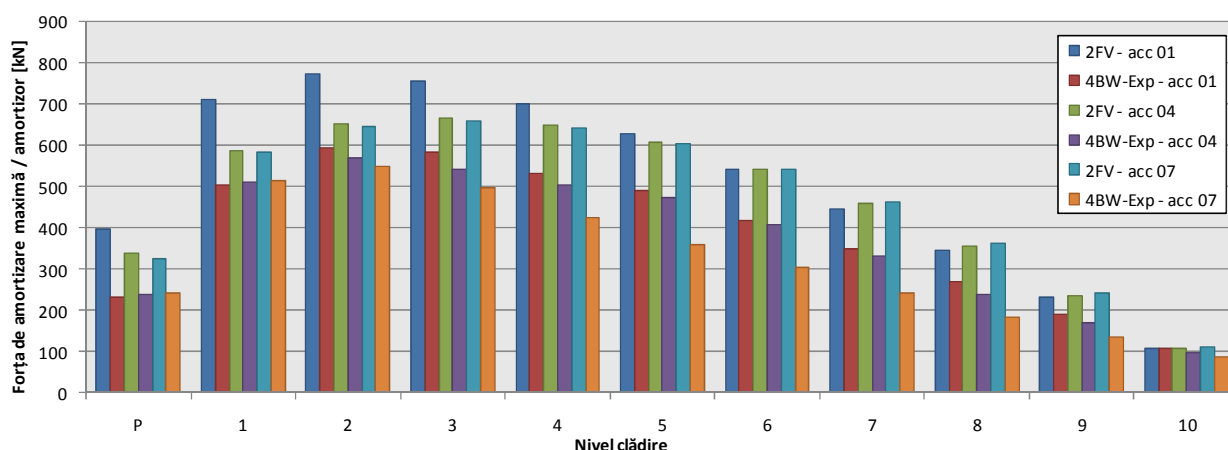


Fig. 7.25 Forțele axiale maxime din amortizorii cu fluid vâscos (FV) și amortizorii ȘERB - 4BW-Exp pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c=1,6$ s)

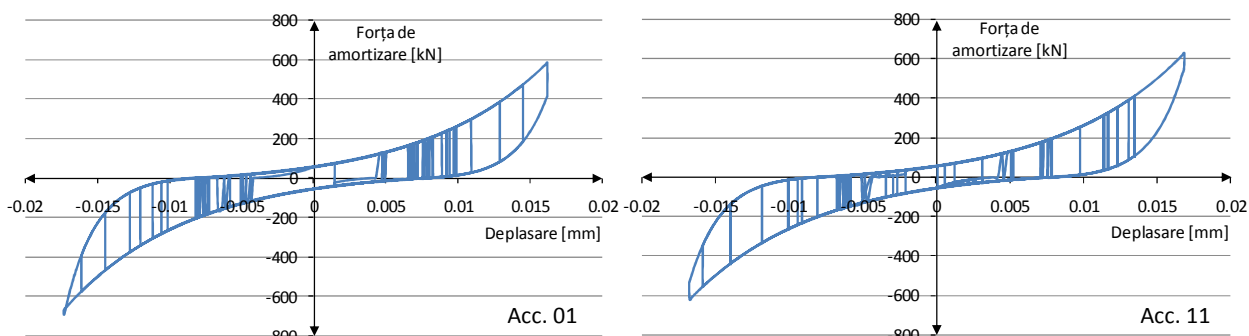


Fig. 7.26 Buclele de histeresis pentru amortizorii ȘERB (BW-Exp) de la etajul 3 (acc. 01 și 11 - $T_c=1,6$ s)

Se observă că forțele axiale maxime din amortizori se obțin la etajele 2 și 3 și acestea sunt mai mari în medie cu 8,58% în cazul amortizorilor cu fluid vâscos decât în cazul amortizorilor ȘERB. Aceasta se datorează faptului că amortizorii ȘERB sunt amortizori cu frecare uscată determinând apariția de forțe axiale proporționale cu deplasarea relativă de nivel. Deși vitezele și accelerațiile relative sunt mai mari în cazul amortizorilor ȘERB, acestea nu influențează valoarea forței axiale.

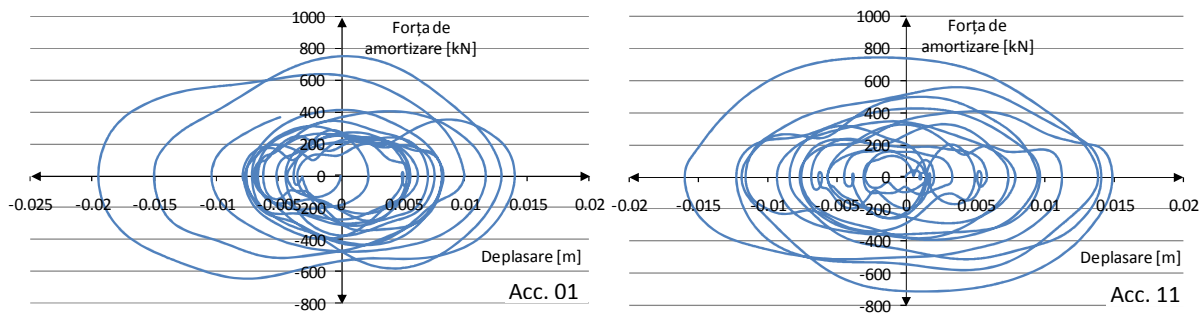


Fig. 7.27 Buclele de histerzis pentru amortizorii cu fluid vâcos de la etajul 3 (acc. 01 și 11 - $T_c=1,6$ s)

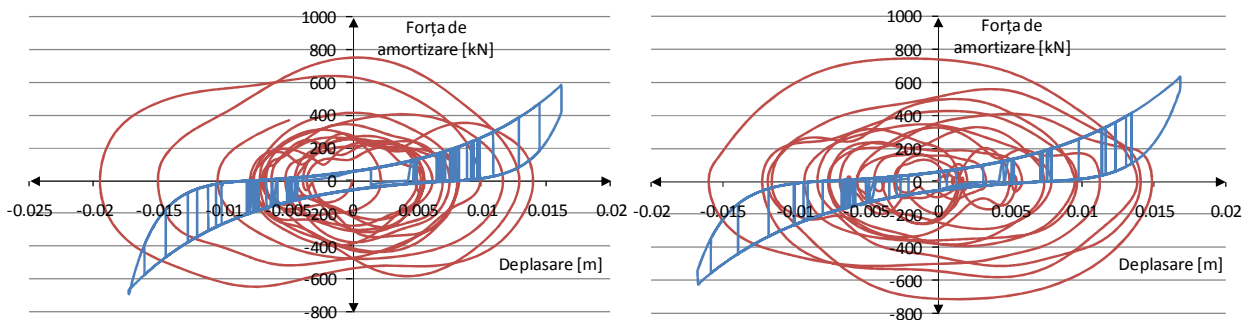


Fig. 7.28 Comparație bucle de histerzis pentru amortizorii ȘERB și cu fluid vâcos de la etajul 3 (acc. 01 - stanga și 11 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s)

În figurile 7.29 și 7.30 sunt prezentate:

- energiile absorbite de amortizorii de la etajul 3;
- energia totală absorbită de toți amortizorii montați pe întreaga clădire.

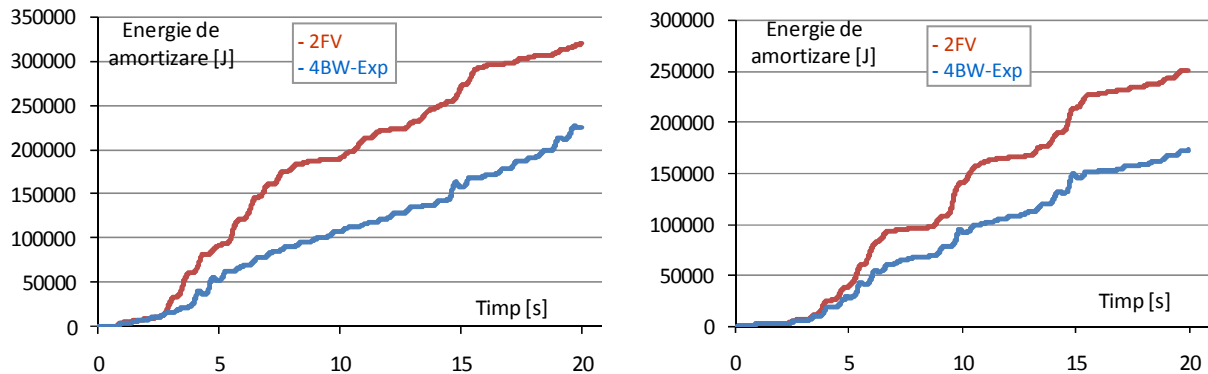


Fig. 7.29 Energii absorbite pe nivel pentru amortizorii de la etajul 3: cu fluid vâcos (FV) și ȘERB modelați cu BW-Exp (acc. 04 - stanga, 07 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s)

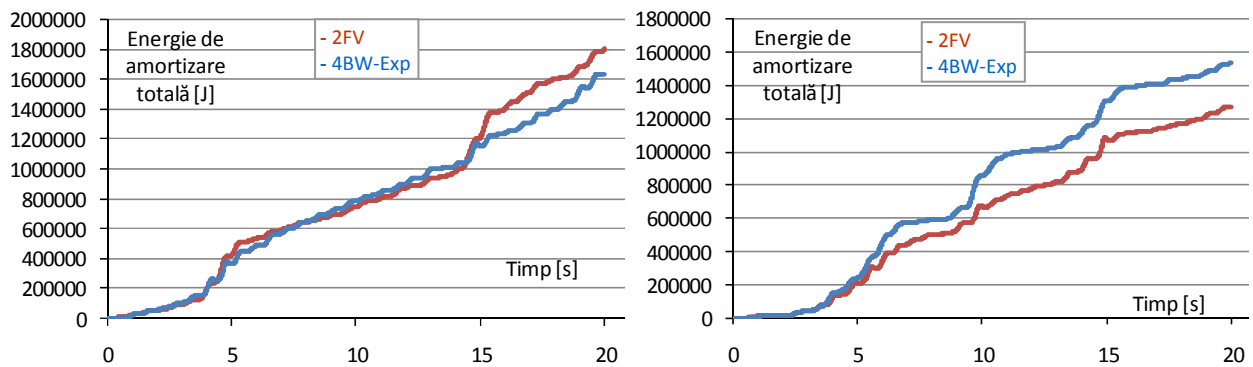


Fig. 7.30 Energia de amortizare totală pentru sistemele de amortizare cu fluid vâcos (FV) și ȘERB modelați cu BW-Exp (acc. 01 - stanga, 07 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s)

Se observă că la etajul 3 unde se obțin valori maxime pentru deplasările relative de nivel, vitezele relative de nivel, forțele axiale din amortizori și energiile absorbite de aceștia pe nivel, energia absorbită pe nivel este mai mare cu 30% în cazul sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos, însă energia totală absorbită este doar cu 14,32% în medie mai mică în cazul sistemului de amortizare ȘERB. Aceasta se datorează faptului că energia absorbită pe nivel corespunzătoare etajelor superioare este mai mare în cazul amortizorilor ȘERB decât în cazul amortizorilor cu fluid vâcos, iar aceasta este cauzată de faptul că deplasările relative de nivel sunt mai mari în cazul folosirii amortizorilor ȘERB decât în cazul folosirii amortizorilor cu fluid vâcos pentru etajele superioare, deși la etajele inferioare situația este inversată.

În concluzie, dublarea numărului de amortizori ȘERB prezintă următoarele avantaje:

- determină costuri cu 50% mai mici decât în cazul folosirii amortizorilor cu fluid vâcos;
- la seism asigură deplasări relative de nivel maxime mai mici în medie cu 7,34% decât în cazul amortizorilor cu fluid vâcos;
- forțele axiale maxime din amortizori sunt în medie cu 8,58% mai mici decât în cazul amortizorilor cu fluid vâcos;
- energia absorbită totală este doar cu 14,32% în medie mai mică decât în cazul amortizorilor cu fluid vâcos;
- constituie un sistem de amortizare valid cu performanțe asemănătoare cu sistemul de amortizare clasic (cu amortizori cu fluid vâcos) la un preț de cost cu 50% mai mic.

7.2.6.2 Analiza cu accelerograme având a_g specific ULS

În cazul în care se face analiza dinamică liniară la seism cu programul *GenEcAm* pentru aceeași clădire P+10, în aceleași condiții cu doi amortizori cu fluid vâcos pe fiecare nivel pe o direcție, cu valoarea întreagă a lui a_g pentru $T_c = 1,6s$, se observă că valorile deplasărilor relative de nivel maxime nu depășesc valoarea maximă specifică SLS în cazul în care se folosesc amortizori cu fluid vâcos cu $c = 10000kNs/m^2$. În tabelele 7.14 și 7.15 sunt prezentate comparativ rezultatele acestor analize pentru ambele variante de echipare a clădirii P+10E (doi amortizori cu fluid vâcos – FV, respectiv patru amortizori ȘERB – 4BW-Exp, pe nivel).

Tab. 7.14 Rezultate - clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâcos și 4BW-Exp ($T_c = 1,6 s$ și $a_g=0,3g$)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative maxime		
	FV [mm]	4BW-Exp [mm]	Dif. [%]	FV [m/s]	4BW-Exp [m/s]	Dif. [%]	FV [m/s ²]	4BW-Exp [m/s ²]	Dif. [%]
03	29.27	25.44	13	0.131	0.144	9	6.088	7.563	19.5
06	29.91	28.01	6.3	0.150	0.171	12.2	6.283	7.247	13.3
07	30.72	27.65	9.9	0.145	0.142	2	6.042	6.907	12.5
09	28.36	28.26	0.3	0.146	0.173	15.6	6.443	8.357	22.9
14	31.12	27.33	12.1	0.131	0.163	19.6	5.715	6.241	8.4

Din analiza rezultatelor prezentate în tab. 7.14 se observă că deplasările relative de nivel maxime sunt foarte apropiate de valoarea maximă admisă specifică SLS (30 mm conform P100-1/2013 pentru o înălțime de nivel de 3 m), fapt care validează folosirea analizei dinamice liniare pentru studiul comportamentului la seism al clădirii echipate cu amortizori antiseismici. De aceea, pentru o configurație de amortizori având parametri și caracteristici calculate astfel încât deplasarea relativă de nivel maximă să nu depășească valoarea maximă specifică SLS, se poate

folosi cu succes aplicația software *GenEcAm* pentru studiul comportamentului la seism al clădirilor echipate antiseismic folosind accelerograme cu $a_g = 0,3g$, cât și pentru determinarea unor configurații și caracteristici optimale ale sistemului de amortizare folosit pentru o anumită clădire.

Și în acest caz în care accelerogramele sunt pentru $a_g = 0,3g$ obținem concluzii similare cu cele obținute pentru cazul anterior cu a_g la jumătate din valoarea întreagă, și anume că, dublarea numărului de amortizori ȘERB atrage după sine îmbunătățirea performanțelor acestui sistem de amortizare, astfel încât performanțele sale, în ceea ce privește deplasările relative de nivel, le depășesc în medie cu 8,32% pe cele ale sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos. În ceea ce privește vitezele relative de nivel și accelerațiile relative, acestea sunt mai mari decât cele obținute folosind sistemul de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos în medie cu 10,88% și respectiv cu 15,32%.

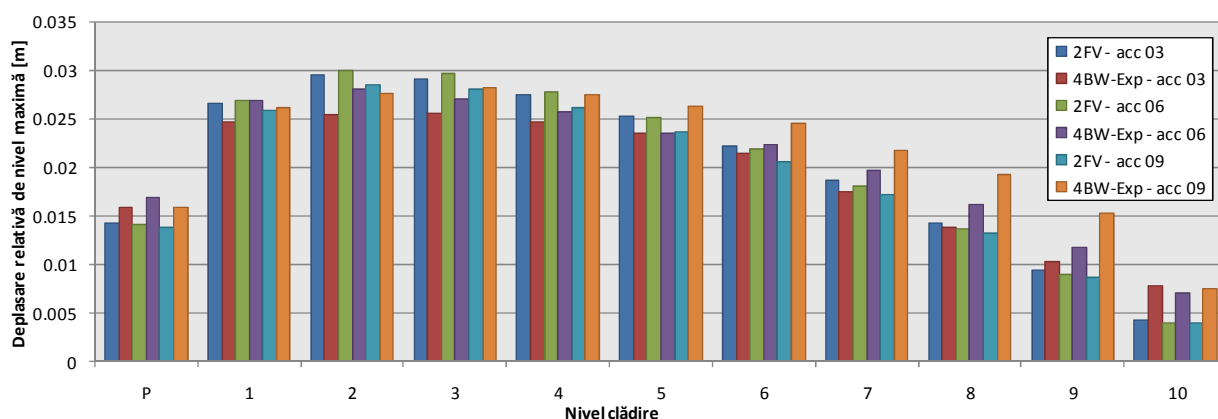


Fig. 7.31 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+10E cu amortizori cu fluid vâcos – FV și amortizori ȘERB - 4BW-Exp ($T_c=1,6$ s și $a_g=0,3g$)

Diferența între deplasările relative de nivel la diferite momente de timp pe durata seismului le-am evidențiat în fig. 7.32, în care sunt prezentate, cu ajutorul aplicației *ProAnim*, deplasările relative de nivel la timpii la care se ating valorile maxime ale acestora de o parte și de cealaltă a poziției de echilibru a clădirii analizate.

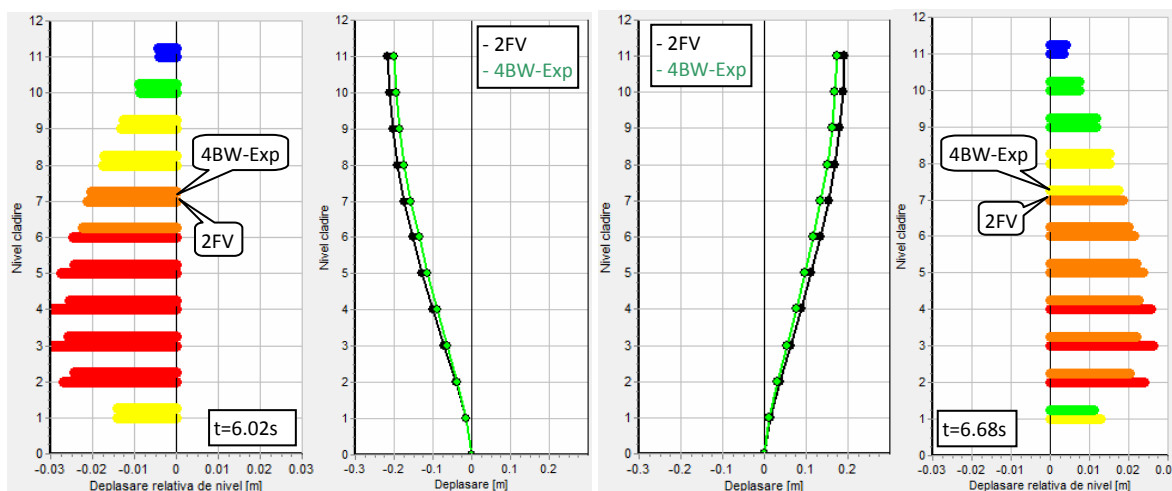


Fig. 7.32 Aplicația ProAnim - Deplasări maxime - clădire P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâcos (FV) și amortizori ȘERB modelați cu modelul teoretic BW-Exp (acc. 06, $T_c=1,6$ s și $a_g=0,3g$)

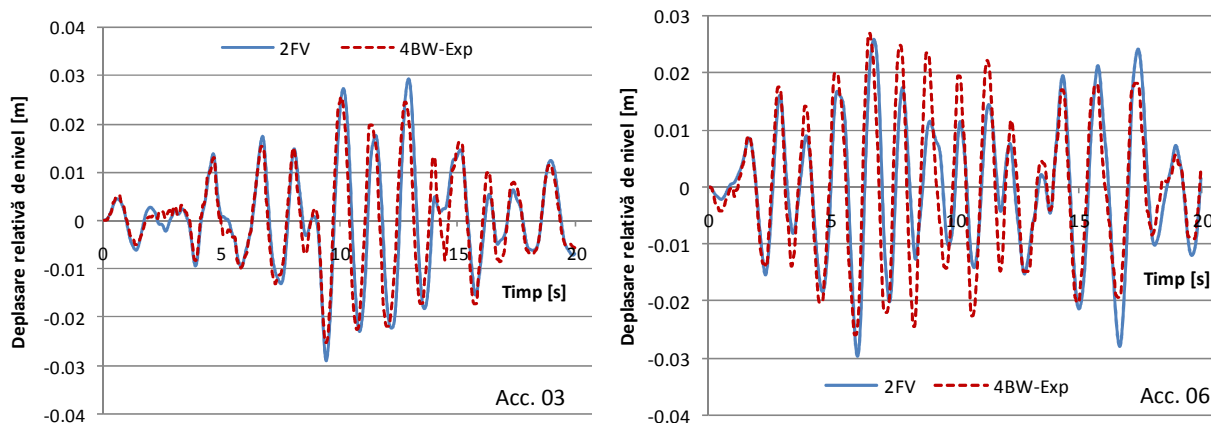


Fig. 7.33 Variația deplasării relative de nivel la et. 3 al clădirii P+10E cu amortizori cu fluid vâcos și ȘERB – 4BW-Exp, pentru accelerogramele 03 și 06 ($T_c = 1,6$ s și $a_g = 0,3g$)

Din graficul variației în timp pentru deplasări din fig. 7.33 se observă că acestea sunt asemănătoare pentru ambele sisteme de amortizare, iar valorile maxime sunt apropiate. Ca și în cazul anterior în care accelerogramele aveau a_g la jumătate din valoarea întreagă se observă că deși deplasările relative de nivel obținute cu sistemul de amortizare ȘERB sunt mai mici decât cele obținute cu sistemul de amortizori cu fluid vâcos, vitezele și accelerațiile sunt mai mari, fapt care arată că energia seismică preluată de clădire este mai mare în cazul sistemului de amortizare ȘERB.

În continuare sunt prezentate comparativ rezultatele obținute cu programul *GenEcAm* la modelarea comportamentului la seism a clădirii P+10E în cele două variante de echipare antisismică, cu accelerograme având $a_g = 0,3g$, evidențiindu-se valoarea maximă a forței axiale din amortizori și valoarea maximă a energiei absorbite de aceștia.

Tab. 7.15 Rezultate - clădire P+10E cu amortizori cu fluid vâcos și 4BW-Exp ($T_c = 1,6$ și $a_g = 0,3g$)

Accele- rograma	Forța axială maximă din amortizori			Energia maximă absorbită de amortizori		
	FV [kN]	4BW-Exp [kN]	Dif. [%]	FV [J]	4BW-Exp [J]	Dif. [%]
03	1326	1258	5.1	857479.4	559854.5	34.7
06	1508	1516	0.5	1163602	900898.7	22.5
07	1445	1512	4.4	1051571	701495.1	33.2
09	1476	1596	7.5	1294105	788756.4	39
14	1316	1478	10.9	1048867	729539	30.4

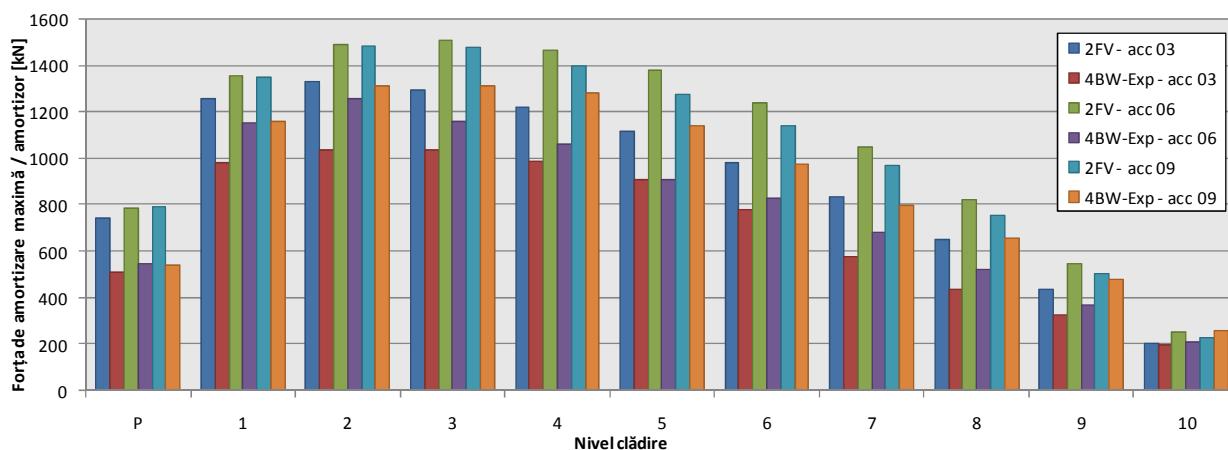


Fig. 7.34 Forțe axiale maxime din amortizorii cu fluid vâcos și amortizorii ȘERB - 4BW-Exp pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($T_c = 1,6$ s și $a_g = 0,3g$)

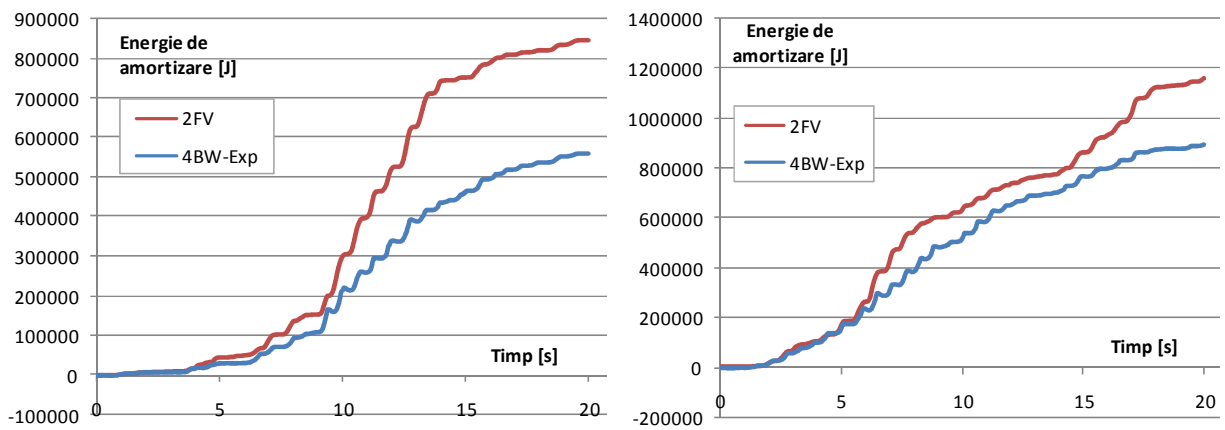


Fig. 7.35 Energiile absorbite de amortizorii de la etajul 3: cu fluid vâcos (FV) și ȘERB modelați cu BW-Exp (acc. 03 - stânga, 06 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s și $a_g=0,3g$)

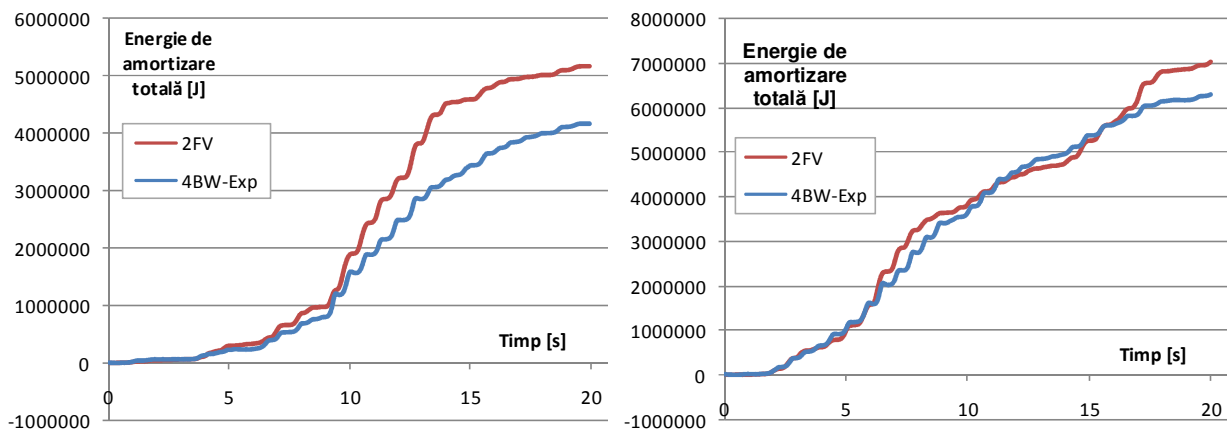


Fig. 7.36 Energia totală absorbită pentru sistemele de amortizare cu fluid vâcos (FV) și ȘERB modelați cu BW-Exp (acc. 03 - stânga, 06 – dreapta; pentru $T_c=1,6$ s și $a_g=0,3g$)

Se observă că forțele axiale maxime se obțin la etajele 2 și 3 și acestea sunt mai mici în medie cu 3,64% în cazul amortizorilor cu fluid vâcos decât în cazul amortizorilor ȘERB.

Și în acest caz deplasările relative de nivel sunt mai mari la etajele superioare în cazul amortizorilor ȘERB decât în cazul amortizorilor cu fluid vâcos, fapt care conduce la forțe axiale din amortizorii corespunzători etajelor superioare mai mari în cazul amortizorilor ȘERB decât în cazul amortizorilor cu fluid vâcos.

La fel ca în cazul analizei cu accelerograme specifice SLS și în acest caz, se observă că la etajul 3 unde se obțin valori maxime pentru deplasările relative de nivel, vitezele relative de nivel, forțele axiale și energiile absorbite de amortizori pe nivel, energia absorbită pe nivel este mai mare cu 31,96% în cazul sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos, însă energia totală absorbită de întregul sistem de amortizori este doar cu 14,97% în medie mai mică în cazul sistemului de amortizare ȘERB.

Concluziile care se desprind în urma analizei dinamice liniare folosind un set de cinci accelerograme având $a_g = 0,3g$, pentru clădirea în cadre din beton armat P+10E, sunt următoarele:

- pentru o configurație de amortizori având parametri și caracteristici calculate astfel încât deplasarea relativă de nivel maximă să nu depășească valoarea maximă specifică SLS, se poate folosi cu succes aplicația software *GenEcAm* pentru studiul comportamentului la seism al clădirilor echipate antiseismic folosind accelerograme cu $a_g = 0,3g$, cât și pentru determinarea unor configurații și caracteristici optime ale sistemului de amortizare folosit pentru o anumită clădire;

- dublarea numărului de amortizori ȘERB atrage după sine îmbunătățirea performanțelor acestui sistem de amortizare, astfel încât performanțele sale, în ceea ce privește deplasările relative de nivel, le depășesc în medie cu 8,32% pe cele ale sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâscos, iar în ceea ce privește vitezele relative de nivel și accelerațiile relative, acestea sunt mai mari decât cele obținute folosind sistemul de amortizare cu amortizori cu fluid vâscos în medie cu 10,88% și respectiv cu 15,32%. Dublarea numărului de amortizori ȘERB determină costuri cu 50% mai mici decât în cazul folosirii amortizorilor cu fluid vâscos;
- deplasările relative de nivel obținute cu sistemul de amortizare ȘERB sunt mai mici decât cele obținute cu sistemul de amortizori cu fluid vâscos, vitezele și accelerațiile sunt mai mari, fapt care arată că energia seismică preluată de clădire este mai mare în cazul amortizorilor ȘERB;
- forțele axiale maxime din amortizori se obțin la etajele 2 și 3 și acestea sunt mai mici în medie cu 3,64% în cazul amortizorilor cu fluid vâscos decât în cazul amortizorilor ȘERB;
- energia absorbită pe nivel este mai mare cu 31,96% în cazul sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâscos, însă energia totală absorbită de întregul sistem de amortizori este doar cu 14,97% în medie mai mică în cazul sistemului de amortizare ȘERB;
- sistemul de amortizare ȘERB constituie un sistem de amortizare valid cu performanțe asemănătoare cu sistemul de amortizare clasic (cu amortizori cu fluid vâscos) la un preț de cost cu 50% mai mic.

7.3 Evaluarea performanțelor antiseismice ale amortizorilor ȘERB pentru fundație

Pentru modelarea sistemului de izolare seismică a bazei clădirilor, programul *GenEcAm* permite două variante de modelare:

- varianta 1 – introducerea modelului teoretic de histerezis pentru izolatorii de sub stâlpi, folosindu-se pentru aceasta modelul Bouc-Wen clasic;
- varianta 2 – specificarea perioadei fundamentale a clădirii izolate seismic și coeficientul de amortizare vâscoasă specific sistemului de amortizare.

Pentru a realiza studiul comparativ al performanțelor sistemului de amortizare ȘERB montat în bază în paralel cu sistemul de izolare seismică, am ales pentru comparație, conform P100-1/2013, perioada fundamentală a clădirii izolate seismic $T_I = 3$ s și coeficientul de amortizare vâscoasă $\beta = 30\%$ pentru sistemul de izolare seismică al clădirii P+10E analizată în acest capitol.

Am efectuat pentru comparație 3 cazuri de analiză cu programul *GenEcAm*:

- cazul 1 - structura P+10E izolată seismic și fără sistem de amortizare suplimentar;
- cazul 2 - structura P+10E izolată seismic și cu sistem cu amortizori cu fluid vâscos montați, în bază, în paralel cu sistemul de izolare seismică;
- cazul 3 - structura P+10E izolată seismic și cu sistem de amortizare ȘERB telescopic montat, în bază, în paralel cu sistemul de izolare seismică.

Am ales un set de trei accelerograme generate cu programul *MSIMQKE* [111] pentru $T_c = 1,6$ s și $a_g = 0,3g$. Cele două sisteme de amortizare conțin, pentru studiul de față, câte un amortizor pentru fiecare izolator al clădirii, deci clădirea cu 16 stâlpi va avea 16 izolatori seismici și 16 amortizori montați în bază.

În programul *GenEcAm*, pentru amortizorii cu fluid vâcos am calculat coeficientul $c = 300000 \text{ Ns/m}^2$, iar pentru amortizorii ȘERB am folosit modelul Bouc-Wen Papion (BW Papion) având următorii parametri: $A = -4,3$, $\beta = 5,2$, $F_0 = 1$, $F_d = 100000$ și $y_d = 0,4$.

În tab. 7.16 am prezentat comparativ rezultatele obținute cu programul *GenEcAm* pentru cele trei cazuri de echipare antiseismică în bază a clădirii P+10E izolată seismic supusă acțiunii seismice modelate prin intermediul setului de accelerograme ales.

Tab. 7.16 Rezultate clădire P+10E izolată – a) fără amortizori și b) cu amortizori cu fluid vâcos (FV)

Accele- rograma	Deplasari relative maxime			Viteze relative maxime			Acceleratii relative maxime		
	Fără Am. [m]	FV [m]	Dif. [%]	Fără Am. [m/s]	FV [m/s]	Dif. [%]	Fără Am. [m/s ²]	FV [m/s ²]	Dif. [%]
01	0,28	0,18	35,7	0,94	0,70	25,5	4,1	3,35	18,2
04	0,30	0,20	33,3	0,79	0,59	25,3	4	3,45	13,7
11	0,315	0,215	31,7	0,80	0,61	23,7	3,9	3,50	10,2

Se observă că adăugarea sistemului de amortizare cu amortizori vâcoși în bază conduce la micșorarea deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative maxime în medie cu 33,56%, 24,83% și respectiv 14,03%.

În fig. 7.37 am prezentat două exemple de variație a deplasării relative a clădirii, obținute pentru două accelerograme sintetice de proiectare. Se observă că există diferențe în ceea ce privește mărimea deplasărilor relative influențate de tipul amortizorilor montați în bază în paralel cu sistemul de amortizare seismică.

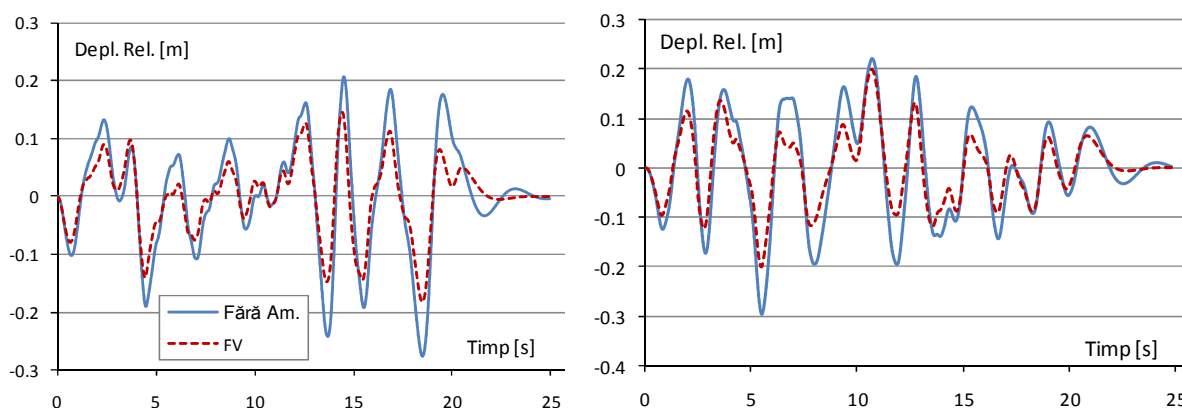


Fig. 7.37 Comparație deplasări relative ale clădirii P+10E - cazul 1 și cazul 2 (accelerogramele 01 și 04)

Din fig. 7.37 se observă că graficele de variație în timp a deplasărilor relative în cele două cazuri de analiză au forme asemănătoare, reducerea deplasărilor observându-se numai la capetele de cursă ale clădirii.

Pentru a evidenția performanțele antiseismice ale amortizorilor telescopici ȘERB montați în fundație, în tab. 7.17 am prezentat comparativ rezultatele obținute cu aplicația *GenEcAm* în două cazuri de analiză ale clădirii izolate seismic: cu amortizori ȘERB și fără amortizori.

Tab. 7.17 Rezultate clădire P+10E izolată - cazul 1 (fără amortizori) și cazul 3 (cu amortizori ȘERB)

Accele- rograma	Deplasari relative maxime			Viteze relative maxime			Acceleratii relative maxime		
	Fără Am. [mm]	ȘERB [mm]	Dif. [%]	Fără Am. [m/s]	ȘERB [m/s]	Dif. [%]	Fără Am. [m/s ²]	ȘERB [m/s ²]	Dif. [%]
01	0,28	0,155	44,6	0,94	0,67	28,7	4,1	3,2	21,9
04	0,30	0,165	45	0,79	0,60	24	4	4	0
11	0,315	0,169	46,3	0,80	0,60	25	3,9	3,9	0

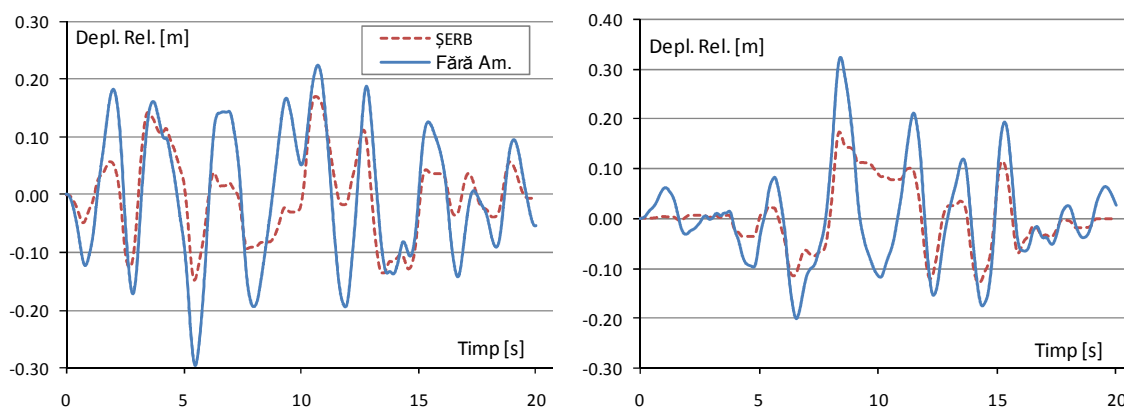


Fig. 7.38 Comparație deplasări relative ale clădirii P+10E - cazul 1 și cazul 3 (accelerogramele 04 și 11)

Utilizarea sistemului de amortizare cu amortizori telescopici în bază conduce la micșorarea deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative maxime în medie cu 45,3%, 25,9% și respectiv 7,3%, observându-se modificări ale alurei variației deplasărilor în timp (fig. 7.38).

Pentru a evidenția comparativ performanțele antisismice ale celor două sisteme de amortizare (cu fluid vâscos și ȘERB), în tab. 7.18 am prezentat deplasările, vitezele și accelerațiile relative maxime obținute cu *GenEcAm* pentru cele două cazuri analizate, iar în fig. 7.39 am prezentat comparativ variația deplasărilor relative în timp pe durata seismului.

Tab. 7.18 Rezultate clădire P+10E izolată - amortizori cu fluid vâscos și amortizori ȘERB

Accele- rograma	Deplasari relative maxime			Viteze relative maxime			Accelerații relative maxime		
	FV [mm]	ȘERB [mm]	Dif. [%]	FV [m/s]	ȘERB [m/s]	Dif. [%]	FV [m/s ²]	ȘERB [m/s ²]	Dif. [%]
01	0,18	0,155	13,8	0,70	0,67	4,2	3,35	3,2	4,4
04	0,20	0,165	17,5	0,59	0,60	1,6	3,45	4	13,7
11	0,215	0,169	21,3	0,61	0,60	1,6	3,50	3,9	10,2

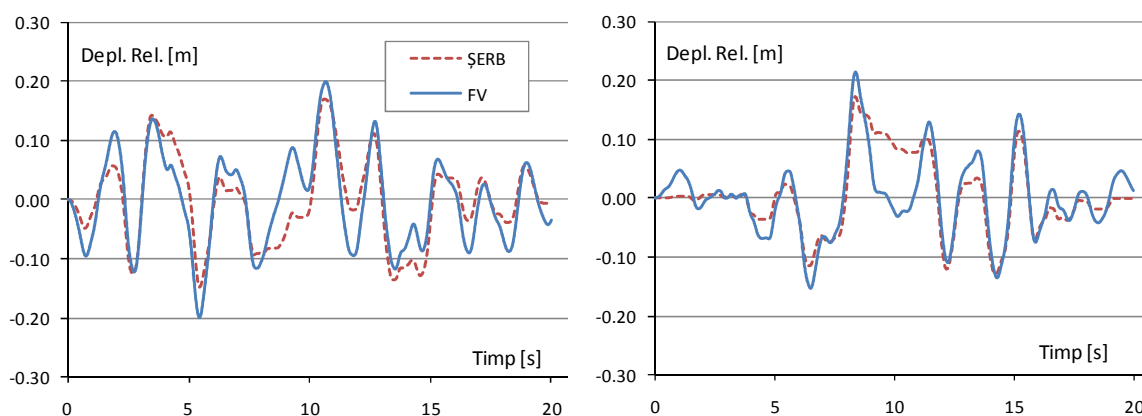


Fig. 7.39 Comparație deplasări relative ale clădirii P+10E - cazul 2 și cazul 3 (acc. 04 și 11)

În urma comparării rezultatelor obținute cu cele două sisteme de amortizare montate în fundație în paralel cu sistemul de izolatori se observă:

- micșorarea deplasărilor relative maxime în medie cu 17,5% față de cazul sistemului de amortizare cu amortizori vâscoși;
- micșorarea valorilor maxime ale vitezelor relative în medie cu 1,4% față de cazul sistemului de amortizare cu amortizori vâscoși;

- creșterea accelerațiilor relative maxime în medie cu 6,5% în cazul amortizorilor telescopici ȘERB față de cazul sistemului de amortizare cu amortizori vâscoși.

Așa cum se observă din comparațiile pe care le-am prezentat, deplasările, vitezele și accelerațiile relative sunt apropiate pentru cele două sisteme de amortizare folosite în fundație, dar pentru un studiu complet este necesară și compararea forțelor axiale și energiilor absorbite de amortizori.

Tab. 7.19 Rezultate clădire P+10E izolată - amortizori cu fluid vâscos (FV) și amortizori ȘERB

Accele- rograma	Forța axială maximă din amortizori			Energia maximă absorbită de amortizori		
	FV [kN]	ȘERB [kN]	Dif. [%]	FV [J]	ȘERB [J]	Dif. [%]
01	210	220	4,5	420000	450000	6,6
04	180	239	24,6	510000	540000	5,5
11	180	240	25	370000	360000	2,7

Din tab. 7.19 se observă că valorile maxime ale forțelor axiale din amortizori pentru sistemul de amortizare ȘERB sunt în medie cu 18,03% mai mari decât cele corespunzătoare amortizorilor vâscoși. Energia absorbită per amortizor are valori apropiate pentru ambele tipuri de amortizori diferența fiind în medie de 3,13% (fig. 7.35).

În fig. 7.40 am prezentat pentru comparație buclele de histerezis ale celor două tipuri de amortizori obținute cu ajutorul programului *GenEcAm*, iar în fig.7.41 variația energiilor totale absorbite pentru cele două tipuri de amortizori.

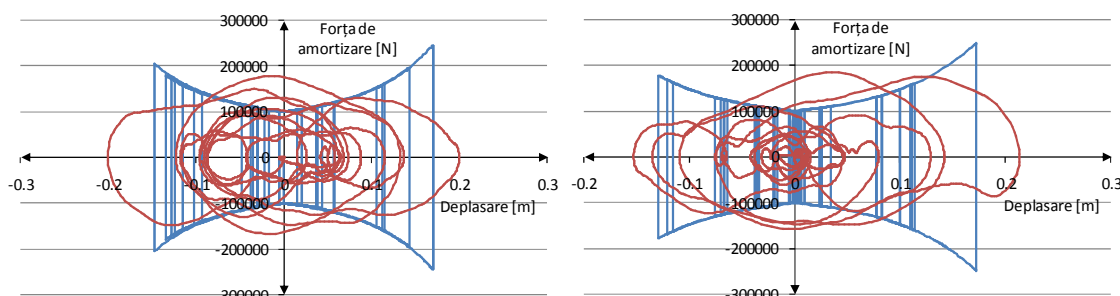


Fig. 7.40 Comparație bucle de histerezis - cazul 2 și cazul 3 (acc. 04 și 11)

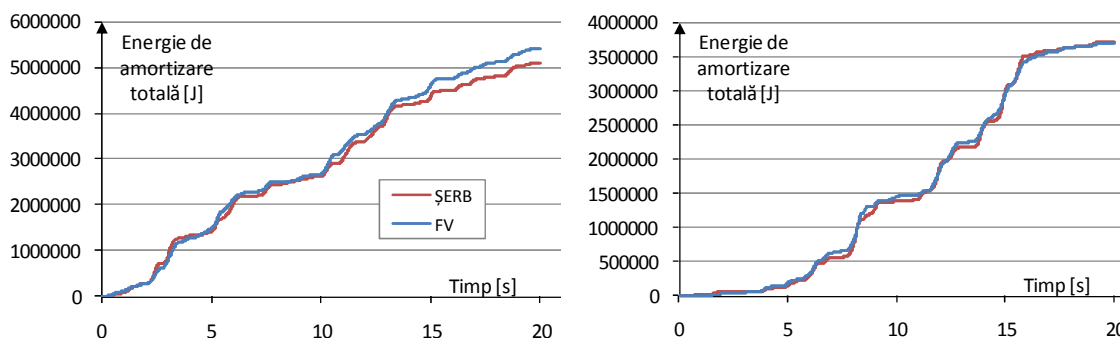


Fig. 7.41 Comparație energie totală absorbită de amortizori - cazul 2 și cazul 3 (acc. 04 și 11)

Analizând rezultatele oferite de programul *GenEcAm* pentru sistemele de amortizare ȘERB telescopic și cu fluid vâscos montate în paralele cu sistemul de izolare seismică, putem concluziona că prezența oricăruia din aceste sisteme de amortizare sporește gradul de amortizare al structurii, fapt care conduce la micșorarea deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative.

Sistemul de amortizare ȘERB telescopic are performanțe ușor superioare sistemului de amortizori cu fluid vâscos în ceea ce privește deplasările și vitezele relative (diferențele fiind în jur de 10%), iar în privința accelerațiilor relative, acestea sunt în medie cu 10% mai mari decât în cazul folosirii sistemului de amortizori cu fluid vâscos.

7.4 Concluzii

În acest capitol am prezentat studii comparative realizate în scopul determinării eficienței sistemelor de amortizare cu amortizori ȘERB montați la suprastructură sau în fundație în paralel cu sistemul de izolare seismică. Eficiența în protecția seismică a acestor sisteme de amortizare a fost evaluată prin comparație cu performanțele antiseismice ale sistemului clasic de amortizare la suprastructură sau în fundație, care folosește amortizori cu fluid vâscos.

Pentru modelarea amortizorilor ȘERB montați la suprastructură am folosit două modele matematice: modelul clasic Bouc-Wen și modelul Bouc-Wen-Exp propus pentru prima dată în această lucrare.

Analizele comparative au fost realizate cu programul *GenEcAm* creat de autor în scopul modelării amortizorilor cu bucle histeretice speciale care nu pot fi modelate de programele comerciale de analiză cu elemente finite.

În urma analizei volumului imens de date obținute cu *GenEcAm*, din care o parte au fost centralizate în acest capitol sub formă de tabele și grafice, se pot concluziona următoarele în cazul folosirii accelerogramelor având a_g specific SLS (jumătate din 0,3g):

- modelul teoretic Bouc-Wen-Exp propus în acest studiu pentru modelarea adecvată a comportamentului amortizorilor ȘERB conduce la obținerea de deplasări relative de nivel maxime în medie cu 6,2% mai mici decât cele obținute cu modelul Bouc-Wen clasic. În cazul vitezelor relative de nivel diferența este în medie de 7,68%, iar în cazul accelerațiilor relative diferența este în medie de 11,46%;
- folosirea modelului Bouc-Wen-Exp determină rezultate mai apropiate de realitate deoarece modelează adecvat bucla de histerezis reală determinată experimental, care descrie comportamentul amortizorilor de suprastructură ȘERB;
- prețul de cost al unui amortizor ȘERB reprezintă doar 25% din prețul de cost al unui amortizor cu fluid vâscos, fapt care implică micșorarea prețului de cost al unei clădiri astfel echipate;
- prețul de cost scăzut al amortizorilor ȘERB permite mărirea numărului de amortizori folosiți în sistemul de amortizare al structurii;
- dublarea numărului de amortizori ȘERB amplifică diferența între rezultatele obținute folosind modelul Bouc-Wen-Exp față de cele obținute folosind modelul Bouc-Wen clasic, în ceea ce privește deplasările și vitezele relative de nivel maxime cu 5,5% respectiv 10,78%. Forța axială maximă din amortizori diferă în funcție de modelul de histerezis folosit cu aproximativ 0,3%, cele obținute cu modelul Bouc-Wen-Exp fiind mai mici;
- energia maximă absorbită pe nivel este cu aproximativ 50% mai mare în cazul folosirii modelului teoretic Bouc-Wen-Exp față de cazul folosirii modelului Bouc-Wen clasic;
- modelul Bouc-Wen clasic nu modelează adecvat comportamentul amortizorilor ȘERB în timpul seismului putând fi folosit doar pentru obținerea de rezultate cu un grad mai puțin ridicat de aproximare;
- dublarea numărului de amortizori ȘERB are ca efect micșorarea valorii maxime ale deplasării relative de nivel în medie cu 18,92%, cu 14,38% pentru vitezele relative de nivel și cu 3,92

pentru accelerația relativă maximă. Energia absorbită pe nivel crește în acest caz în medie cu 34,06%, iar forța axială maximă din amortizori scade în medie cu 7,1%. Deci mărirea numărului de amortizori ȘERB reprezintă o variantă recomandată de amplificare a performanțelor antiseismice ale sistemului de amortizare ȘERB;

- la compararea performanțelor antiseismice a celor două sisteme de amortizare (ȘERB și cu amortizori cu fluid vâcos, având același număr de amortizori) deplasările relative de nivel obținute cu sistemul de amortizare ȘERB sunt în medie cu 13,9% mai mari decât cele obținute cu sistemul de amortizare cu fluid vâcos, iar în cazul vitezelor relative de nivel fiind în medie de 36,24%. Forța axială maximă din amortizori este cu 6,46% mai mică în cazul amortizorilor ȘERB, iar energia absorbită de amortizori pe nivel este în medie cu 43,54% mai mare în cazul amortizorilor cu fluid vâcos. Deci, în cazul folosirii unui număr egal de amortizori pentru ambele sisteme de amortizare, performanțele seismice ale sistemului de amortizare ȘERB sunt inferioare sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos, însă reprezintă totuși o variantă de protecție antiseismică viabilă;

- în cazul folosirii unui număr dublu de amortizori ȘERB față de numărul de amortizori cu fluid vâcos apare o îmbunătățire a performanțelor sistemului de amortizare ȘERB, deplasările relative de nivel maxime fiind în medie cu 7,34% mai mici față de cele obținute cu sistemul de amortizori cu fluid vâcos. Forțele axiale maxime din amortizori sunt în medie cu 8,58% mai mici decât în cazul sistemului de amortizori cu fluid vâcos, iar energia totală absorbită de amortizori este în medie doar cu 14,32% mai mică în medie în cazul sistemului de amortizare ȘERB.

Concluziile care se desprind în urma analizei dinamice liniare folosind un set de cinci accelerograme având $a_g = 0,3g$ (specific analizei la ULS), pentru clădirea în cadre din beton armat P+10E, sunt următoarele:

- pentru o configurație de amortizori având parametri și caracteristici calculate astfel încât deplasarea relativă de nivel maximă să nu depășească valoarea maximă specifică SLS, se poate folosi cu succes aplicația software *GenEcAm* pentru studiul comportamentului la seism al clădirilor echipate antiseismic folosind accelerograme cu $a_g=0,3g$, cât și pentru determinarea unor configurații și caracteristici optime ale sistemului de amortizare folosit pentru o anumită clădire;

- dublarea numărului de amortizori ȘERB atrage după sine îmbunătățirea performanțelor acestui sistem de amortizare, astfel încât performanțele sale, în ceea ce privește deplasările relative de nivel, le depășesc în medie cu 8,32% pe cele ale sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos, iar în ceea ce privește vitezele relative de nivel și accelerațiile relative, acestea sunt mai mari decât cele obținute folosind sistemul de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos în medie cu 10,88% și respectiv cu 15,32%;

- deplasările relative de nivel obținute cu sistemul de amortizare ȘERB sunt mai mici decât cele obținute cu sistemul de amortizori cu fluid vâcos, vitezele și accelerațiile sunt mai mari, fapt care arată că energia seismică preluată de clădire este mai mare în cazul amortizorilor ȘERB;

- forțele axiale maxime din amortizori se obțin la etajele 2 și 3 și acestea sunt mai mici în medie cu 3,64% în cazul amortizorilor cu fluid vâcos decât în cazul amortizorilor ȘERB;

- energia absorbită de amortizori pe nivel este mai mare cu 31,96% în cazul sistemului de amortizare cu amortizori cu fluid vâcos, însă energia totală absorbită de întregul sistem de amortizori este doar cu 14,97% în medie mai mică în cazul sistemului de amortizare ȘERB;

În ceea ce privește folosirea amortizorilor ȘERB în fundație în paralel cu sistemul de izolare seismică, concluziile care se desprind în urma studiului arată că sistemul de amortizare

ȘERB telescopic are performanțe ușor superioare sistemului de amortizori cu fluid vâscos în ceea ce privește deplasările și vitezele relative (diferențele fiind în jur de 10%), iar în privința accelerațiilor relative, acestea sunt în medie cu 10% mai mari decât în cazul folosirii sistemului de amortizori cu fluid vâscos, în condițiile în care un amortizor telescopic ȘERB costă cu 50% mai puțin decât un amortizor cu fluid vâscos.

Concluzia finală a întregului studiu este că sistemul de amortizare ȘERB oferă performanțe antiseismice apropiate de cele ale sistemului clasic de amortizare cu amortizori cu fluid vâscos, atât în cazul amortizării la suprastructură cât și în cazul amortizării în fundație, în condițiile unui preț de cost cu 50% mai scăzut.

CAPITOLUL 8

CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

8.1 Concluzii generale

În România numărul construcțiilor echipate antiseismic este în continuare extrem de mic, deși aceasta este situată într-o zonă cu seismicitate ridicată. Principalul motiv pentru care în România construcțiile nu sunt prevăzute cu sisteme de disipare a energiei seismice îl reprezintă lipsa reglementărilor de proiectare specifice clădirilor echipate cu dispozitive de disipare a energiei seismice precum și costul ridicat al echipării cu astfel de dispozitive.

Începând cu anul 2000, dr.ing. Viorel Șerban de la Centrul de Inginerie și Tehnologie Obiective Nucleare - CITON București, a brevetat un set de dispozitive de disipare a energiei seismice de tip amortizori și izolatori, cu diferite curse și forțe de amortizare, destinați echipării antiseismice a echipamentelor și structurilor din centralele nucleare. Dispozitivele au fost folosite în acest domeniu, dar aplicațiile lor s-au extins și la echiparea antiseismică a clădirii NAVROM Galați în anul 2006. Dispozitivele de tip amortizori funcționează pe baza fenomenului mecanic de frecare uscată, iar prețul de cost al acestora este de până la de patru ori mai mic decât al amortizorilor uzual folosiți produși de firmele din străinătate. Un exemplu în acest sens îl reprezintă amortizorii cu fluid vâcos produși de firmele Taylor Devices (SUA) și ALGA (Italia) care au un preț mediu de 10.000 Euro pentru amortizorii de suprastructură, spre deosebire de amortizorii ȘERB cu aceeași destinație care au un preț mediu de 2.500 Euro.

Obiectivul acestui studiu a fost de a realiza un model matematic-computațional implementat software care să permită evaluarea comparativă a performanțelor diferitelor sisteme de protecție la seism, inclusiv a sistemului care folosește dispozitive românești ȘERB. Acest instrument de calcul este util în procesul de proiectare rațională a sistemului de protecție antiseismică a clădirii analizate.

Amortizorii ȘERB au fost subiectul cercetărilor a trei colective de cercetare [26, 29, 112] și a două teze de doctorat [33, 125], din care una este a inventatorului lor. Până în prezent nu s-a realizat un studiu care să compare performanțele antiseismice ale amortizorilor ȘERB cu ale altor amortizori uzual folosiți, în scopul evidențierii eficienței antiseismice ale acestora.

Buclele de histerezis specifice amortizorilor ȘERB sunt foarte diferite de cele ale amortizorilor uzual folosiți, fapt care implică folosirea unei variante modificate a modelului Bouc-Wen clasic pentru modelarea comportamentului histeretic al acestora în cadrul analizei la seism a unei clădiri echipate cu acest sistem de amortizori. Din acest punct de vedere este dificilă folosirea programelor comerciale de analiză cu metoda elementului finit pentru modelarea comportamentului la seism a clădirilor echipate cu acest sistem.

Modelarea cu M.E.F. a celor două tipuri de amortizori ȘERB (pentru suprastructură și pentru fundație), realizată pentru prima dată în cadrul acestui studiu și validată de rezultatele experimentale realizate, a scos în evidență influența directă a formei și dimensiunilor elementelor componente ale amortizorilor asupra formei și dimensiunilor caracteristicii de histerezis a acestora. Aceste modele numerice validate reprezintă o bază pentru proiectarea rațională a

acestor amortizori în vederea obținerii unor bucle de histerezis adecvate pentru diferite tipuri de structuri, prin modificarea unor parametri geometrici ai elementelor din componența amortizorilor, aflate în contact cu frecare.

Modelul analitic-computațional al structurilor echipate cu amortizori prezentat în această lucrare, a fost realizat cu un mare grad de flexibilitate care permite compararea performanțelor sistemului ȘERB cu alte sisteme de amortizori pentru disiparea energiei seismice. Modelul conceput a fost implementat într-un pachet de patru programe software (*HistPlot*, *GenEcAm*, *ProConfig* și *ProAnim*), care constituie un instrument de analiză utilă în conceperea și proiectarea sistemelor de disipare a energiei seismice pentru o clădire supusă analizei la seism. Prin numărul mare de modele matematice de histerezis clasice și adaptate, puse la dispoziție de acest pachet de programe, poate fi modelat comportamentul la seism a unei clădiri care poate fi echipată cu un spectru larg de amortizori sau izolatori a căror caracteristică histeretică se cunoaște.

Pachetul de programe pe care l-am realizat a fost supus unui proces de validare prin compararea rezultatelor sale numerice cu cele obținute folosind programul *SAP2000* în diferite cazuri de analiză folosind un set de 21 de accelerograme de proiectare. Cu ajutorul acestui nou pachet de programe s-au pus în evidență performanțele antiseismice ale amortizorilor ȘERB prin compararea lor cu cele specifice amortizorilor cu fluid vâscos care se folosesc pe scară largă la echiparea antiseismică a clădirilor.

În cazul analizei la seism a clădirilor echipate cu amortizori ȘERB C-194 pentru suprastructură folosind pachetul de programe realizat, modelul matematic de histerezis Bouc-Wen-Exp propus pentru prima dată în acest studiu, pentru modelarea adecvată a comportamentului amortizorilor ȘERB C-194 pentru suprastructură, conduce la obținerea de rezultate mai apropiate de realitate (bucla de histerezis experimentală) decât cele obținute cu ajutorul modelului Bouc-Wen clasic propus în cadrul altor studii anterioare [99].

În urma analizei tuturor cazurilor în care s-a realizat compararea performanțelor sistemelor de amortizori ȘERB C-194 cu cele ale sistemelor cu amortizori cu fluid vâscos, s-a concluzionat că, în cazul dublării numărului de amortizori ȘERB, performanțele celor două sisteme sunt foarte asemănătoare în ceea ce privește deplasările relative de nivel ale clădirii. Vitezele relative de nivel sunt în medie cu 11% mai mari în cazul sistemului ȘERB, accelerațiile relative cu 15% mai mari, forțele axiale maxime din amortizori cu 3,6% mai mari, iar energia totală absorbită de acest sistem de amortizori este doar cu 15% în medie mai mică decât a sistemului de amortizori cu fluid vâscos.

Și în cazul folosirii amortizorilor ȘERB TEL-300 în fundație în paralel cu sistemul de izolare seismică, s-au obținut rezultate similare, performanțele celor două sisteme de amortizare (ȘERB și cu fluid vâscos) fiind foarte apropiate (cu diferențe în medie de 10%), în condițiile reducerii prețului de cost cu 50% pentru sistemul de amortizare ȘERB, care se dovedește a fi și în acest caz o alternativă viabilă și economică de echipare antiseismică în fundație a clădirilor din România.

8.2 Contribuții personale

În procesul de îndeplinire a obiectivelor tezei am obținut anumite rezultate care pot fi considerate contribuții originale la dezvoltarea domeniului studiat. Acestea sunt grupate în

continuare în patru categorii: contribuții teoretice, contribuții software, contribuții aplicative și contribuții numerice.

Contribuții teoretice

1 – *Modelul matematic de histerezis Bouc-Wen_Exp* (cap. 5, paragraful 5.2.5.5) este un model matematic nou, pe care l-am dezvoltat plecând de la modelul Bouc-Wen clasic. Am conceput acest model pentru modelarea comportamentului amortizorilor ȘERB C-194, și oferă rezultate mai apropiate de cele obținute experimental decât cele oferite de modelul clasic Bouc-Wen folosit în alte lucrări. Acest model are o formă diferențială care poate fi ușor implementată computațional și are avantajul că poate fi aplicat pentru orice variație a deplasării relative de nivel. Datorită versatilității sale, acest model poate fi folosit și la modelarea altor tipuri de bucle histeretice cu forme complexe.

2 – *Modelul matematic de histerezis Bouc-Wen_Strength* (cap. 5, paragraful 5.2.5.4.2) este un model matematic nou pe care l-am dezvoltat plecând de la modelul Bouc-Wen modificat de Sivaselvan [115] din punctul de vedere al corectării rezistenței (Strength degradation). În acest demers am propus o nouă formulă care permite modelarea cu succes a amortizorilor ȘERB C-194 în condițiile unor variații ale deplasării relative de nivel cu amplitudini succesive relativ egale. Acest model matematic are o formă diferențială, care poate fi aplicată și la alte tipuri de bucle histeretice, fiind la fel de ușor de implementat computațional ca și modelul Bouc-Wen clasic.

Contribuții software

Instrumentul de calcul pe care l-am conceput pentru studiul clădirilor echipate cu sisteme de protecție antiseismică constă dintr-un pachet de patru aplicații software pe care le-am realizat în mediul de programare *Embarcadero Delphi XE3*, acestea fiind:

1 – *Programul HistPlot* (cap. 5, paragraful 5.4.2) a fost realizat în scopul determinării parametrilor modelelor matematice de histerezis cele mai adecvate pentru modelarea buclelor de histerezis ale dispozitivelor histeretice care echipează clădirea analizată. Programul cuprinde 11 modele matematice de histerezis din care șase sunt modele matematice algebrice uzual folosite (Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener, amortizare vâscoasă, Coulomb și Ramberg-Osgood), iar celelalte cinci sunt modele matematice diferențiale (Bouc-Wen clasic, Bouc-Wen_Exp, Bouc-Wen_Strength, Bouc-Wen_UC și Bouc-Wen Papion). Programul permite obținerea buclei de histerezis pentru diferite legi de variație a deplasării amortizorului, precum și modelarea unui sistem cu un grad de libertate dinamică echipat cu un amortizor modelat cu unul din modelele matematice de histerezis ales. Se poate realiza și fitarea buclei de histerezis teoretice cu un set de date experimentale obținute pe un amortizor real în vederea determinării parametrilor modelului teoretic adecvat modelării analitice-computaționale a respectivului amortizor.

2 – *Programul ProConfig* (cap. 5, paragraful 5.4.3) a fost realizat cu scopul de a permite alegerea uneia din cele patru configurații de amplasare a amortizorilor la suprastructură studiate, pentru a determina factorii de amplificare a forței axiale din amortizor în funcție de unghiurile de înclinare a pârghiilor specifice configurației alese. Cele patru configurații cuprind, pe lângă configurațiile de tip Chevron și de tip contravântuire, încă două configurații mai puțin folosite, care printr-un sistem de pârghii amplifică atât deplasarea, cât și forța axială din amortizor. Programul analizează toate opțiunile geometrice posibile pentru configurația cu pârghii selectată, oferind grafice bidimensionale și tridimensionale de variație a forței axiale funcție de unghiurile de înclinare a pârghiilor. Programul permite specificarea unui factor de amplificare a forței axiale din amortizor și determinarea automată a unghiurilor de înclinare a pârghiilor care asigură factorul de amplificare ales. Factorii de amplificare determinați cu ajutorul acestui program

pentru fiecare configurație, sunt transmiși automat programului *GenEcAm* ca date necesare asamblării sistemului de ecuații diferențiale specifice analizei la seism a clădirii echipate.

3 – **Programul *GenEcAm*** (cap. 5, paragraful 5.4.4) a fost conceput cu scopul de a modela comportamentul seismic al clădirilor echipate antiseismic, permițând și echiparea cu sistemul de amortizare ȘERB. Programul assemblează sistemul de ecuații diferențiale de ordinul II al analizei liniare la seism a clădirii echipate antiseismic, într-un format compatibil cu modulul *Differential Equation Editor (DEE)* al programului de calcul matematic *Matlab/Simulink* care-l poate rezolva într-o manieră eficientă printr-o aplicație asociată pe care am conceput-o în *Simulink*, pentru o accelerogramă aleasă. Pentru fiecare nivel se solicită rigiditatea, masa, factorul de amortizare, modelul matematic de histerezis și parametrii săi (determinați cu programul *HistPlot*) și factorii de amplificare a forței axiale din amortizori pentru configurația de amplasare aleasă (preluați din programul *ProConfig*). Modelele matematice de histerezis disponibile în program sunt: Maxwell, Kelvin-Voigt, Zener, amortizare vâscoasă, Coulomb, Bouc-Wen clasic, Bouc-Wen_Exp, Bouc-Wen_Strength, Bouc-Wen_UC, Bouc-Wen Papion și User Function. Opțiunea *User Function* permite introducerea unei expresii algebrice pentru forța axială din amortizor funcție de deplasarea, viteza sau accelerația de nivel în vederea descrierii unui nou model de histerezis dorit de utilizator. Rezultatele oferite de aplicația *Simulink* asociată sunt: deplasările, vitezele și accelerațiile relative și relative de nivel, graficele buclelor de histerezis pentru fiecare amortizor, variația energiei absorbite de amortizori în timp, perioadele proprii de vibrație, formele proprii de vibrație, factorii de amortizare modală și factorii de participare modală. Programul permite proiectarea rațională a sistemului de echipare antiseismică a clădirii analizate prin analize comparative ale eficienței sistemelor de protecție antiseismică considerate.

4 – **Programul *ProAnim*** (cap. 5, paragraful 5.4.5) a fost realizat în scopul postprocesării rezultatelor programului *GenEcAm* prin vizualizarea grafică și animată a următorilor parametri: deplasările relative ale fiecărui nivel, deplasările relative de nivel și forțele de amortizare din amortizori. Se pot prezenta simultan până la trei seturi de rezultate obținute cu *GenEcAm*, permițându-se astfel compararea vizuală și valorică a acestor parametri, atât separat cât și suprapuse, care să conducă la alegerea variantei adecvate de echipare antiseismică a clădirii analizate.

Contribuții aplicative

Contribuțiile aplicative au constat în evaluarea performanțelor sistemului ȘERB prin studiul comparativ al performanțelor antiseismice ale acestui sistem cu cele specifice sistemului de amortizori cu fluid vâscos. Cele două studii comparative realizate în acest scop sunt sintetizate în continuare.

1 – Compararea performanțelor seismice ale sistemului de amortizori ȘERB C-194 cu cele ale sistemului de amortizori cu fluid vâscos

Această comparație (cap. 7, paragraful 7.2.6) a fost realizată cu scopul de a evalua performanțele antiseismice ale sistemului cu amortizori ȘERB C-194. Studiul comparativ a fost realizat cu ajutorul aplicației *GenEcAm* pe o structură în cadre de beton armat cu regim de înălțime P+10E aflată în mai multe cazuri de solicitare care permit analiza dinamică liniară. S-a observat că în cazul dublării numărului de amortizori ȘERB, performanțele acestui sistem de amortizare sunt apropiate de cele ale sistemului clasic de amortizare cu fluid vâscos, având și avantajul reducerii prețului de cost cu 50% față de acesta din urmă. Astfel, în cazul folosirii unui set de accelerograme de proiectare cu $a_g = 0,3g$ (pentru $T_c = 1,6$ s), deplasările relative de nivel sunt în medie cu 8,32% mai mici față de sistemul de amortizare clasic, iar în ceea ce privește

energia de amortizare totală a întregului sistem de amortizori este doar cu 14,97% în medie mai mică în cazul sistemului de amortizare ȘERB.

2 – Compararea performanțelor seismice ale sistemului de amortizori ȘERB TEL-300 cu cele ale sistemului de amortizori cu fluid vâscos montați în paralel cu sistemul de izolare seismică

Acest studiu comparativ (cap. 7, paragraful 7.3) a fost realizat în scopul evaluării performanțelor sistemului de amortizare ȘERB TEL-300, montat în paralel cu sistemul de izolare antiseismică a clădirii. Pentru aceasta a fost analizată, cu ajutorul aplicației *GenEcAm*, o structură în cadre de beton armat cu regim de înălțime P+10E echipată cu un sistem de izolare seismică, având perioada fundamentală $T_1 = 3$ s, iar pentru izolatori s-a ales un coeficient de amortizare vâscoasă $\beta = 30\%$. În urma studiului s-a arătat că sistemul de amortizare ȘERB pentru fundație are performanțe ușor superioare sistemului de amortizori cu fluid vâscos în ceea ce privește deplasările și vitezele relative (diferențele medii fiind în jur de 10%), iar în privința accelerațiilor relative, acestea sunt în medie cu 10% mai mari decât în cazul folosirii sistemului de amortizori cu fluid vâscos. Forțele axiale din amortizori pentru sistemul de amortizare ȘERB sunt în medie cu 18,03% mai mari decât celor corespunzătoare amortizorilor cu fluid vâscos. Energia absorbită per amortizor are valori apropiate pentru ambele sisteme, diferența fiind în medie de 3,13%. Sistemul de amortizare ȘERB pentru fundație costă cu 50% mai puțin decât sistemul de amortizori cu fluid vâscos.

Contribuții numerice

1 – Modelul 3D cu elemente finite al amortizorului ȘERB C-194

Modelul cu elemente finite a fost realizat în ANSYS (cap. 4, paragraful 4.1) într-o manieră parametrizată care să permită modificarea ușoară a diferiților parametri geometrici ai elementelor componente ale amortizorului. Modelul permite obținerea graficului forță-deplasare pentru orice lege de variație a deplasării. Acest model a fost validat din punct de vedere calitativ cu date obținute experimental. Modificarea grosimii sau a diametrului discurilor metalice componente atrage după sine modificarea formei și dimensiunilor buclei de histerezis, putându-se astfel obține diferite variante constructive ale amortizorului în funcție de forma și dimensiunile buclei de histerezis dorite.

2 – Modelul cu elemente finite al amortizorului ȘERB TEL-300

Acest model a fost realizat în programul ANSYS (cap. 4, paragraful 4.2), fiind realizat cu elemente finite 3D și permite modificarea facilă a tuturor parametrilor geometrici ai elementelor care contribuie la funcționarea amortizorului. Rezultatele oferite prin această modelare sunt stările de tensiuni și deformații în elementele componente pe toată perioada încărcării, precum și bucla de histerezis specifică acestui amortizor. Modelul a fost validat prin compararea rezultatelor numerice cu cele obținute experimental concretizate în bucla de histerezis specifică. Este permisă specificarea oricărei legi de variație a deplasării din amortizor ca date de intrare în analiză.

8.3 Direcții viitoare de cercetare

În procesul de realizare a obiectivelor cercetării s-au conturat noi direcții de cercetare pentru aprofundarea domeniului studiat care sunt sintetizate în continuare.

1 – Adaptarea în continuare a modelului matematic de histerezis *Bouc-Wen_Exp* pentru a modela mai fidel comportarea reală a amortizorilor pentru suprastructură ȘERB. În acest sens se pot studia modalități noi de trecere între cele două ramuri ale buclei de histerezis.

2 – Extinderea listei de modele matematice de histerezis a aplicațiilor *HistPlot* și *GenEcAm* cu alte modele (Ramborg-Osgood etc.). Aceasta va permite lărgirea bazei de date care cuprinde tipurile de sisteme de amortizare analizate de utilizatorul acestor aplicații în vederea determinării variantei adecvate de echipare antiseismică.

3 – Folosirea aplicației *GenEcAm* la realizarea de comparații între performanțele diferitelor sisteme de amortizare ale clădirilor, în afara celor analizate în lucrarea de față. În acest sens, ne propunem studierea amortizorilor de tip bare cu flambaj împiedicat, a amortizorilor cu deformare plastică, a diferitelor tipuri de izolatori etc.

4 – Folosirea celor două modele cu elemente finite, propuse în această lucrare, pentru cele două tipuri de amortizori ȘERB, pentru studierea influenței parametrilor geometrici ai elementelor componente asupra formei și dimensiunilor buclei de histerezis. Parametrii propuși pentru modificare sunt: grosimea discurilor, diametrul lor, numărul, materialul și gradul de netezire a suprafețelor, în cazul amortizorilor ȘERB de suprastructură, iar în cazul amortizorilor ȘERB pentru fundație: forma profilului axului longitudinal, grosimea lamelor elastice, mărimea lor, numărul, materialul și gradul de netezire a suprafețelor.

5 – Modelul cu elemente finite pentru modelarea comportamentului nodului de cadru poate fi folosit în continuare pentru extinderea studiului influenței forței axiale din amortizor asupra nodului de cadru în diferite configurații de amplasare a amortizorului, pentru diferite dimensiuni ale cadrului și pentru alte tipuri de amortizori decât cei folosiți în lucrarea de față.

6 – Folosirea pachetului software *HistPlot*, *GenEcAm*, *ProConfig* și *ProAnim* la modelarea comportamentului la seism a altor tipuri de structuri decât cele studiate în prezenta lucrare și anume la studiul structurilor metalice, structuri duale etc. Pentru aceasta se va folosi modalitatea de pregătire a datelor de intrare prezentate în această lucrare.

7 – Introducerea în aplicația *GenEcAm* a unor legi de variație pentru rigiditatea de nivel k_i , fapt care va permite ulterior realizarea unei analize dinamice neliniare a clădirilor echipate antiseismic.

8 – Studiul influenței forței axiale din amortizorii ȘERB C-194 asupra stării de tensiuni și deformații din nodul de cadru în care aceștia sunt montați cu ajutorul unui model cu elemente finite 3D.

Bibliografie

- [1] Ana Maria Andronache, V. Șerban, M. Androne, G. Ciocan, Viorela Maria Postolache - *Technical solutions to increase seismic safety margin to existing NPPS*, Proceedings of the 2014 22nd International Conference on Nuclear Engineering, ICONE22 July 7-11, 2014, Prague, Czech Republic.
- [2] ASCE, *FEMA 356-2000 – Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, cap. 9.
- [3] ATC., *Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, prepared by Applied Technology Council, for Building Seismic Safety Council and Federal Emergency Management Agency (Report No. FEMA 273), Washington, D.C., 1997.
- [4] Bangash, M.Y.H., *Earthquake Resistant Buildings. Dynamic Analyses, Numerical Computations. Codified Methods, Case Studies and Examples*, Hardcover, 2011, cap.2.
- [5] S. Băetu, I.-P. Ciongradi - *Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete slit walls with ANSYS (I)*, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Tomul LVII (LXI), Fasc. 1, 2011, Secția Construcții. Arhitectură.
- [6] A. Borri, ed.. *La stabilita delle grandi statue: il David di Michelangelo*, Rome: Dei, ISBN 88-496- 1561-2, 2005.
- [7] Bouc R. (1967) *Forced vibration of mechanical systems with hysteresis*, Proc. Fourth Conf. Non-Linear Oscil., Prague, Czechoslovakia.
- [8] P. Bratu – *Analiza structurilor elastice. Comportarea la acțiuni statice și dinamice*, Ed. Impuls, București, 2011.
- [9] Calado L., Proença J.M., Panão A. *Innovative materials and techniques for seismic protection*, s.l.: PRONITECH, 2004. Vol. Earthquake Protection of Historical Buildings by Reversible Mixed Technologies. WP5_proj.no.INCO-CT-509119.
- [10] Mădălina Călbureanu, Raluca Malciu, E. Albota, **Adriana Ionescu** and M. Lungu, *Contributions about the Influence of the Strong Vrancea Earthquakes in Oltenia Region by Processing the Seismic Recording During Seismic Motions from 1986 and 1990*, International Journal of Geology, NAUN Journal 2013, vol. 7, ISSN: 1998-4499 pag. 24-31 (indexata BDI) <http://naun.org/cms.action?id=6979>
- [11] Călbureanu Mădălina, **Ionescu Adriana**, Negru M. - *Seism simulation of a support structure used in power plants using Finite Element Method* – First International Conference for PhD students in Civil Engineering, CE-PhD 2012, 4-7 nov. 2012, Cluj-Napoca, Romania.
- [12] Călbureanu Mădălina, Malciu Raluca, Albota E., **Ionescu Adriana.**, Lungu M. - *Processing of the Accelerographic Recording Obtained in Oltenia Region during Strong Vrancea Earthquakes* - WSEAS International Conference, Vouliagmeni, Athens, Greece, may 14-16, 2013 (lucrare indexata ISI)
- [13] Călbureanu Mădălina, Malciu Raluca, Tutunea D., **Ionescu Adriana**, Gugilă Olga - *The Finite Element Assessment of Wind at High Speed Acting on a House Structure*, Rev. Termotehnica nr. 2/2013, AGIR, ISSN: 2247-1871 (indexata BDI: Google Scholar, Index Copernicus, Academic keys) <http://www.agir.ro/buletine/1933.pdf>

- [14] Mădălina Călbureanu, **Adriana Ionescu** ș.a. - *Proiectarea rațională antiseismică a structurilor înalte echipate cu amortizori cu fluid vâscos*, Universitatea din Craiova, grant intern nr. 44C/27.01.2014, ian 2014 – dec. 2014.
- [15] Charalampakis AE, Koumousis VK - *Identification of Bouc–Wen hysteretic systems by a hybrid evolutionary algorithm*, Journal of Sound and Vibration, vol. 314, pg. 571–585, Elsevier, 2008.
- [16] Charalampakis AE, Koumousis VK - *On the response and dissipated energy of Bouc–Wen hysteretic model*, Journal of Sound and Vibration, vol. 309, pg. 887–895, Elsevier, 2008.
- [17] Charalampakis AE, Koumousis VK - *A Bouc–Wen model compatible with plasticity postulates*, Journal of Sound and Vibration, vol. 322, pg. 954–968, Elsevier, 2009.
- [18] Charalampakis AE, Koumousis VK - *Implementing an improved Bouc-Wen model to account for plasticity postulates*, COMPDYN 2009, Rhodes, Greece, 2009.
- [19] Charalampakis AE - *Inelastic dynamic analysis of structures using Bouc-Wen hysteretic models*, PhD thesis, National Technical University of Athens, 2009.
- [20] Charalampakis AE - *Parameters of Bouc–Wen model revisited*, 9th HSTAM International Congress on Mechanics, Limassol, Cyprus, 2010.
- [21] Charalampakis AE, Dimou CK - *Identification of Bouc–Wen hysteretic systems using particle swarm optimization*, Computers and Structures, vol. 88, pg. 1197–1205, , Elsevier, 2010.
- [22] Charalampakis AE, Dimou CK - *Comparison of Differential Evolution, Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms for the identification of Bouc-Wen hysteretic systems*, 2nd International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering (CSC2011), Chania, Crete, Greece, 2011.
- [23] Charalampakis AE, Dimou CK - *Comparison of Evolutionary Algorithms for the identification of Bouc–Wen hysteretic systems*, ASCE, 2013.
- [24] Charalampakis AE - *The response and dissipated energy of Bouc–Wen hysteretic model revisited*, Archive of Applied Mechanics, Springer, 2014.
- [25] D. Crețu, M. Stoica, T. Sireteanu, V. Șerban - *Mechanical Adjustable Controlled Elasticity & Damping (ACED) Devices for the structural Control of Buildings Subjected to Seismic Loads*, 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, Assisi Italia, Octombrie 2001.
- [26] D. Crețu, V. Șerban, M. Stoica - *Passive Control System to New and Existing Buildings using Adjustable Controlled Elasticity & Damping Devices ACED -B*, Fib 2003 Symposium Concrete Structures in Seismic Region, Athens Grecia, Mai 2003.
- [27] M. Dolce, A. Martelli, G. Panza, *Proteggersi dal Terremoto - Le Moderne Tecnologie e Metodologie e la Nuova Normativa Sismica*, Milan: 21^{mo} Secolo, 2nd edition, ISBN 88-87731-28-4, 2005.
- [28] M. Dolce, A. Martelli, G. Panza, *Modemi Metodi di Protezione dagli Effetti dei Terremoti*, Special edition for the Italian Civil Defense Department, edited by A. Martelli, Milan: 21^{mo} Secolo, ISBN 88-87731-30-6, 2006.
- [29] D. Dubină ș.a - *PNCDI II "Parteneriate în domenii prioritare" nr. 31-042/2007 PROACTEX - Sisteme structurale și soluții tehnologice inovative pentru protecția clădirilor la acțiuni extreme*, 2007-2010.
- [30] Dubină D. Lungu D. - *Construcții amplasate în zone cu mișcări seismice puternice*, Ed. Orizonturi Universale, Timisoara, 2003.

- [31] J. Eisenberg, V. Smirnov - *Building seismic isolation in Russia without rubber and with rubber*, ISET Golden Jubilee Symposium, Paper No. E006 October 20-21, 2012, Roorkee, India.
- [32] M. Erdik s.a., eds., *Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures*, Proceedings of the 10th World Conference, Istanbul (Turkey), May 28-31, 2007, Istanbul: TASI, 2008.
- [33] Filip Văcărescu N. - *Seismic performance of multistorey steel concentrically braced frames equipped with friction dampers*, teza de doctorat, Universitatea Politehnica Timisoara, 2011.
- [34] Filip Văcărescu N., Stratan A., Dubină D. - *Sisteme structurale disipative cu contravântuiri cu amortizori cu frecare: studiu de soluție și comparație cu sistemele convenționale – Partea 1*, A XIII-a Conferință Națională de Construcții Metalice: Tendințe actuale în Ingineria Structurilor Metalice, București, 21-23.11.2013, Ed. Conspress București, ISBN: 978-973-100-306-1, pp. 141-148.
- [35] Filip Văcărescu N., Stratan A., Dubină D. - *Sisteme structurale disipative cu contravântuiri cu amortizori cu frecare: studiu de soluție și comparație cu sistemele convenționale – Partea 2*, A XIII-a Conferință Națională de Construcții Metalice: Tendințe actuale în Ingineria Structurilor Metalice, București, 21-23.11.2013, Ed. Conspress București, ISBN: 978-973-100-306-1, pp. 149-156.
- [36] Filip Văcărescu N., A. Stratan, D. Dubină - *Experimental validation of a strain hardening friction damper*, Proceedings of the romanian academy, series a, volume 15, number 1/2014, pp. 60–67
- [37] Filip Văcărescu N., A. Stratan, D. Dubină - *Seismic performance of multistorey steel frames with strain hardening friction dampers*, Proceedings of the romanian academy, series a, vol. 15, nr. 2/2014, pg. 174–181.
- [38] Fujita, T., *State of the Art in seismic isolation to civil and industrial structures in Japan*, Proceedings of the 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, (Kobe, Japan), 2005, pp. 1-22.
- [39] **Ionescu Adriana**, Marin M., Gugilă Mădălina Olga, Negru M. - *Arch steel building optimization used in civil engineering*, by Finite Element Method, First International Conference for PhD students in Civil Engineering, CE-PhD 2012, 4-7 nov. 2012, Cluj-Napoca, Romania.
- [40] **Adriana Ionescu**, Mădălina Călbureanu, M. Negru - *Static and Dynamic Simulation in the Seismic Behavior of a Building Structure using ANSYS Program*, pag. 210-217, International Journal of Mechanics, NAUN Journal 2013, vol. 7, ISSN: 1998-4448 (indexata BDI) <http://www.naun.org/cms.action?id=5360>
- [41] **Adriana Ionescu** – *Dispozitive de amortizare a vibrațiilor și criterii de proiectare antiseismică cu acestea. Analize de cost*, Raport de cercetare nr. 1, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea de Construcții, febr. 2013.
- [42] **Adriana Ionescu** – *Modelarea structurilor de rezistență prevăzute cu amortizori de vibrații, pentru calcul*, Raport de cercetare nr. 2, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea de Construcții, mai 2013.
- [43] **Adriana Ionescu** – *Analiza comparativă a comportării structurilor prevăzute cu diferite sisteme de amortizare a vibrațiilor. Evaluări comparative de cost*, Raport de cercetare nr. 3, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea de Construcții, sept. 2013.
- [44] **Ionescu Adriana**, Călbureanu Mădălina, Negru M. - *The comparison of the results in seismic behavior of a building using static and dynamic methods in ANSYS program*, WSEAS International Conference, Vouliagmeni, Athens, Greece, may 14-16, 2013 (lucrare indexata ISI).

- [45] **Ionescu Adriana**, Călbureanu Mădălina, Negru M. - *Boussinesq method in seism analysis of a building structure using ANSYS program*, WSEAS International Conference, Vouliagmeni, Athens, Greece, may 14-16, 2013 (lucrare indexata ISI).
- [46] **Ionescu A.**, Negru M., Vintilă Daniela, Călbureanu Mădălina - *Winkler method in analysis of a building structure in ansys program*, International Conference Of Mechanical Engineering, ICOME 2013: 16th – 17th of May 2013, Craiova – Romania.
- [47] **Adriana Ionescu**, M. Negru, C. Burada - *Optimal configuration of fluid viscoelastic seismic dampers on a ten stories building using Finite Elements Method*, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications Inc., Elvetia ,vol. 659/2014, pag. 241, ISSN 1662-7482 (indexata ISI si BDI) <http://www.ttp.net/978-3-03835-271-6/5.html>
- [48] **Adriana Ionescu**, M. Negru, C. Burada - *Influence of non-linear properties of fluid viscoelastic properties on seismic damping properties of a ten stories building using ANSYS program*, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications Inc., Elvetia, vol. 659/2014, pag. 245, ISSN 1662-7482 (indexata ISI si BDI) <http://www.ttp.net/978-3-03835-271-6/5.html>
- [49] **Adriana Ionescu** - *Experimental studies on Romanian building damping devices ȘERB C-194 and ȘERB TEL-150*, Romanian Journal of Acoustic and Vibrations, nr. 2, 2014, ISSN: 1584-7284 (indexata BDI) http://sra.ro/vol11_no2_2014.html
- [50] **Adriana Ionescu** - *Computational studies for comparison between Taylor dampers and SERB dampers used in damping systems for a ten stories building*, Romanian Journal of Acoustic and Vibrations, nr. 2, 2014, ISSN: 1584-7284 (indexata BDI) http://sra.ro/vol11_no2_2014.html
- [51] **Adriana Ionescu**, C. Burada, Mădălina Călbureanu, M. Negru - *Computational model of buildings equipped with different devices for seismic damping*, WSEAS International Conference, Brasov, Romania, june 26-28, 2014 (indexata ISI și BDI).
- [52] **Adriana Ionescu**, C. Burada, M. Calbureanu, M. Negru - *F.E.M. studies concerning new devices for seismic damping of buildings subjected to romanian Vrancea earthquakes*, WSEAS International Conference, Brasov, Romania, june 26-28, 2014 (indexata ISI si BDI).
- [53] **Adriana Ionescu** - *Numerical model for earthquake analysis of buildings equipped with different devices for seismic damping*, CE-PhD 2014, 10-13 decembrie 2014, Cluj-Napoca, Romania, <http://sens-group.ro/ce2014/accepted-papers/>
- [54] **Adriana Ionescu** - *Using Bouc-Wen method for hysteresis curves simulation of BRB dampers and SERB new romanian dampers. Experimental and F.E.M. studies for ȘERB dampers*, CE-PhD 2014, 10-13 decembrie 2014, Cluj-Napoca, Romania <http://sens-group.ro/ce2014/accepted-papers/>
- [55] **Adriana Ionescu** - *F.E.M. and experimental studies concerning new devices for seismic damping of buildings subjected to earthquakes*, International Journal of Mechanics, NAUN Journal 2015 vol. 1 pag. 112-119 (indexata BDI) <http://naun.org/cms.action?id=10208>.
- [56] **Adriana Ionescu** - *Analytical, Numerical And Experimental Studies For SERB TEL-150 New Romanian Seismic Dampers Used In Foundation Buildings Damping System*, periodical: Advanced Engineering Forum, volume: Advances in Engineering & Management, Trans Tech Publications Inc., Elvetia , vol. 13/2015, pag. 140, ISSN: 2234-991X (indexata BDI). <http://www.ttp.net/978-3-03835-501-4/3.html>
- [57] **Adriana Ionescu** - *Computational Studies For Comparison Between BRB Dampers And SERB New Romanian Dampers Performance In Damping System Of High Buildings*, periodical: Advanced Engineering Forum, volume: Advances in Engineering & Management, Trans Tech Publications Inc., Elvetia, vol. 13/2015, pag. 144, ISSN: 2234-991X (indexata BDI).

<http://www.ttp.net/978-3-03835-501-4/3.html>

[58] **Adriana Ionescu**, C. Burada, Mădălina Călbureanu, M. Negru - *F.E.M. Parametric Model Optimization of SERB-194C Device Used in Buildings Drift Limitation System*, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications Inc., Elvetia, vol. 822/2016, pag. 146-149, ISSN 1662-7482 (indexata ISI si BDI).

[59] **Adriana Ionescu**, C. Burada, M. Negru - *F.E.M. Simulation of the Building Frame Node Behavior During Seism*, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications Inc., Elvetia, vol. 823/2016, pag. 95-98, ISSN 1662-7482 (indexata ISI si BDI).

[60] **Adriana Ionescu**, C. Burada, M. Negru - *Adapted Bouc-Wen Analytical Model for Romanian SERB-C Seismic Dampers Used in Buildings Protection System*, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications Inc., Elvetia, vol. 823/2016, pag. 91-94, ISSN 1662-7482 (indexata ISI si BDI).

[61] Iordăchescu, A., *Construcții inteligente*, Editura Reg. Arcadia, București, 2001.

[62] A. Iordăchescu, E. Iordăchescu, M. Crihan, D. Mocanu - *Consolidarea clădirilor prin metoda izolării bazei*, Revista Construcțiilor nr. 42, oct. 2008, pg. 38.

[63] A. Iordăchescu, E. Iordăchescu, M. Crihan, D. Mocanu - *Utilizarea amortizorilor seismici cu fluid vâcos la consolidarea complexului sportiv A.S.E.*, Revista Construcțiilor nr. 50, iul. 2009, pg. 72.

[64] Iordachescu, A., Iordachescu, E., *Seismic Rehabilitation of Victor Slavescu Building – Calea Grivitei 2 – 2A Through Base Isolation Method*, 14 ECEE, Proceedings volume, 2010.

[65] A. Iordăchescu, E. Iordăchescu - *Seismic rehabilitation of Bucharest city hall building through base isolation method*, 15WCEE, Lisbon, Conference programme, 2012.

[66] A. Iordăchescu, E. Iordăchescu, A. Grigore - *Monitorizarea seismică a primei clădiri din România protejată antiseismic prin metoda izolării bazei*, Revista Construcțiilor nr. 100, febr. 2014, pg. 54.

[67] Ishizuka K., Kondo T., Hayano Y. - *Design of seismic control using roof garden as mass damper Part 1-3 (in Japanese)*, Summaries of technical papers of annual meeting architectural institute of Japan, B2, 2001, pp. 451-456.

[68] Kamada, T., *State of the Art in Vibration Control of Tall Buildings in Japan*, Proceedings of the 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, (Kobe, Japan), 2005, pp. 279-292.

[69] Kamada T., Fujita T. - *Current Status of Seismic Isolation and Vibration Control to Buildings, Cultural Heritage and Industrial Facilities in Japan*, Proceedings of the 10th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, (Istanbul, Turkey), 2007, CD-ROM.

[70] Kelly T., *In-Structure Damping and Energy Dissipation*. Wellington: Holmes Consulting Group, 2001.

[71] Koike Y., Nakagawa K, Imaseki M., Murata T., Shiraki H. - *Development of connecting type actively controlled vibration control devices and application to high-rise triple buildings*, IHI Engineering Review, Vol.37 No.1, 2004, pp. 23-29.

[72] Kottari AK. - *Inelastic analysis of structures with generalized Bouc–Wen models*, PhD thesis, National Technical University of Athens; 2009.

- [73] Kottari A, Charalampakis AE, Koumoussis VK - *Degrading Bouc-Wen models compatible with plasticity postulates*, 9th HSTAM International Congress on Mechanics, Limassol, Cyprus, 2010
- [74] Kottari A, Charalampakis AE, Koumoussis VK - *A consistent degrading Bouc–Wen model*, Engineering Structures, vol. 60, pg. 235–240, Elsevier, 2014.
- [75] A. Martelli, M. Dolce, M. Forni, Italy, Section 5.2 of *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*, edited by M. Higashino and S. Okamoto, London & New York: Taylor & Francis, SBN 0-415-36623-2, 2006, pp. 149-191.
- [76] A. Martelli, A. Dusi, *Modern anti-seismic systems: features and influence of earthquake experience and design mles on their application*, Proceedings of "Sismica 2007 – 7° Congresso de Sismologia e Engenharia Sismica", Lisbon, Portugal, 2007.
- [77] A. Martelli, M. Forni, *Isolamento sismico e dissipazione d'energia: applicazioni in Italia e all'estero e prospettive*, Proceedings on DVD of ANIDIS 2007 - XII Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Pisa, Italy; in Volume of Abstracts and Invited Papers, ISBN 978- 88-8492-458-2, p. 359.
- [78] A. Martelli, *Seismic isolation and energy dissipation: worldwide application and perspectives*, Proceedings of the Sixth International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures (ERES 2007), Bologna, Italy, WIT Press, ISBN 978-1-84564-078-1, 2007, pp. 105-116.
- [79] A. Martelli, Esperienze d'isolamento sismico - *Experience on seismic isolation, in La Sfida deirisolamento Seismico - The Challenge of the Seismic Isolation, Realizzazioni e Progetti*, EdA - Esempi di Architettura, Special issue, edited by A. Parducci, Saonara (Padova), Italy: II Prato, ISBN 978-88-89566-74-9, 2007, pp. 63-72.
- [80] A. Martelli, *La protezione delle chiese dal terremoto mediante modeme tecnologie, in 21^{mo} Secolo - Scienza e Tecnologia*, 3-2007, 38-48 (2007).
- [81] A. Martelli, S. Rizzo, *Development and application of innovative anti-seismic systems for the protection of cultural heritage*, in AIDA IV-Annuario Italiano di Archeometria, 4, 28-30 (2007).
- [82] A. Martelli, A. Dusi, S. Rizzo, *Seismic isolation and other modem anti-seismic systems: present application and perspectives for the future*, Invited lecture. Proceedings on CD Rom of the Fifth Intemational Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran, 2007; Abstract Book, 2007, pp. 2-3.
- [83] A. Martelli, S. Rizzo, V. Davidovici, M. Fomi, K.N.G. Fuller, F. Hubert, M. Indirli, P. Komodromos, M. Phocas, V. Renda, A. Santini, P. SoUogoub - *Current status of application of seismic isolation and other passive anti-seismic systems to buildings, cultural heritage and industrial plants in Italy and worldwide*, Proceedings on DVD of the W^ World Conference, Istanbul (Turkey), May 28-31, 2007, edited by M. Erdik et al., Istanbul: TASI, 2008; in Abstract Book, 2007, p. 2.
- [84] A. Martelli - *State of the art of the application of the innovative antiseismic techniques in the world*, Proceedings on DVD Rom of the Intemational Seminar on Development of Innovative Anti-Seismic Systems in the Framework of the LESSLOSS European Integrated Project, LNEC, Lisbon, Portugal, October 30, 2007.
- [85] A. Martelli - *Moderne tecnologie antisismiche: principi, applicazioni e prospettive*, Proceedings of the Workshop on "II Dopo-Terremoto della Val Sabbia e del Garda: fra Esigenze di Tutela e Requisiti di Sicurezza", Salo, Italy, November 24, 2007, in press.

- [86] A. Martelli - *Modemi sistemi antisismici per la protezione del patrimonio storico, artistico, architettonico ed archeologico*, in 21^{mo} Secolo - Scienza e Tecnologia, 2-2007, 42-44 (2007); Proceedings of the Congress "Conservazione: una Storia Futura", Salone dell'Arte del Restauro e della Conservazione del Ministero dei Beni Culturali e Ambientali, Ferrara, Italy, 2007.
- [87] A. Martelli, U. Sannino, A. Parducci, F. Braga - *Sistemi e Tecnologie Antisismici - Una Guida per il Progettista*, Milan: 21^{mo} Secolo, ISBN 978-88-87731-37-8, 2008.
- [88] A. Martelli - *Sistemi antisismici: stato dell'arte della ricerca e delle applicazioni*, in *Sistemi e Tecnologie Antisismici*, Una Guida per il Progettista, Milan: 21^{mo} Secolo, ISBN 978-88-87731-37-8, 2008, pp. 89-121.
- [89] Martelli, A., Forni, M., *State of the Art of the Development and Application of Antiseismic Systems in Europe and Other Countries*, Seismic Engineering Conference Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake, 2008, pg. 1272-1293.
- [90] A. Martelli - *Recent progress of application of modern anti-seismic systems in europe – Part I: Seismic isolation*, The 14 th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [91] A. Martelli, M. Forni - *Panorama delle realizzazioni a livello internazionale, Section of Tecnologie Innovative di Protezione Sismica delle Strutture*, edited by G. Russo and S. Sorace, Udine: CISM, 2008.
- [92] Martelli, A. - *Progress of the application of passive control systems for the seismic protection of structures*, Proceedings of the Seventh International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures (ERES 2009), Limassol, Cyprus, ISBN 978-1-84564-180-1 (Wit Press, Southampton, UK), pp 281–293.
- [93] Martelli, A. and Forni, M. - *Seismic isolation and other anti-seismic systems: recent applications in Italy and worldwid*, Seismic Isolation And Protection Systems (SIAPS). 1:1, 75-123, DOI 10.2140/siaps.2010.1.75, Mathematical Sciences Publishers (MSP), Berkeley, California, USA, 2010.
- [94] A. Martelli - *On the Need for Reliable Seismic Input Assessment for Optimized Design and Retrofit of Seismically Isolated Civil and Industrial Structures*, Equipment, and Cultural Heritage, Pure and Applied Geophysics, 168 (2011), 217–235, Springer.
- [95] Martelli A, Forni M, Clemente P. - *Recent worldwide application of seismic isolation and energy dissipation and conditions for their correct use*, Proceedings on electronic key of the 15th World conference on earthquake engineering (15WCEE), Lisbon, Conference programme, p 52, 24–28 Sept 2012.
- [96] A. Martelli, P. Clemente, A. De Stefano, M. Forni, and A. Salvatori - *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology, cap. 14 Recent Development and Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use*, Ed. A. Ansal, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering 34, DOI 10.1007/978-3-319-07118-3_14, 2014.
- [97] Ana-Maria Mitu - *Contributions to the study of dynamic behavior of systems with hysteretic characteristics*, teza de doctorat, Universitatea Politehnică București, Facultatea de Științe Aplicate, 2010.
- [98] Ana-Maria Mitu, P. Bratu, V. Șerban, M. Giuclea - *Analytical models for anti-seismic devices with hysteretic characteristics*, SISOM 2011 and Session of the Commission of Acoustics, Bucharest 25-26 May

- [99] Ana-Maria Mitu, Iuliana Popescu, T. Sireteanu – Comportarea dinamică a sistemelor cu caracteristici de tip histeretic, Ed. Matrix Rom, București, 2012.
- [100] H.-A. Mociran - *Contribuții privind evaluarea performanțelor seismice ale structurilor echipate cu amortizori cu fluid vâcos*, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea de Construcții, 2010.
- [101] Morishita M., Fushimi M., Fujita T. - *Development of Three Dimensional Seismic Isolation Systems for Next Generation Reactor Application*, Proceedings of the 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures (Yerevan, Armenia), 2003, pp.642-651.
- [102] Morishita M., Inoue K., Fujita T. - *Three Dimensional Seismic Isolation Technology for Nuclear Power Plant Application*, Proceedings of the 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures (Kobe, Japan), 2005.
- [103] Mostaghel N. - *Analytical description of pinching, degrading hysteretic systems*, J Eng Mech-ASCE 1999;125(2):216–24.
- [104] Negru M., Roșca V., **Ionescu Adriana** - *Optimal versions of braced girder used in civil engineering by Finite Element Method*, 10th WSEAS International Conference on Mathematical And Computational Methods In Science And Engineering (MACMESE'08) Noiembrie 7-9, 2008 – Bucuresti (lucrare indexata ISI).
- [105] Negru M., **Ionescu Adriana**, Călbureanu M., Vintilă D. - *Comparison of ansys and etabs results in seismic simulation of a building structure*, International Conference Of Mechanical Engineering, ICOME 2013: 16th – 17th of May 2013, Craiova – Romania.
- [106] M. Negru, **Adriana Ionescu**, M. Androne - *The Comparison Between Viscous Fluid Dampers and Romanian Friction Dampers Performance in Base Isolation System of Buildings*, Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications Inc., Elvetia, vol. 822/2016, pag. 156-159, ISSN 1662-7482 (indexata ISI si BDI).
- [107] Park, R.; Tanaka, H., *Flexural Strength and Ductility of High-Strength Concrete Columns*, ACI SP-176.
- [108] A.Gh. Pricopie - *Atenuarea Răspunsului Seismic prin Folosirea Amortizoarelor Vâscoase*, teza de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții București, Facultatea de Construcții Civile Industriale și Agricole, 2012.
- [109] Pricopie A.Gh., Crețu D. - *Rehabilitation of Existing Structures using Optimal Viscous Damper Placement in the Seismic and Soil Conditions of Romania*, in 15 World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 2012
- [110] Pricopie A.Gh., Crețu D. - *Rehabilitation of Existing Structures by Optimal Placement of Viscous Dampers*, in Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Vienna, 2012, p. in curs de publicare.
- [111] T. Postelnicu ș.a – *Proiectarea structurilor de beton armat în zone seismice*, vol. I, II, III și CD, Ed. Edit Structural, București, 2013
- [112] T. Sireteanu, Gh. Ghiță, V. Șerban, D. Crețu - *Experimental Tests on ACED-B and ACED-I Passive Control Devices*, Fib 2003 Symposium Concrete Structures in Seismic Region, Athens Grecia, Mai 2003.
- [113] Sireteanu T., Giuclea M., Mitu Ana-Maria - *On the fitting of Bouc-Wen model by genetic algorithms*, Rev. Roum. Sci. Techn.- Méc. Appl., vol. 54, no. 1, 2009.

- [114] Sireteanu T., Giuclea M., Mitu Ana-Maria, *Identification of an extended Bouc-Wen model with application to seismic protection through hysteretic devices*, Computational Mechanics 45, 2010, 431-441.
- [115] M.V.Sivaselvan, A.M.Reinhorn - *Hysteretic models for deteriorating inelastic structures*, ASCE Journal of Engineering Mechanics 126 (6)(2000)633–640.
- [116] Song J., Der Kiureghian A., *Generalized Bouc-Wen Model for Highly Asymmetric Hysteresis*, Journal of Engineering Mechanics 132 (2006) 610-618.
- [117] Structural Engineers Association of California (SEAOC), *General Requirements of the Design and Construction of Seismic - Isolated Structures*, 1996.
- [118] V. Șerban - Brevet de invenție nr. 115908B/28.07.2000 - *Dispozitiv de susținere și amortizare*.
- [119] V. Șerban - Brevet de invenție nr. 116739B1/05.2001 - *Dispozitiv de amortizare cu sau fără suspensie elastică*.
- [120] V. Șerban - Brevet de invenție nr. 116739C1/28.02.2002 - *Dispozitiv de amortizare, cu suspensie elastică*.
- [121] V. Șerban - Brevet de invenție nr. 119845/29.04.2005 “Structura sandviș, dispozitiv având în componență structura pentru preluarea și amortizarea încărcărilor pentru controlul comportării unei structuri și rețea de dispozitive”.
- [122] V. Șerban Brevet de invenție nr. 119845B1/30.03.2006 - *Structură sandviș, dispozitiv având în componență, această structură și rețea de dispozitive pentru preluarea și amortizarea încărcărilor, pentru controlul comportării, sub sarcina, a construcțiilor, sistemelor și echipamentelor*.
- [123] V. Șerban Brevet de invenție nr. 119822B1/30.03.2006 - *Structura sandviș și dispozitiv compact, pentru preluarea și controlul încărcărilor statice și dinamice*.
- [124] V. Șerban - Cerere de brevet de invenție nr. A/00018/11.01/2006 - *Structură lamelară sandviș și dispozitive de control al structurii*.
- [125] V. Șerban – *Soluții noi de izolare la șocuri, vibrații și mișcări seismice a construcțiilor, echipamentelor și rețelelor de conducte*, teza de doctorat, Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române, București, 2011.
- [126] V. Șerban, A. Panait, M.A. Zamfir, G.A. Ciocan, M. Androne, L.E. Șerban, L.D. Postolache, V.M. Postolache - *Life and environmental protection by developing new innovative solutions for the safety of buildings, equipment and pipe networks to violent earthquakes*, The 18th National Conference with International Participation "Progress in Cryogenics and Isotopes Separation" Călimănești-Căciulata, Vâlcea, România, 25-26 oct. 2012.
- [127] V. Șerban Cerere de brevet de invenție nr. A/00184/27.02.2013 - *Dispozitiv pentru protecția la suprasolicitări a unei structuri*.
- [128] V. Șerban, Mădălina Zamfir, G. Ciocan, M. Androne, Ana Maria Andronache, Laura Șerban, Viorela Postolache, L. Postolache - *Innovative Solutions for the Control of Structures Response to Dynamic Action*, Researches and Applications in Mechanical Engineering–Vol. 2, june 2013, pg. 33-42.
- [129] V. Șerban, M. Androne, Mădălina Zamfir, G. Ciocan, Ana Maria Andronache, T. Sireteanu, L.D. Postolache, Viorela Maria Postolache, Laura Elena Șerban - *Soluții inovative de protecție la șocuri, vibrații și mișcări seismice a construcțiilor și rețelelor de conducte*, Simpozionul AGIR “Progresul tehnologic – rezultat al cercetării” – aprilie 2013.

- [130] V. Șerban, Mădălina Zamfir, G. Ciocan, M. Androne, Ana Maria Andronache, Laura Șerban, Viorela Postolache, L. Postolache - *Dispozitive ȘERB pentru protecția seismică a construcțiilor*, Revista AICPS – nr. 1-2/2013, pg. 119-129.
- [131] V. Șerban, M. Androne, Mădălina Zamfir, G. Ciocan, Ana Maria Andronache, Laura Elena Șerban, L.D. Postolache, *Viorela Maria Postolache, CETAL - Izolarea la zgomote, șocuri, vibrații și mișcări seismice*, Revista AICPS – iunie 2013.
- [132] V. Șerban, G. Ciocan, M. Androne, Ana Maria Andronache, T. Sireteanu, Ana Maria Mitu, L. Postolache - *Mitigation of Structures Response to Dynamic Actions Using ȘERB Devices*, SISOM 2013, 21-22 mai 2013.
- [133] V. Șerban, Mădălina Zamfir, M. Androne, T. Sireteanu, Ana Maria Mitu, D. Țircă, L.D. Postolache, *CETAL – Innovative Solutions to Isolate From Noises, Shocks, Vibrations and Seismic Movements*, SISOM 2013, 21-22 mai 2013.
- [134] V. Șerban, M. Androne, Mădălina Zamfir, G. Ciocan, Ana Maria Andronache, T. Sireteanu, Ana Maria Mitu, L.D. Postolache, Viorela Maria Postolache, *Dispozitive ȘERB pentru controlul vibrațiilor și a zgomotelor la clădiri, echipamente și rețele de conducte*, Conferința Chișinău, 6-8 iunie 2013.
- [135] V. Șerban – *Constructions - general overview*, http://www.serb.ro/test_files/texte/ftconstreng.pdf
- [136] S.C. SIGMA STAR SERVICE S.R.L. – Contract de cercetare nr 50C/27.03.2014 “Încercări experimentale de laborator, în regim dinamic, realizate pe dispozitive ȘERB de disipare a energiei seismice la construcții civile – fază unică”, București, 2014
- [137] Takewaki I., *Building Control with Passive Dampers, Optimal Performance Based Design for Earthquakes*. Kyoto: Jon Wiley & Sons (Asia), 2009.
- [138] Takyoshi Kamada, Takafumi Fujita, *State of the Art of the Development and Application of Antiseismic Systems in Japan*, Seismic Engineering Conference Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake, 2008, pg. 1255-1271.
- [139] Tanaka, K., Kawagushi, S., Sukagawa, M., Masaki, N., Sera, S., Washiyama, Y., Mitsusaka, Y., *JSSI Manual for building passive control technology: Part-4 Performance and Quality Control of Viscous Dampers*, Companion Paper, Presented at 13WCEE.
- [140] Taylor D., Duflo P. *Fluid Viscous Dampers Used For Seismic Energy Dissipation in Structures*, <http://www.taylordevices.eu/pdfs/seismic%20applications.pdf>
- [141] Taylor D., *Mega Brace Seismic Dampers for the Torre Mayor project at Mexico City*, <http://www.taylordevices.eu/pdfs/Mega%20Brace%20Seismic%20Dampers-Taylor.pdf>
- [142] Terashima, N., Miyazaki, M., *Design Example of Base-isolated Artificial Ground*, Kenchiku-Gijutsu, 2001, pp. 172-175 (in Japanese).
- [143] Tsuyuki, Y., Kamei, T., Gofuku, Y., Kotake, Y., Iiyama, F. *JSSI Manual for building passive control technology: Part-3 Performance and Quality Control of Oil Dampers*, Companion Paper, Presented at 13WCEE.
- [144] UTCB, MDRAP, *P100-1/2013: Cod de proiectare seismică – Partea I – Prevederi de proiectare pentru clădiri*, 2013.
- [145] Vezeanu G. Pricopie A. Gh. - *Design Considerations for Buildings with Nonlinear Viscous Dampers, Mathematical Modeling*, pp. 296-304, 2010.

- [146] Villaverde, R. - *Aseismic Roof Isolation System: Feasibility Study with 13-Story Building*, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, vol.128, no.2, 2000, pg.17-27.
- [147] Vu, B.X. - *Seismic Performance of Base Isolated Buildings and Strategies To Mitigate Vertical Acceleration Demands* - PhD Thesis, The Pennsylvania State University, 2012.
- [148] A. Wada, N. Mori, *Advanced seismic design of buildings for the resilient city*, 2nd International Conference, Mukogama Women's Univ., Nishinomiya, Japan, July 14-16, 2012, pg. 2-7.
- [149] Wang C-H, Foliente G.C. - Discussion on ‘‘Hysteretic models for deteriorating inelastic structures’’. J Eng Mech-ASCE 2001;127(11):1200–2.
- [150] Warn, G.P. și Ryan, K.L. - *A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs*, Buildings, vol.2, no.3, 2012, p.300-325.
- [151] Wen Y.K. (1976) *Method for random vibration of hysteretic systems*, J. Eng. Mech. Division, 102 (2), pp. 249–263.
- [152] ***, *FIP INDUSTRIALE S.p.A. Via Scapacchiò 41 – 35030, Sel Vazzano (PD) – Italy.*
- [153] ***, *Folosirea izolatorilor și amortizorilor seismici*, Revista Construcțiilor nr. 85, sept. 2012, pg. 40.
- [154] ***, *Consolidarea monumentelor istorice prin metoda izolării seismice a bazei folosind izolatori și amortizori seismici*, Revista Construcțiilor nr. 112, mart. 2015, pg. 26.
- [155] ***, *Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance. Part. 1 - General rules, seismic actions and rules for buildings*, cap. 9.
- [156] Z. Tafheem, T.A. Arafat, A. Chowdhury, A. Iqbal - *Seismic Isolation Systems in Structures- the State of Art Review*, Proceedings of 11th Global Engineering, Science and Technology Conference 18 - 19 December, 2015, BIAM Foundation, Dhaka, Bangladesh ISBN: 978-1-922069-92-4
- [157] ***, *Robinson Seismic Ltd Experience Profile PO Box 33093, Petone, New Zealand*, www.rslnz.com.
- [158] ***, *Earthquakes*, <http://www.infoplease.com/ipa/A0001439.html>
- [159] ***, *Structural Applications of Taylor Fluid Viscous Dampers*, <http://taylordevices.com/pdf/2016/01Jan/201601JanStructuralApplicationChart-2015.pdf>
- [160] ***, <http://www.arcdetriumf.ro>
- [161] ***, http://www.serb.ro/test_files/texte/navrom.pdf
- [162] ***, http://www.serb.ro/test_files/texte/integrated.pdf
- [163] ***, *ANSYS User's manual*, 2015
- [164] M.G. Văduva – *Utilizarea barelor disipative cu flambaj împiedicat la construcții noi și existente amplasate în zone seismice*, Universitatea Tehnică de Construcții București, Facultatea de Construcții Civile Industriale și Agricole, 2013.
- [165] F.-S. Florea - *Consolidarea la seism a structurilor în cadre folosind amortizori hysteretici din materiale ductile*, Universitatea Tehnică de Construcții București, Facultatea de Hidrotehnică, 2013.
- [166] ***, *FEMA 451 – Design Examples*.

ANEXA A

CAZURI SUPLIMENTARE DE VALIDARE A APLICAȚIEI *GenEcAm*

Cele trei cazuri de analiză prezentate în această anexă completează studiul de validare a aplicației *GenEcAm* prezentată în capitolul 6.

A.1 Cazul 4 – Clădire P+5E cu amortizori cu fluid vâcos, $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$

Cazurile de analiză 4, 5 și 6 studiază comportamentul la seism al unei clădiri cu structură în cadre de beton armat și regim de înălțime P+5E, în scopul validării aplicației *GenEcAm* și pentru clădiri cu regim de înălțime sub 10 niveluri.

În acest caz clădirea este echipată cu amortizori cu fluid vâcos cu coeficientul de amortizare $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$ și exponentul vitezei $\alpha_v = 1$. Valoarea coeficientului de amortizare c a fost determinată în funcție de valoarea maximă a forței axiale din amortizori, care trebuie să aibă valori între 800 kN și 1000 kN, valori prezentate în literatura de specialitate ca reprezentând domeniul de variație optim al forțelor axiale din amortizori la clădirile în cadre de beton armat [108]. În cazul de față, valoarea maximă a forței axiale din amortizori este în jur de 800 kN pentru $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$. Rezultatele obținute cu cele două programe sunt prezentate comparativ în tabelele de la A.1 la A.9.

Tab. A.1 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$ ($T_c = 0,7 \text{ s}$)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
01	13.09	13	0.6	0.106	0.110	3.6	3.62	3.46	4.4
02	13.11	13.27	1.2	0.092	0.095	3.1	3.35	3.38	0.8
22	12.05	12.11	0.4	0.092	0.094	2.1	3.74	3.57	4.5

În urma analizelor cazului 4 pentru $T_c = 0,7 \text{ s}$ realizate cu cele două programe, se poate concluziona că rezultatele sunt foarte apropiate, diferențele fiind foarte mici (între 0,4% și 4,5% pentru valorile maxime), fapt evidențiat și în exemplele din figurile A.1 și A.2 care prezintă o mică parte din rezultatele obținute și comparate.

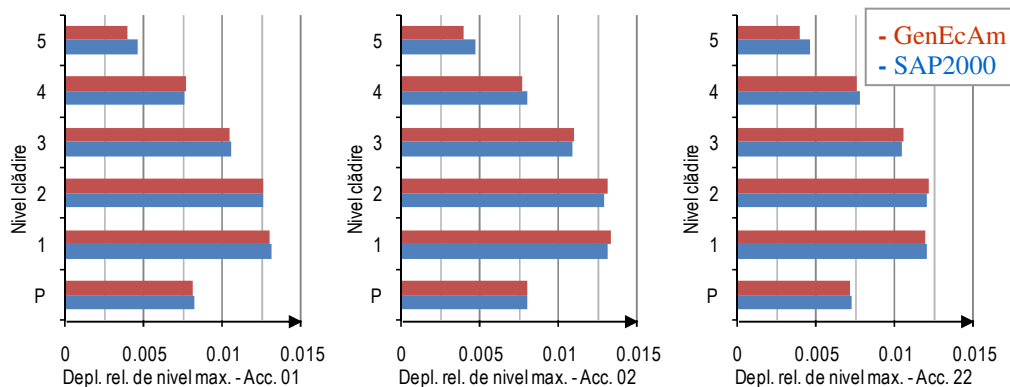


Fig. A.1 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$ (accelerogramele 01, 02, 22 pentru $T_c=0,7 \text{ s}$)

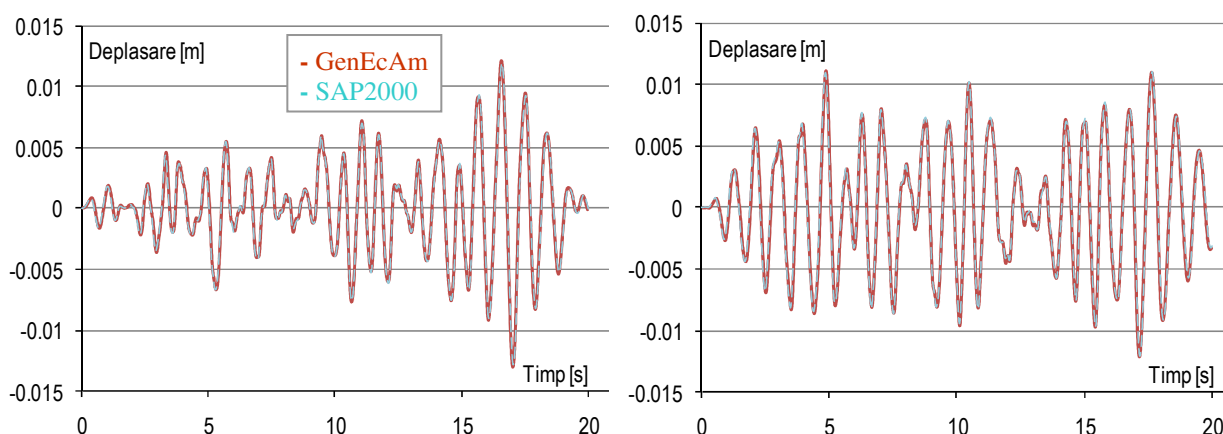


Fig. A.2 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E (acc. 02 și 22, $T_c = 0,7$ s)

Pentru o analiză mai detaliată a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe (SAP2000 și GenEcAm), am prezentat în tab. A.2 rezultatele prelucrării statistice a diferențelor între deplasările relative de nivel pentru fiecare etaj în parte în cazul 4 de analiză. Parametrii statistici analizați sunt aceiași cu cei de la cazurile de analiză a structurii P+10E.

Tab. A.2 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 2000$ kNs/m², $T_c = 0,7$ s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
01	Media [mm]	0.16	0.16	0.13	0.17	0.21	0.25	0.18
	Eroarea [%]	1.95	1.23	1.07	1.61	2.79	5.42	2.35
	Abaterea	0.13	0.13	0.12	0.13	0.16	0.20	0.15
	Dispersia	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.04	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.82
02	Media [mm]	0.15	0.14	0.13	0.15	0.18	0.21	0.16
	Eroarea [%]	1.91	1.09	1.01	1.42	2.27	4.43	2.02
	Abaterea	0.12	0.11	0.11	0.12	0.15	0.18	0.13
	Dispersia	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.82
22	Media [mm]	0.16	0.17	0.17	0.18	0.21	0.27	0.19
	Eroarea [%]	2.22	1.42	1.42	1.77	2.69	5.89	2.57
	Abaterea	0.12	0.13	0.12	0.14	0.17	0.20	0.15
	Dispersia	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03
	Coef. var.	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.77
Media diferențelor pe set accelerograme $\overline{\Delta x} = 0.17$ mm								

În urma prelucrării statistice a diferențelor a rezultat o diferență medie de 0,17 mm între cele două seturi de deplasări relative de nivel obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Abaterea pătratică medie caracterizează gradul de reprezentativitate a valorii medii, iar valorile de $0,13 \div 0,15$ mm care s-au obținut în acest studiu arată că limitele între care variază diferențele sunt apropiate de valoarea medie, iar valorile dispersiei $0,02 \div 0,03$ și ale coeficientului de variație $0,77 \div 0,82$ arată faptul că distribuția diferențelor este omogenă, adică acestea nu sunt grupate în jurul unei valori.

În fig. A.3 sunt prezentate valorile tuturor diferențelor medii între valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel obținute pentru fiecare etaj în parte cu cele două programe.

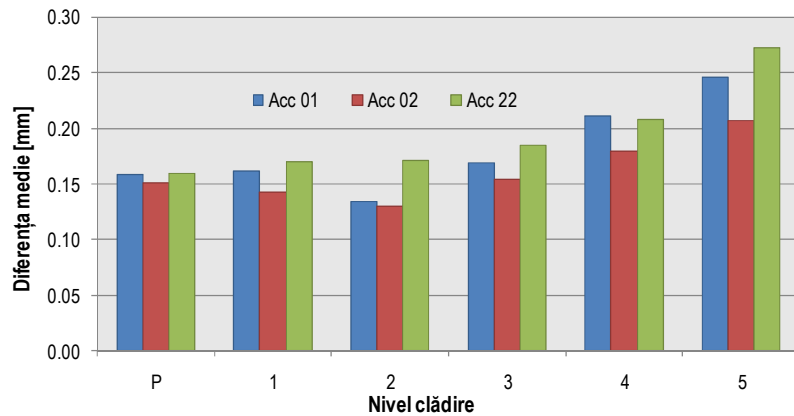


Fig. A.3 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+5E – $c = 2000$ kNs/m, pentru $T_c=0,7$ s

În tab. A.3 am prezentat rezultatele valorilor maxime ale deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative, obținute cu cele două programe, pentru $T_c = 1$ s.

Tab. A.3 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m² ($T_c = 1$ s)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Accelerații relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
02	14.36	14.21	1	0.118	0.122	3.2	4.39	4.17	5
03	14.88	15.30	2.7	0.117	0.118	0.8	4.15	3.93	5.3
11	16.44	16.76	1.9	0.108	0.114	5.2	4.14	3.91	5.5

Fig. A.4 prezintă valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel pe toate cele șase niveluri ale clădirii pentru cele trei acceleroگرامe luate în calcul (pentru $T_c = 1$ s), iar în fig. A.5 sunt prezentate două exemple de variație în timp a deplasărilor relative de nivel pentru etajul 2 la care se atinge deplasarea relativă de nivel maximă.

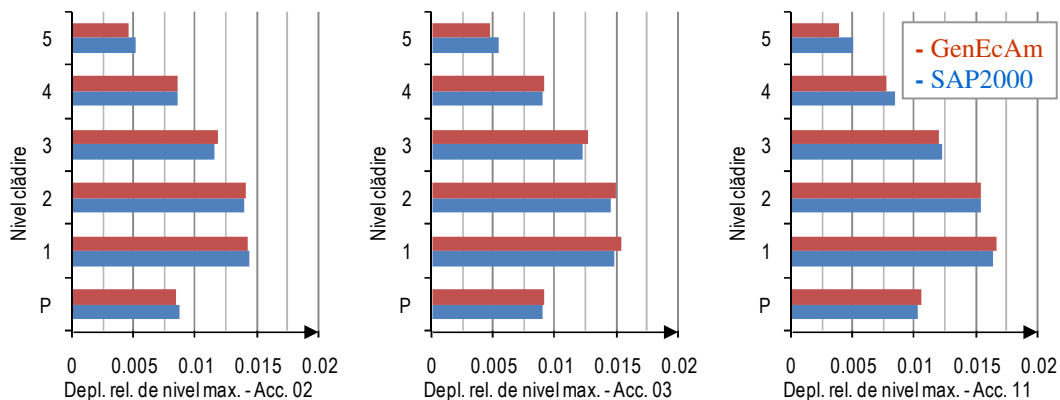


Fig. A.4 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m² (acceleroگرامele 02, 03, 11 pentru $T_c=1$ s)

Fig. A.4 arată că valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel sunt foarte apropiate, situație care se observă la toate nivelurile clădirii.

Diferența dintre datele obținute cu programele *SAP2000* și *GenEcAm* la analiza dinamică time-history cu acceleroگرامe pentru $T_c = 1$ s pentru clădirea P+10E echipată cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 2000$ kNs/m², este de maxim 2,7% pentru deplasările relative de nivel

maxime, maxim 5,2% pentru vitezele relative de nivel maxime și de maxim 5,5% pentru accelerațiile relative maxime. Diferențele sunt foarte mici, fapt evidențiat și în exemplele din figurile A.4 și A.5, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate.

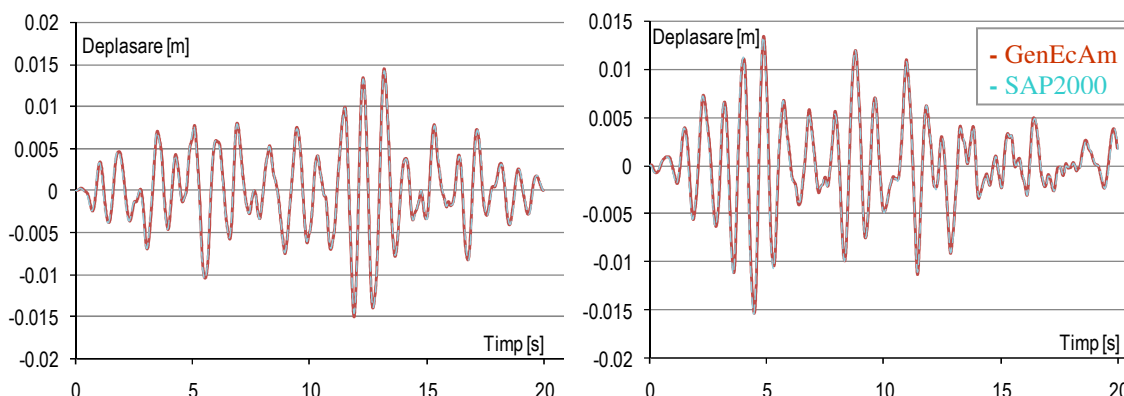


Fig. A.5 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E
– $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelerogramele 03 și 11 ($T_c = 1 \text{ s}$)

Studiind variația în timp a deplasărilor relative de nivel (fig. A.5) se observă că cele două curbe obținute cu cele două programe, practic se suprapun pe toată durata seismului, fapt care arată corectitudinea modelului analitic-computațional implementat în *GenEcAm* pentru acest caz de analiză.

Pentru o analiză mai detaliată a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe (*SAP2000* și *GenEcAm*) în cazul 4 de analiză pentru $T_c = 1 \text{ s}$, se prezintă în tab. A.4 rezultatele prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de rezultate de tip deplasări relative de nivel obținute pentru fiecare etaj în parte.

Tabel A.4 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1 \text{ s}$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
02	Media [mm]	0.17	0.19	0.18	0.20	0.23	0.30	0.21
	Eroarea [%]	2.00	1.30	1.32	1.75	2.73	5.85	2.49
	Abaterea	0.13	0.14	0.14	0.16	0.19	0.24	0.17
	Dispersia	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.06	0.03
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
03	Media [mm]	0.15	0.14	0.13	0.15	0.18	0.23	0.16
	Eroarea [%]	1.62	0.96	0.90	1.26	2.05	4.34	1.86
	Abaterea	0.13	0.13	0.12	0.13	0.16	0.20	0.15
	Dispersia	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.88
11	Media [mm]	0.16	0.15	0.13	0.16	0.20	0.24	0.17
	Eroarea [%]	1.52	0.94	0.83	1.31	2.42	4.88	1.98
	Abaterea	0.13	0.13	0.12	0.14	0.17	0.21	0.15
	Dispersia	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.04	0.02
	Coef. var.	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.87
Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta x = 0.18 \text{ mm}$								
Eroarea medie pe set de accelerograme 2.11 %								

În urma prelucrării statistice a diferențelor a rezultat o diferență medie de 0,18 mm între cele două seturi de deplasări relative de nivel obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic-computațional propus.

Abaterea pătratică medie ia valori între $0,15 \div 0,17$ mm, fapt care arată că limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de $0,02 \div 0,03$ și ale coeficientului de variație $0,8 \div 0,87$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă într-un interval de variație mic.

În fig. A.6 sunt prezentate valorile tuturor diferențelor medii între valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel obținute pentru fiecare etaj în parte cu cele două programe.

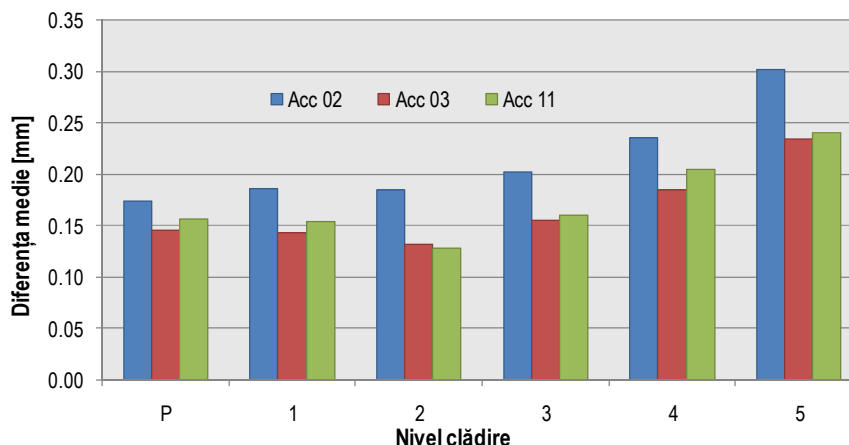


Fig. A.6 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu SAP2000 și GenEcAm la clădirea P+5E – $c = 2000$ kNs/m, pentru $T_c = 1$ s

În tab. A.5 am prezentat rezultatele valorilor maxime ale deplasărilor, vitezelor și acceleratiilor relative, obținute cu cele două programe, pentru cazul 4 de analiză și $T_c = 1,6$ s.

Tab. A.5 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m² ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
04	15.21	15.23	0.1	0.103	0.104	0.9	3.63	3.57	1.6
05	14.35	14.08	1.8	0.110	0.110	0	3.71	3.65	1.6
11	15.73	15.56	1	0.099	0.102	2.9	3.70	3.76	1.5

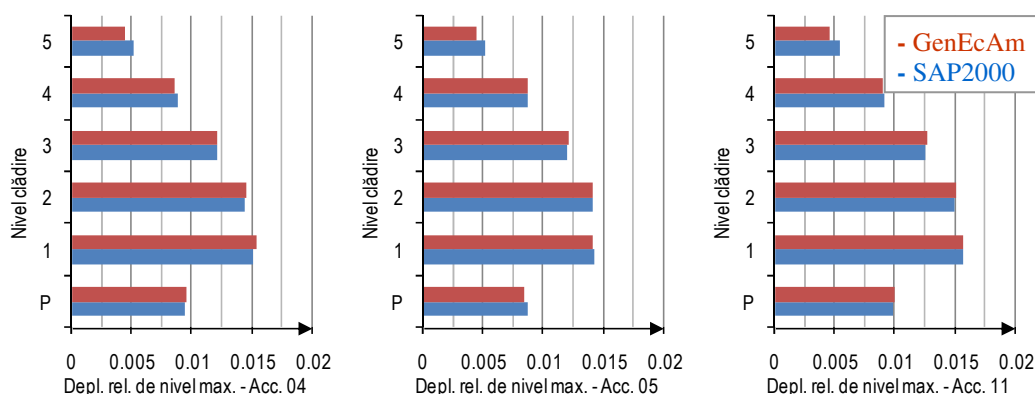


Fig. A.7 Deplasări relative de nivel maxime ale clădirii P+5E – $c = 2000$ kNs/m² (accelerogramele 04, 05, 11 pentru $T_c = 1,6$ s)

Diferența dintre datele obținute cu cele două programe este de maxim 1,8% pentru deplasările relative de nivel maxime, maxim 2,9% pentru vitezele relative de nivel maxime și de maxim 1,6% pentru acceleratiile relative maxime. Diferențele sunt relativ mici, fapt evidențiat și

în exemplele din figurile A.7 și A.8, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate pentru acest caz de analiză.

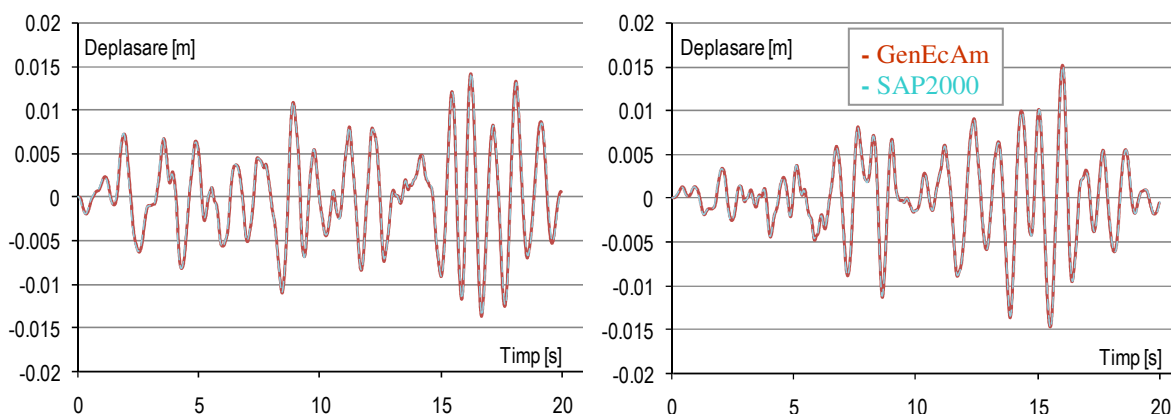


Fig. A.8 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E (acc. 05 și 11, $T_c = 1,6$ s)

În tabelele A.6, A.7 și A.8 am prezentat valorile parametrilor statistici rezultați în urma prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de rezultate (SAP2000 și GenEcAm) obținute pentru deplasările relative de nivel, vitezele relative de nivel și respectiv accelerațiile relative la fiecare etaj în parte.

Tab. A.6 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 2000$ kNs/m², $T_c=1,6$ s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
04	Media [mm]	0.15	0.15	0.16	0.17	0.19	0.28	0.18
	Eroarea [%]	1.59	0.97	1.08	1.41	2.15	5.44	2.11
	Abaterea	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.21	0.14
	Dispersia	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.75
05	Media [mm]	0.15	0.14	0.13	0.15	0.18	0.25	0.17
	Eroarea [%]	1.77	0.97	0.95	1.29	2.08	4.75	1.97
	Abaterea	0.12	0.12	0.11	0.13	0.15	0.20	0.14
	Dispersia	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.82
11	Media [mm]	0.15	0.14	0.12	0.15	0.18	0.22	0.16
	Eroarea [%]	1.52	0.88	0.79	1.23	1.94	4.01	1.73
	Abaterea	0.12	0.11	0.10	0.12	0.15	0.20	0.13
	Dispersia	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.85
Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta x = 0.17$ mm ,								
Eroare = 1.93%								

În urma prelucrării statistice a diferențelor pentru deplasările relative de nivel, a rezultat o diferență medie de 0,17 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Abaterea pătratică medie pentru acest caz de analiză ia valori între 0,13÷0,14 mm și arată reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile

dispersiei de 0,02 și ale coeficientului de variație $0,75 \div 0,85$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic.

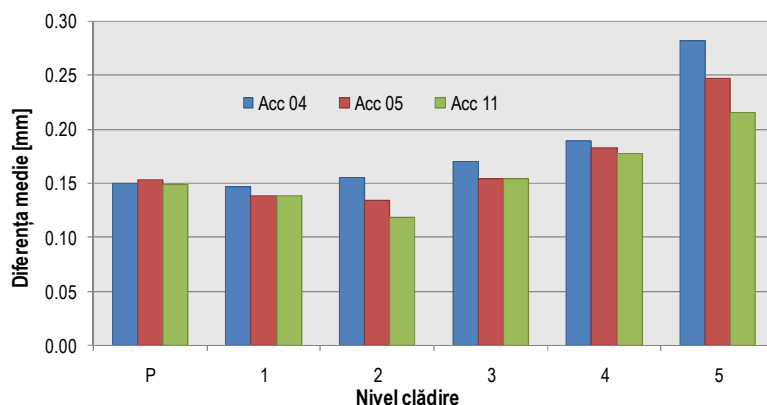


Fig. A.9 Diferențele medii între deplasările relative de nivel obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea $P+5E - c = 2000 \text{ kNs/m}$, pentru $T_c = 1.6 \text{ s}$

Am realizat aceleași prelucrări statistice și pentru compararea vitezelor relative de nivel pentru a valida modelul analitic-computațional implementat în programul *GenEcAm*.

Tab. A.7 Prelucrarea statistică a vitezelor relative de nivel ($P+5E - c = 2000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1,6\text{s}$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
04	Media [mm/s]	1.90	2.38	2.04	2.31	2.79	2.98	2.4
	Eroarea [%]	3.13	2.34	1.98	2.59	4.20	7.45	3.62
	Abaterea	1.63	1.94	1.54	1.92	2.36	2.24	1.94
	Dispersia	2.64	3.76	2.36	3.68	5.55	5.01	3.83
	Coef. var.	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.82
05	Media [mm/s]	2.24	2.66	2.18	2.52	3.21	3.08	2.65
	Eroarea [%]	3.45	2.47	1.97	2.65	4.68	7.38	3.77
	Abaterea	1.88	2.30	1.80	2.21	2.81	2.63	2.27
	Dispersia	3.53	5.27	3.25	4.86	7.92	6.92	5.29
	Coef. var.	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.87
11	Media [mm/s]	2.21	2.57	1.91	2.56	3.20	2.91	2.56
	Eroarea [%]	3.44	2.59	1.94	3.10	5.22	7.61	3.98
	Abaterea	1.84	2.25	1.60	2.19	2.72	2.43	2.17
	Dispersia	3.38	5.08	2.57	4.78	7.39	5.92	4.85
	Coef. var.	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.85

Media diferențelor pe set accelerograme $\bar{\Delta x} = 2.53 \text{ mm/s}$

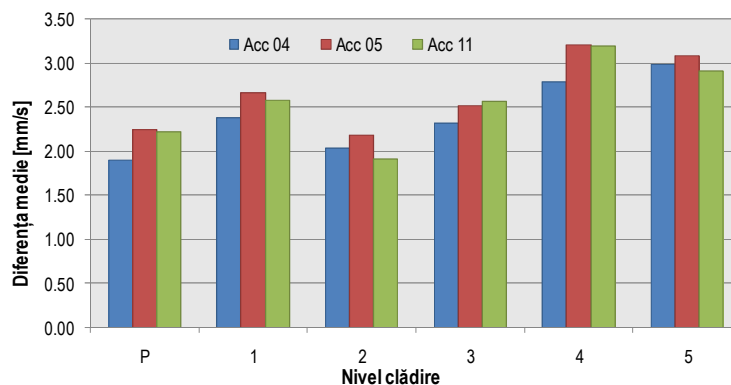


Fig. A.10 Valoarea diferențelor medii între vitezele relative de nivel obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea $P+5E - c = 2000 \text{ kNs/m}$, pentru $T_c=1,6 \text{ s}$

La analiza diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe pentru vitezele relative de nivel la fiecare etaj al clădirii studiate, în urma prelucrării statistice a rezultat o diferență medie de 2,53 mm/s între cele două seturi de date, valoare care validează corectitudinea modelului analitic și computațional propus în cadrul acestui studiu.

Valorile abaterii medii pătratice pentru acest caz de analiză sunt între 1,94÷2,29 mm/s evidențiind reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de 3,83÷5,29 și ale coeficientului de variație 0,82÷0,87, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic, ca și în cazul deplasărilor relative de nivel.

S-au realizat prelucrări statistice și pentru compararea rezultatelor în cazul accelerațiilor relative la fiecare nivel al clădirii studiate, pentru completarea studiului de validare a programului *GenEcAm*.

Tab. A.8 Prelucrarea statistică a accelerațiilor relative ($P+10E - c = 2000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1,6\text{s}$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
04	Media [m/s^2]	0.05	0.09	0.09	0.08	0.07	0.11	0.08
	Eroarea [%]	9.01	6.36	4.26	2.87	2.17	3.04	4.62
	Abaterea	0.04	0.08	0.08	0.06	0.05	0.08	0.07
	Dispersia	0.002	0.006	0.006	0.004	0.003	0.007	0.005
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.83
05	Media [m/s^2]	0.06	0.10	0.11	0.09	0.07	0.12	0.09
	Eroarea [%]	9.47	6.34	4.26	2.89	2.09	3.11	4.69
	Abaterea	0.05	0.09	0.09	0.07	0.06	0.10	0.08
	Dispersia	0.003	0.008	0.009	0.005	0.003	0.010	0.006
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.85
11	Media [m/s^2]	0.06	0.10	0.10	0.07	0.07	0.11	0.09
	Eroarea [%]	8.80	6.53	4.36	2.62	1.94	3.04	4.55
	Abaterea	0.05	0.09	0.09	0.06	0.05	0.09	0.07
	Dispersia	0.002	0.008	0.007	0.004	0.003	0.009	0.006
	Coef. var.	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.83
Media diferențelor pe set accelerograme $\overline{\Delta x} = 0.08 \text{ m/s}^2$								

În fig. A.11 sunt prezentate toate valorile diferențelor medii dintre maximele vitezelor relative de nivel obținute cu cele două programe la fiecare etaj în parte.

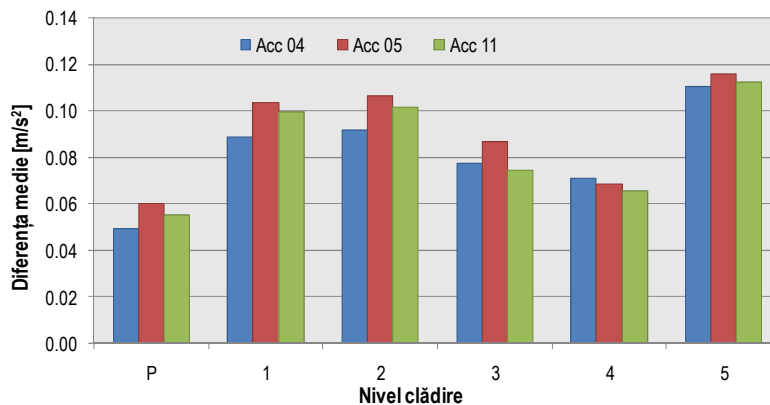


Fig. A.11 Valoarea diferențelor medii între accelerațiile relative obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea $P+5E - c = 2000 \text{ kNs/m}^2$, pentru $T_c=1,6 \text{ s}$

La analiza diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe pentru accelerațiile relative la fiecare etaj al clădirii studiate, în urma prelucrării statistice a rezultat o diferență medie de $0,08 \text{ m/s}^2$ între cele două seturi de date, valoare care validează corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Valorile abaterii medii pătratice pentru acest caz de analiză sunt între $0,07 \div 0,08 \text{ m/s}^2$ evidențiind reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile dispersiei de $0,005 \div 0,006$ și ale coeficientului de variație $0,83 \div 0,85$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic, ca și în cazul deplasărilor și vitezelor relative de nivel.

Pentru un studiu comparativ complet al rezultatelor obținute cu cele două programe s-au analizat și diferențele între valorile forțelor axiale din amortizorii cu fluid vâcos folosiți la fiecare nivel al clădirii studiate, pe care le-am sintetizat în tab. A.9.

Tab. A.9 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$

Forța de amortizare maximă în amortizorii cu fluid vâcos											
$T_c = 0,7 \text{ s}$				$T_c = 1 \text{ s}$				$T_c = 1,6 \text{ s}$			
Acc:	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc:	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc:	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]
01	187	193	3.1	02	207	215	3.7	04	181	183	1
02	162	166	2.4	03	205	208	1.4	05	194	193	0.5
22	162	166	2.4	11	190	201	5.4	11	174	181	3.8

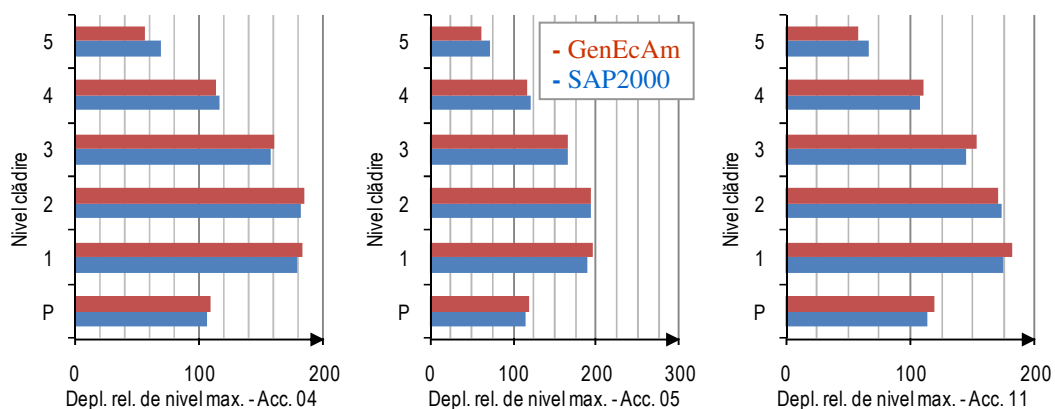


Fig. A.12 Forțe axiale maxime în amortizorii cu fluid vâcos (P+5E, $T_c = 1,6 \text{ s}$)

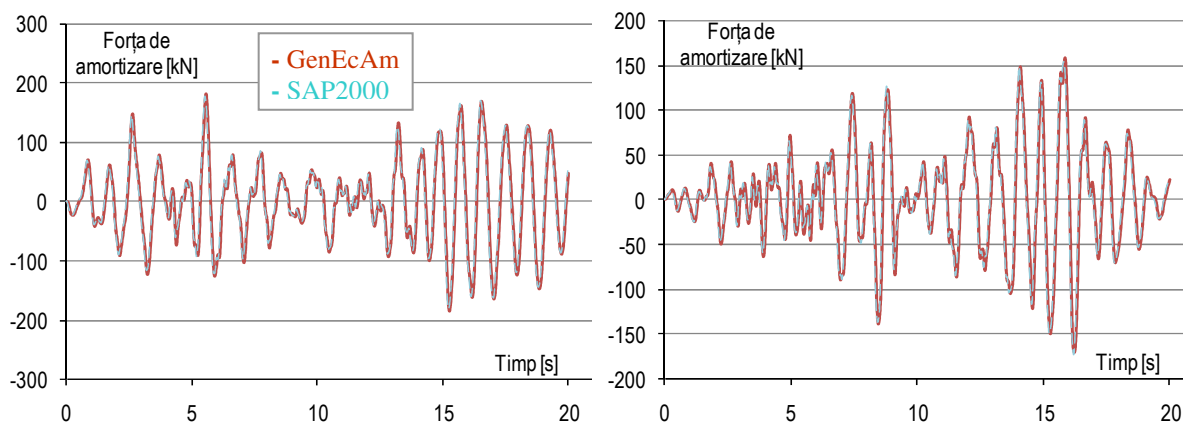


Fig. A.13 Variația în timp a forței axiale din amortizori la et. 2 al clădirii P+5E – $c = 2000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelerațiile 04 și 11 ($T_c = 1,6 \text{ s}$)

Din fig. A.13, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate pentru acest caz de analiză, se observă că și forțele de amortizare din amortizori sunt foarte apropiate, fapt care validează și din acest punct de vedere corectitudinea modelului analitic-computațional implementat în aplicația software *GenEcAm*.

La studiul comparativ al forțelor axiale din dispozitivele de amortizare folosite, diferența dintre datele obținute cu cele două programe este de maxim 3,1% pentru $T_c = 0,7$ s, maxim 5,4% pentru $T_c = 1$ s și maxim 3,8% pentru $T_c = 1,6$ s.

A.2 Cazul 5 – Clădire P+5E cu amortizori cu fluid vâscos, $c = 4000$ kNs/m²

În acest caz clădirea este echipată cu amortizori cu fluid vâscos cu coeficientul de amortizare $c = 4000$ kNs/m² și exponentul vitezei $\alpha_v = 1$. Valoarea coeficientului de amortizare c a fost determinată astfel încât valoarea maximă a forței axiale din amortizori să aibă o valoare de aproximativ 1000 kN [108]. Rezultatele obținute cu cele două programe sunt prezentate comparativ în tabelele de la A.10 la A.18.

Tab. A.10 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m² ($T_c = 0,7$ s)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
01	11.23	11.31	0.7	0.090	0.093	3.2	3.=9	2.93	5.1
02	10.52	10.51	0.1	0.072	0.073	1.3	2.77	2.71	2.1
22	9.60	9.64	0.4	0.077	0.078	1.2	3.33	3.18	4.5

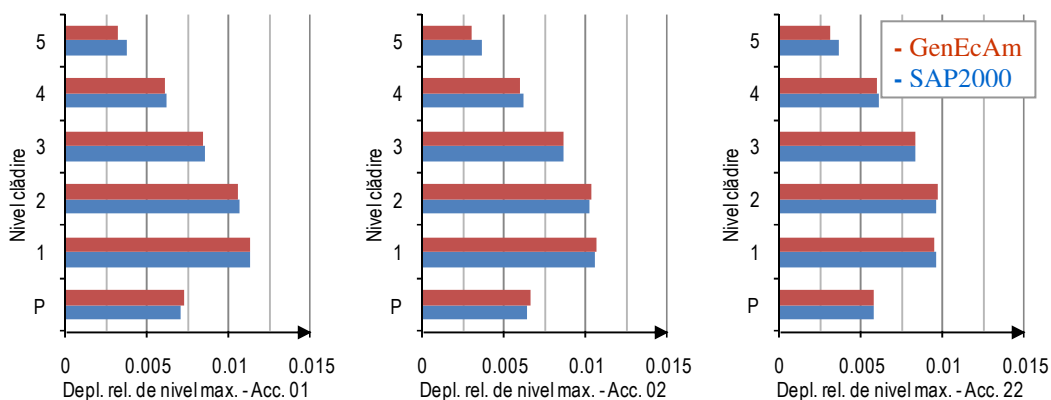


Fig. A.14 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m² (accelerogramele 01, 02, 22 pentru $T_c=0,7$ s)

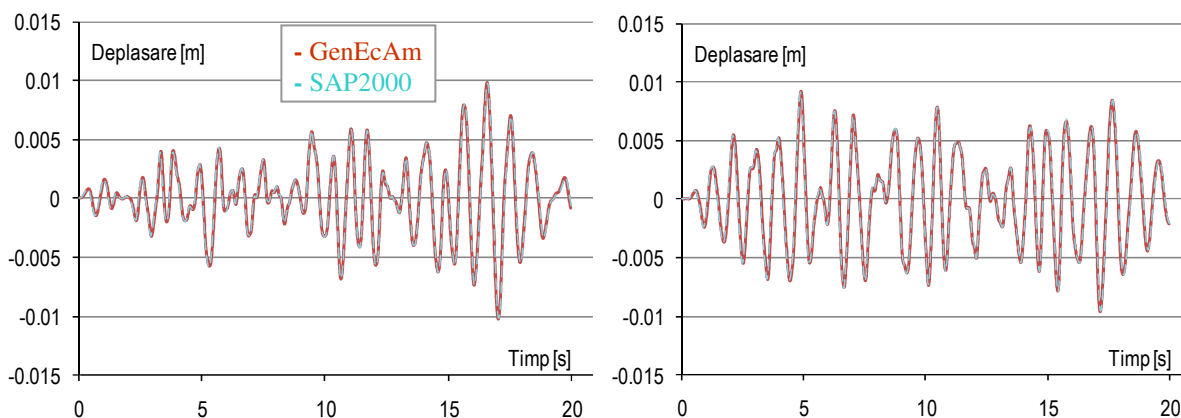


Fig. A.15 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E – $c=4000$ kNs/m², pentru accelerogramele 02 și 22 ($T_c = 0,7$ s)

În urma analizelor cazului 5 pentru $T_c = 0,7$ s realizate cu cele două programe, se poate concluziona că rezultatele sunt foarte apropiate, diferențele fiind foarte mici (între 0,1% și 5,1% pentru valorile maxime), fapt evidențiat și în exemplele din figurile A.14 și A.15 care prezintă o mică parte din rezultatele obținute și comparate.

Pentru o analiză mai detaliată a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe (*SAP2000* și *GenEcAm*), se prezintă în tab. A.11 prelucrarea statistică a diferențelor între cele două seturi de rezultate de tip deplasări relative de nivel, obținute pentru fiecare etaj în parte, pentru setul de trei accelerograme corespunzătoare perioadei de colț $T_c = 0,7$ s.

Tab. A.11 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel ($P+5E - c = 4000$ kNs/m², $T_c=0,7$ s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
01	Media [mm]	0.18	0.10	0.11	0.12	0.13	0.18	0.14
	Eroarea [%]	2.65	0.90	1.02	1.42	2.08	4.98	2.18
	Abaterea	0.15	0.08	0.09	0.10	0.10	0.15	0.11
	Dispersia	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.82
02	Media [mm]	0.17	0.09	0.10	0.11	0.12	0.15	0.12
	Eroarea [%]	2.57	0.89	0.98	1.32	1.86	4.24	1.98
	Abaterea	0.14	0.08	0.08	0.09	0.09	0.13	0.1
	Dispersia	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
22	Media [mm]	0.19	0.11	0.13	0.14	0.14	0.21	0.15
	Eroarea [%]	3.34	1.10	1.39	1.70	2.30	5.65	2.58
	Abaterea	0.15	0.08	0.09	0.10	0.10	0.14	0.11
	Dispersia	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
	Coef. var.	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.73
Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta x = 0.13$ mm								

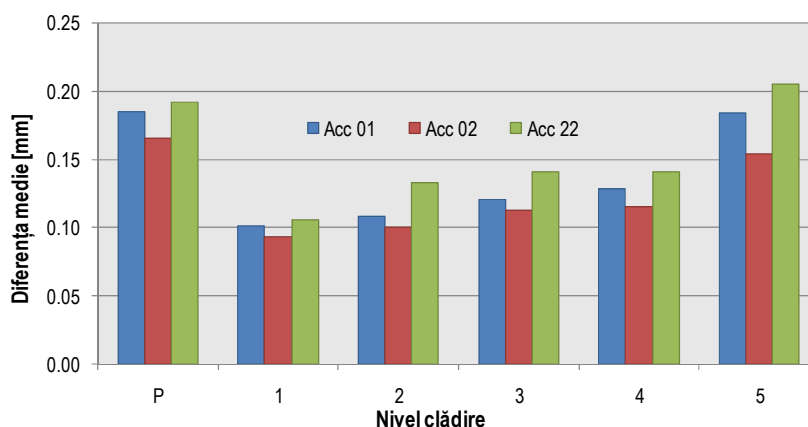


Fig. A.16 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea $P+5E - c = 4000$ kNs/m, pentru $T_c=0,7$ s

În urma prelucrării statistice a diferențelor a rezultat o diferență medie de 0,13 mm între cele două seturi de deplasări relative de nivel obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu și implementat în programul *GenEcAm*.

Și în acest caz, valorile de $0,1 \pm 0,11$ mm care s-au obținut în acest studiu pentru abaterea medie pătratică, caracterizează gradul de reprezentativitate a valorii medii, iar valorile dispersiei

de 0,01 arată că limitele între care variază diferențele sunt apropiate de valoarea medie. Intervalul de valori $0,73 \pm 0,82$ ale coeficientului de variație, arată faptul că distribuția diferențelor este omogenă, adică acestea nu sunt grupate în jurul unei valori.

Se poate concluziona că pentru cele trei accelerograme sintetice ($T_c = 0,7$ s) folosite în procesul de comparare a rezultatelor, diferențele în ceea ce privește deplasările relative de nivel sunt în medie 2,24 %, iar pentru etajul 2 variațiile acestor deplasări în timp se suprapun aproape identic (fig. A.15). Deci putem spune că pentru acest caz modelul analitic-computațional este validat.

În tab. A.12 sunt prezentate rezultatele valorilor maxime ale deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative, obținute cu cele două programe (SAP2000 și GenEcAm), pentru $T_c = 1$ s.

Tab. A.12 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m² ($T_c = 1$ s)

Accele rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Acceleratii relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
02	11.38	11.43	0.4	0.093	0.096	3.1	3.73	3.63	2.6
03	13.09	13.42	2.4	0.099	0.098	1	3.82	3.61	5.4
11	13.35	13.42	0.5	0.085	0.089	4.4	3.80	3.62	4.7

În fig. A.17 sunt evidențiate valorile maxime ale deplasărilor relative de nivel pe toate cele 6 niveluri ale clădirii pentru cele trei accelerograme luate în calcul (pentru $T_c = 1$ s), iar în fig. A.18 sunt prezentate două exemple de variație în timp a deplasărilor relative de nivel pentru etajul 2 la care se atinge deplasarea relativă de nivel maximă.

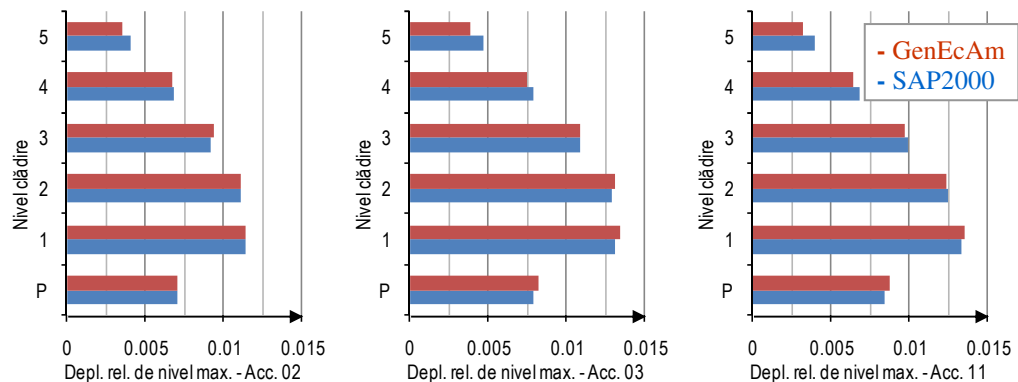


Fig. A.17 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m² (accelerogramele 02, 03, 11 pentru $T_c=1$ s)

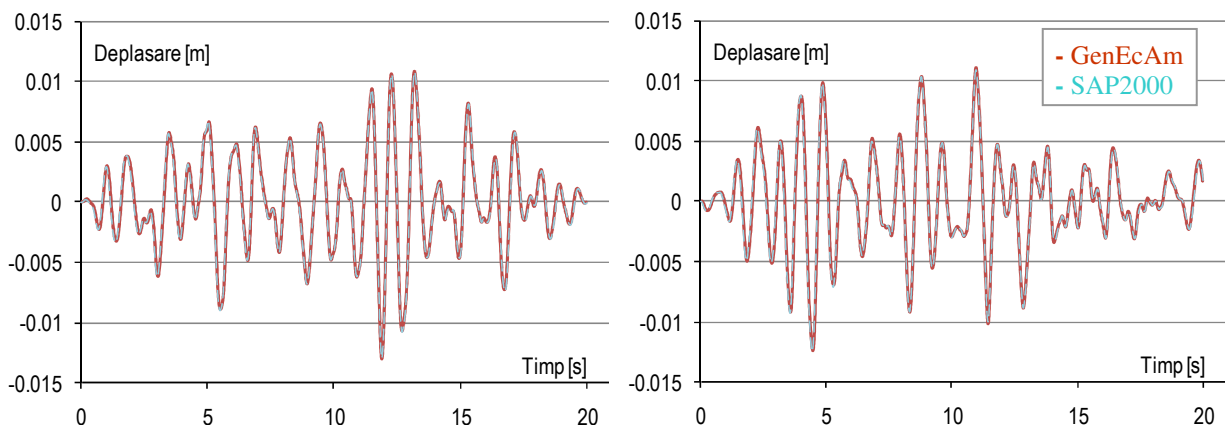


Fig. A.18 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E – $c=4000$ kNs/m², pentru accelerogramele 03 și 11 ($T_c = 1$ s)

Diferența dintre datele obținute cu programele *SAP2000* și *GenEcAm* la analiza dinamică time-history cu accelerograme pentru $T_c = 1$ s pentru clădirea P+5E echipată cu amortizori cu fluid vâscos cu $c = 4000$ kNs/m², este de maxim 2.4% pentru deplasările relative de nivel maxime, maxim 4,4% pentru vitezele relative de nivel maxime și de maxim 5,4% pentru accelerațiile relative maxime.

Diferențele la variația în timp a deplasărilor sunt prezentate exemplificativ în fig. A.18 din care se observă că cele două variații în timp aproape se suprapun.

Pentru o analiză mai detaliată a diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe (*SAP2000* și *GenEcAm*) în cazul 5 de analiză pentru $T_c = 1$ s, se prezintă în tab. A.13 rezultatele prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de deplasări relative de nivel obținute pentru fiecare etaj în parte.

Tab. A.13 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E – $c = 4000$ kNs/m², $T_c=1$ s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
02	Media [mm]	0.21	0.11	0.14	0.15	0.15	0.23	0.17
	Eroarea [%]	3.00	0.97	1.27	1.63	2.28	5.75	2.48
	Abaterea	0.16	0.09	0.11	0.12	0.12	0.18	0.13
	Dispersia	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
03	Media [mm]	0.17	0.09	0.11	0.12	0.12	0.18	0.13
	Eroarea [%]	2.18	0.70	0.85	1.10	1.57	3.90	1.72
	Abaterea	0.15	0.08	0.10	0.10	0.11	0.16	0.12
	Dispersia	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
11	Media [mm]	0.18	0.10	0.11	0.12	0.13	0.18	0.14
	Eroarea [%]	2.14	0.72	0.88	1.22	1.88	4.62	1.91
	Abaterea	0.15	0.08	0.09	0.10	0.10	0.16	0.11
	Dispersia	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.82

Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta x = 0.14$ mm

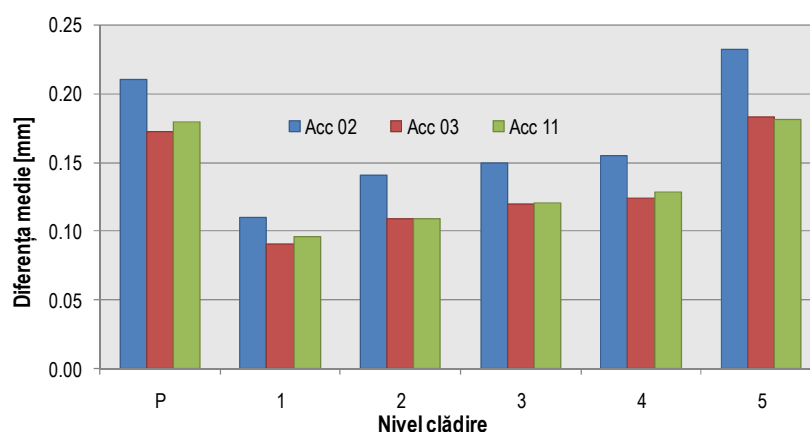


Fig. A.19 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+5E – $c = 4000$ kNs/m, pentru $T_c=1$ s

În urma prelucrării statistice a diferențelor a rezultat o diferență medie de 0,14 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Și în acest caz, valorile de $0,11 \div 0,13$ mm care s-au obținut în acest studiu pentru abaterea medie pătratică, caracterizează gradul de reprezentativitate a valorii medii, iar valorile dispersiei de $0,01 \div 0,02$ arată că limitele între care variază diferențele sunt apropiate de valoarea medie, fapt evidențiat și în fig. A.19. Intervalul de valori $0,8 \div 0,9$ ale coeficientului de variație, arată faptul că distribuția diferențelor este omogenă.

În concluzie, pentru cele trei accelerograme sintetice ($T_c = 1$ s) folosite în procesul de comparare a rezultatelor, diferențele în ceea ce privește deplasările relative de nivel sunt în medie 2,03 %, iar variațiile acestor deplasări în timp pentru etajul 2 la care se ating valori maxime, se suprapun aproape identic (fig. A.18). Deci putem spune că și pentru acest caz modelul analitic-computațional este validat.

În tab. A.14 sunt prezentate rezultatele valorilor maxime ale deplasărilor, vitezelor și accelerațiilor relative, obținute cu cele două programe (*SAP2000* și *GenEcAm*), pentru cazul 5 de analiză și $T_c = 1,6$ s.

Tab. A.14 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m² ($T_c = 1,6$ s)

Accele- rograma	Deplasari relative de nivel maxime			Viteze relative de nivel maxime			Accelerații relative Maxime		
	SAP [mm]	GenEcAm [mm]	Dif. [%]	SAP [m/s]	GenEcAm [m/s]	Dif. [%]	SAP [m/s ²]	GenEcAm [m/s ²]	Dif. [%]
04	12.74	12.67	0.5	0.091	0.093	2.1	2.88	2.79	3.1
05	11.63	11.64	0.1	0.090	0.092	2.1	3.07	2.96	3.5
11	13.11	13.02	0.6	0.080	0.082	2.4	3.26	3.17	2.7

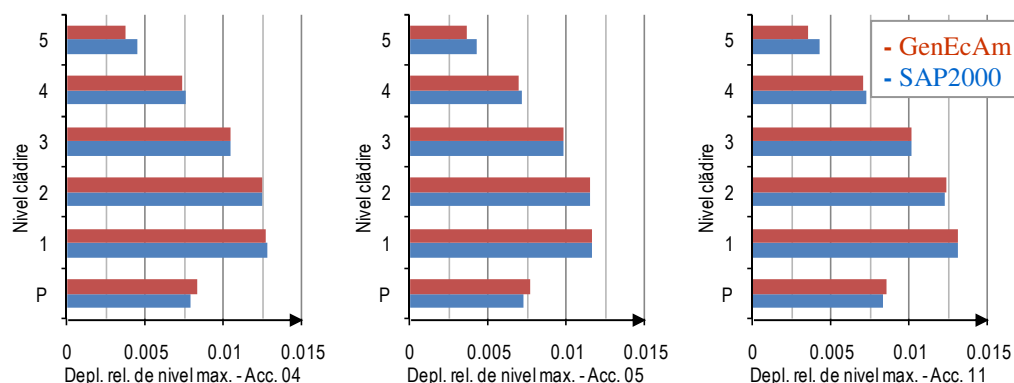


Fig. A.20 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m² (accelerogramele 04, 05, 11 pentru $T_c=1,6$ s)

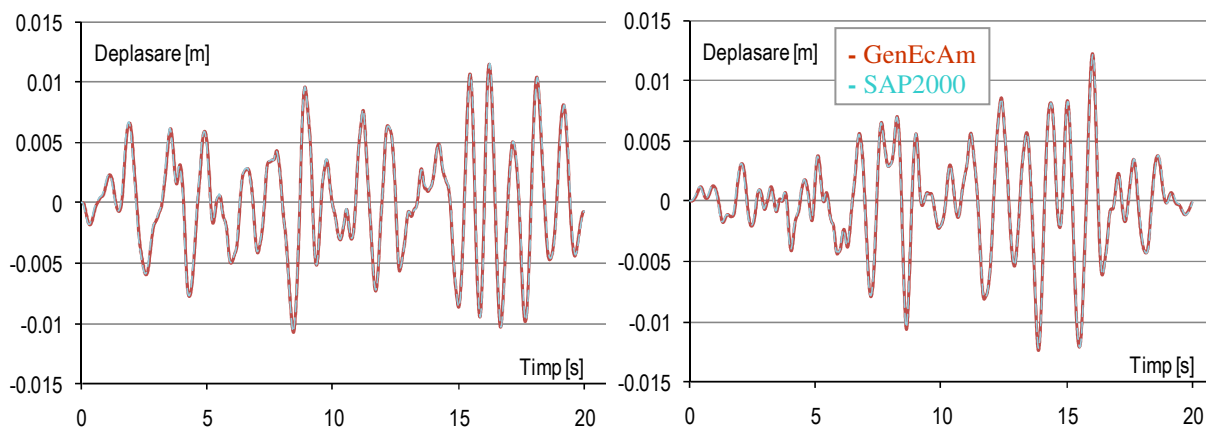


Fig. A.21 Variația în timp a deplasării relative de nivel la et. 2 al clădirii P+5E – $c = 4000$ kNs/m², pentru accelerogramele 05 și 11 ($T_c = 1.6$ s)

Diferența dintre datele obținute cu cele două programe este de maxim 0,6% pentru deplasările relative de nivel maxime, maxim 2,4% pentru vitezele relative de nivel maxime și de maxim 3,5% pentru accelerațiile relative maxime. Diferențele sunt relativ mici, fapt evidențiat și în exemplele din figurile A.20 și A.21, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate pentru acest caz de analiză.

La analiza grafică a acestor variații în timp se observă că variațiile acestor deplasări în timp pentru etajul 2 la care se ating valori maxime, se suprapun aproape identic (fig. A.18). Deci putem spune că pentru acest caz modelul analitic-computațional este validat.

În tabelele A.15, A.16 și A.17 am prezentat valorile parametrilor statistici rezultați în urma prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de rezultate obținute pentru deplasările relative de nivel, vitezele relative de nivel și respectiv accelerațiile relative la fiecare etaj în parte.

Tab. A.15 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel ($P+5E - c = 4000 \text{ kNs/m}^2$, $T_c=1,6s$)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
04	Media [mm]	0.20	0.09	0.13	0.14	0.15	0.24	0.16
	Eroarea [%]	2.55	0.74	1.07	1.35	1.95	5.28	2.16
	Abaterea	0.15	0.07	0.10	0.10	0.11	0.17	0.12
	Dispersia	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
	Coef. var.	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.73
05	Media [mm]	0.18	0.09	0.11	0.12	0.13	0.20	0.14
	Eroarea [%]	2.47	0.80	0.98	1.25	1.84	4.80	2.02
	Abaterea	0.15	0.07	0.09	0.10	0.11	0.16	0.11
	Dispersia	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
11	Media [mm]	0.17	0.08	0.10	0.11	0.12	0.17	0.13
	Eroarea [%]	2.10	0.65	0.80	1.13	1.66	4.01	1.73
	Abaterea	0.14	0.07	0.09	0.09	0.10	0.16	0.11
	Dispersia	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.85

Media diferențelor pe set accelerograme $\Delta x = 0.14 \text{ mm}$

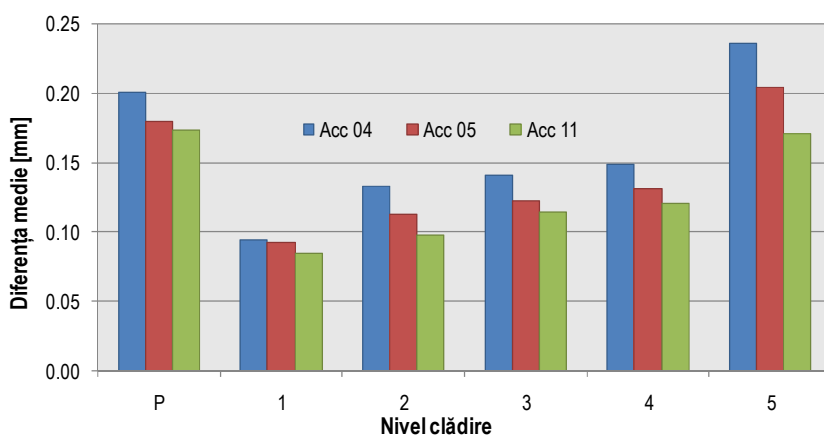


Fig. A.22 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea $P+5E - c = 4000 \text{ kNs/m}$, pentru $T_c=1,6 \text{ s}$

În urma prelucrării statistice a diferențelor pentru deplasările relative de nivel, a rezultat o diferență medie de 0,14 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele

două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Abaterea medie pătratică pentru acest caz de analiză ia valori între $0,11 \div 0,12$ mm care arată reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie (fig. A.22), valorile dispersiei de $0,01 \div 0,02$ și ale coeficientului de variație $0,73 \div 0,85$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic.

În concluzie, pentru cele trei accelerograme sintetice ($T_c = 1,6$ s) folosite în procesul de comparare a rezultatelor, diferențele între cele două seturi de rezultate în ceea ce privește deplasările relative de nivel sunt în medie 1,97 %.

Am realizat aceleași prelucrări statistice și pentru compararea vitezelor relative de nivel pentru a valida modelul analitic și computațional implementat în programul *GenEcAm*.

Tab. A.16 Prelucrarea statistică a vitezelor relative de nivel (P+5E – $c = 4000$ kNs/m², $T_c=1,6$ s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
04	Media [mm/s]	1.90	1.52	1.42	1.46	1.55	1.84	1.62
	Eroarea [%]	3.44	1.66	1.57	1.93	2.79	5.58	2.83
	Abaterea	1.51	1.23	1.06	1.10	1.15	1.36	1.24
	Dispersia	2.28	1.50	1.12	1.22	1.33	1.86	1.55
	Coef. var.	0.8	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.75
05	Media [mm/s]	2.03	1.76	1.45	1.50	1.65	1.80	1.7
	Eroarea [%]	3.74	1.94	1.60	1.95	2.90	5.20	2.89
	Abaterea	1.58	1.50	1.26	1.23	1.35	1.44	1.39
	Dispersia	2.51	2.24	1.58	1.51	1.83	2.08	1.96
	Coef. var.	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.83
11	Media [mm/s]	1.95	1.61	1.32	1.46	1.55	1.65	1.59
	Eroarea [%]	3.70	2.00	1.75	2.27	3.26	5.67	3.11
	Abaterea	1.63	1.43	1.10	1.23	1.35	1.38	1.35
	Dispersia	2.65	2.05	1.22	1.51	1.83	1.90	1.86
	Coef. var.	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.83

Media diferențelor pe set accelerograme $\bar{\Delta x} = 1.63$ mm / s

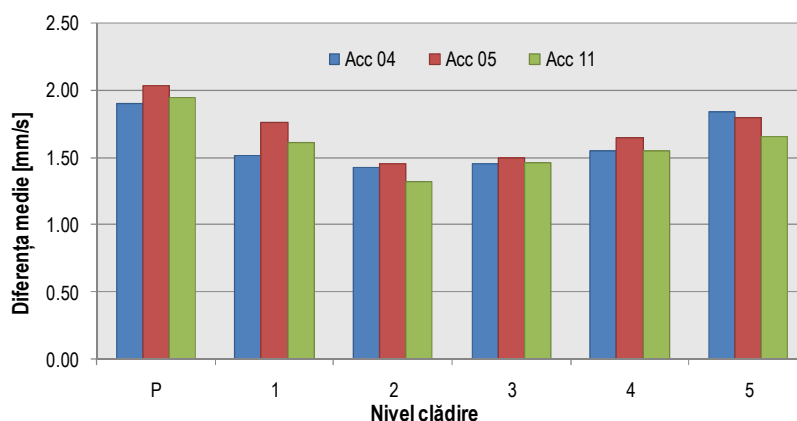


Fig. A.23 Valoarea diferențelor medii între vitezele relative de nivel obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+5E – $c = 4000$ kNs/m, pentru $T_c=1,6$ s

La analiza diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe pentru vitezele relative de nivel la fiecare etaj al clădirii studiate, în urma prelucrării statistice a rezultat o

diferență medie de 1,63 mm/s între cele două seturi de date, valoare care validează corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Valorile abaterii medii pătratice pentru acest caz de analiză sunt între 1,24÷1,39 mm/s evidențiind reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie (fig. A.23), valorile dispersiei de 1,55÷1,96 și ale coeficientului de variație 0,75÷0,83, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic, ca și în cazul deplasărilor relative de nivel.

Am realizat prelucrări statistice și pentru compararea rezultatelor în cazul accelerațiilor relative la fiecare nivel al clădirii studiate, pentru completarea studiului de validare a programului *GenEcAm*.

Tab. A.17 Prelucrarea statistică a accelerațiilor relative (P+10E – c = 4000 kNs/m², T_c=1,6s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
04	Media [m/s ²]	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05
	Eroarea [%]	8.77	4.92	3.09	2.15	1.92	2.26	3.85
	Abaterea	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04
	Dispersia	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002
	Coef. var.	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.82
05	Media [m/s ²]	0.04	0.07	0.06	0.05	0.05	0.07	0.06
	Eroarea [%]	8.24	4.90	3.11	2.06	1.76	2.14	3.7
	Abaterea	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05
	Dispersia	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003
	Coef. var.	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.82
11	Media [m/s ²]	0.04	0.06	0.06	0.04	0.05	0.06	0.05
	Eroarea [%]	6.92	4.14	2.57	1.60	1.47	1.90	3.1
	Abaterea	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05
	Dispersia	0.001	0.003	0.002	0.001	0.001	0.003	0.002
	Coef. var.	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.88

Media diferențelor pe set acceleroграме $\Delta x = 0.05 \text{ m/s}^2$

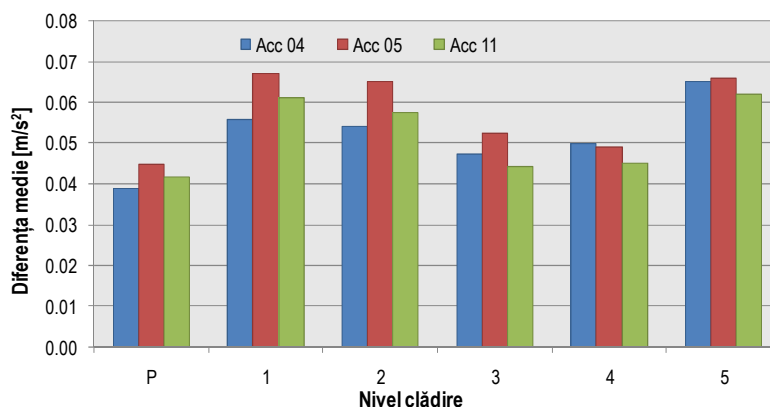


Fig. A.24 Valoarea diferențelor medii între accelerațiile relative obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+5E – c = 4000 kNs/m, pentru T_c=1,6 s

La analiza diferențelor între rezultatele obținute cu cele două programe (*SAP2000* și *GenEcAm*) pentru accelerațiile relative la fiecare etaj al clădirii studiate, în urma prelucrării statistice a rezultat o diferență medie de 0,05 mm/s² între cele două seturi de rezultate, valoare

care validează corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Valorile abaterii medii pătratice pentru acest caz de analiză sunt între $0,04 \div 0,05 \text{ m/s}^2$, evidențiind reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie (fig. A.24), valorile dispersiei de $0,002 \div 0,003$ și ale coeficientului de variație $0,82 \div 0,88$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic, ca și în cazul deplasărilor și vitezelor relative de nivel.

Se poate concluziona că în cazul setului de accelerograme sintetice folosite la analiza dinamică pentru $T_c = 1,6 \text{ s}$ cu cele două programe, diferențele mediate sunt:

- pentru deplasările relative de nivel 1,97%;
- pentru viteze relative de nivel 2,94%;
- pentru accelerații relative 3,55%.

Valorile mici ale acestor diferențe validează modelul analitic-computațional implementat în aplicația *GenEcAm* pentru acest caz de încărcare al structurii P+5E.

Pentru un studiu comparativ complet al rezultatelor obținute cu cele două programe s-au analizat și diferențele între valorile forțelor axiale din amortizorii cu fluid vâscos folosiți la fiecare nivel al clădirii studiate, pe care le-am sintetizat în tab. A.18.

Tab. A.18 Rezultate pe structura clădirii P+5E – $c = 4000 \text{ kNs/m}^2$

Forța de amortizare maximă în amortizorii cu fluid vâscos											
$T_c = 0,7 \text{ s}$				$T_c = 1 \text{ s}$				$T_c = 1,6 \text{ s}$			
Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]
01	317	326	2.7	02	329	338	2.6	04	321	329	2.4
02	255	257	0.7	03	349	348	0.2	05	319	323	1.2
22	270	276	2.1	11	301	314	4.1	11	281	289	2.7

În fig. A.25 sunt prezentate valorile tuturor diferențelor între maximele forțelor axiale din amortizori obținute cu cele două programe pentru fiecare etaj în parte. Prin compararea grafică a rezultatelor obținute cu cele două programe se observă că maximele au valori foarte apropiate pentru fiecare etaj în parte, fapt care validează aplicația *GenEcAm*.

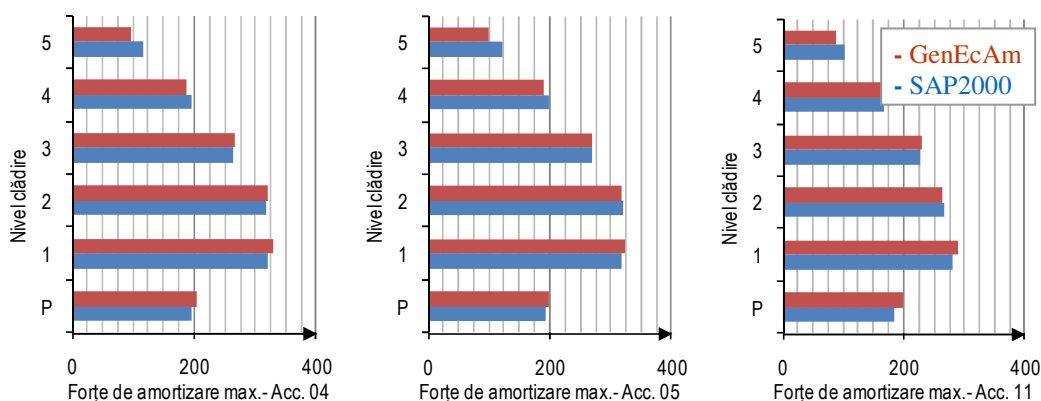


Fig. A.25 Forțe de amortizare maxime [kN] în amortizorii cu fluid vâscos pe fiecare etaj al clădirii P+10E ($c = 4000 \text{ kNs/m}^2$) pentru accelerogramele 04, 05, 11 ($T_c=1,6 \text{ s}$)

Din fig. A.26, care prezintă doar o mică parte din rezultatele obținute și comparate pentru acest caz de analiză, se observă că și forțele axiale din amortizori sunt foarte apropiate, fapt care

validează și din acest punct de vedere corectitudinea modelului analitic-computațional implementat în aplicația software *GenEcAm*.

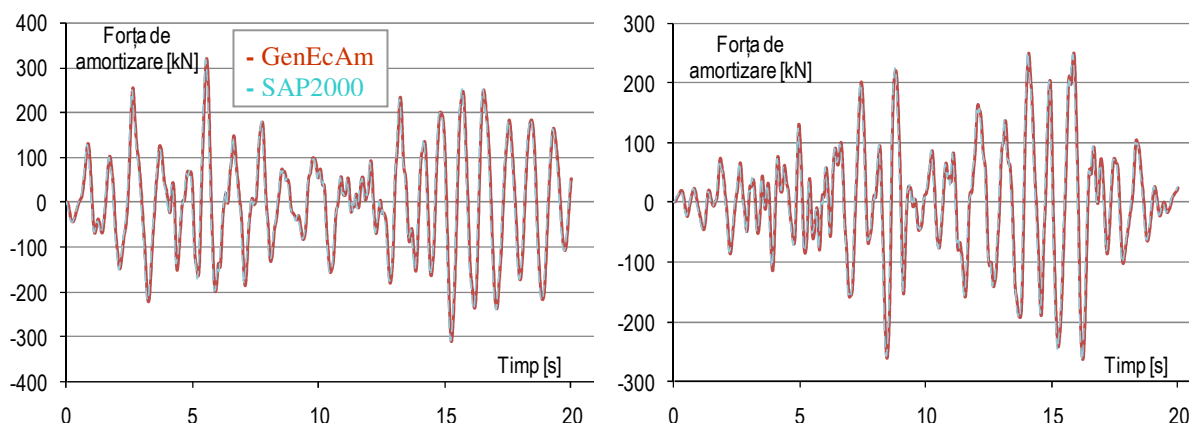


Fig. A.26 Variația în timp a forței de amortizare la et. 2 al clădirii P+5E
 – $c = 4000 \text{ kNs/m}^2$, pentru accelerogramele 04 și 11 ($T_c = 1,6 \text{ s}$)

La studiul comparativ al forțelor axiale din dispozitivele de amortizare folosite, diferența dintre datele obținute cu cele două programe este de maxim 2,7% pentru $T_c = 0,7 \text{ s}$, maxim 4,1% pentru $T_c = 1 \text{ s}$ și maxim 2,7% pentru $T_c = 1,6 \text{ s}$, valori mici care validează rezultatele obținute cu aplicația *GenEcAm*.

A.3 Cazul 6 – Clădire P+5E fără amortizori

Acest caz a fost analizat cu intenția de a completa validarea modelului analitic-computațional implementat în aplicația *GenEcAm*, cu situația în care clădirea cu regim de înălțime P+5E nu este echipată antisismic. Ne interesează în acest caz dacă rezultatele analizei la seism obținute cu programul *GenEcAm* sunt validate de rezultatele obținute cu programul de referință *SAP2000*.

Clădirea a fost supusă analizei dinamice liniare cu cele două programe, având ca sursă seismică setul de accelerograme propus de Postelnicu [111] pentru cele trei valori ale perioadei de colț T_c . Rezultatele pe care le-am obținut au fost comparate și prelucrate statistic după care le-am sintetizat în tabele. În tab. A.19 sunt prezentate sintetic diferențele între maximele deplasărilor relative de nivel obținute cu cele două programe.

Tab. A.19 Date obținute pe structura clădirii P+5E fără amortizori

Deplasări relative de nivel maxime											
$T_c=0,7 \text{ s}$				$T_c=1 \text{ s}$				$T_c=1,6 \text{ s}$			
Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]	Acc.	SAP [kN]	GenEcAm [kN]	Dif. [%]
01	17.85	18.14	1.5	02	20.20	20.76	2.6	04	21.48	21.55	0.3
02	17.27	18.11	4.6	03	19.02	19.88	4.3	05	19.02	18.65	1.9
22	17.34	18.23	4.8	11	21.40	22.45	4.6	11	20.46	20.37	0.4

În fig. 8.60 sunt prezentate valorile tuturor diferențelor între maximele deplasărilor relative de nivel obținute cu cele două programe pentru fiecare etaj în parte. Prin compararea grafică a rezultatelor obținute cu cele două programe se observă că maximele au valori foarte apropiate pentru fiecare etaj în parte, fapt care validează aplicația *GenEcAm* în acest caz.

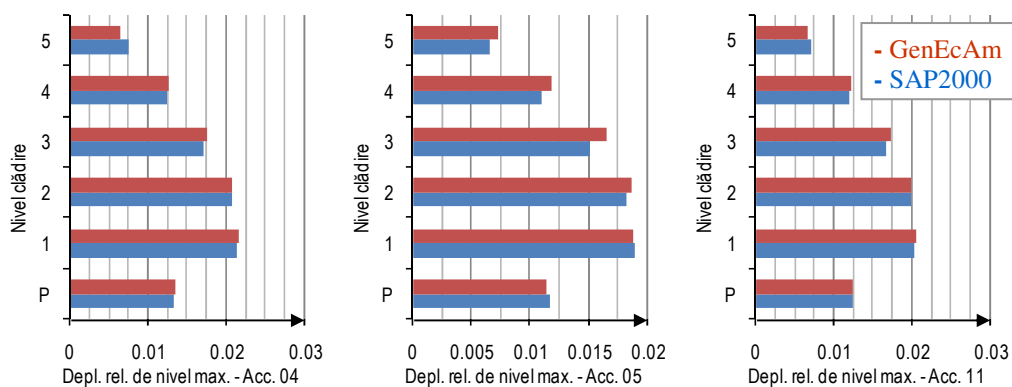


Fig. A.27 Deplasări relative de nivel maxime [m] ale clădirii P+5E fără amortizori (accelerogramele 04, 05, 11 pentru $T_c=1,6$ s)

Diferența dintre datele obținute cu cele două programe pentru deplasările relative de nivel maxime este de maxim 0,89 mm pentru $T_c = 0,7$ s, maxim 1,05 mm pentru $T_c = 1$ s și de maxim 0,37 mm pentru $T_c = 1,6$ s. Diferențele sunt relativ mici, fapt evidențiat și în exemplele din fig. A.27, care prezintă doar o parte din rezultatele obținute și comparate.

În tab. A.20 am prezentat valorile parametrilor statistici rezultați în urma prelucrării statistice a diferențelor între cele două seturi de rezultate obținute pentru deplasările relative de nivel la fiecare etaj în parte pentru $T_c = 1,6$ s. Am realizat comparațiile și pentru $T_c = 0,7$ s și $T_c = 1$ s, fiind similare cu cele obținute la $T_c = 1,6$ s.

Tab. A.20 Prelucrarea statistică a deplasărilor relative de nivel (P+5E fără amortizori, $T_c=1,6$ s)

Acc.	Parametri statistici	Nivelurile clădirii						Media Totală
		P	E1	E2	E3	E4	E5	
04	Media [mm]	0.41	0.51	0.31	0.56	0.70	0.64	0.52
	Eroarea [%]	3.14	2.36	1.51	3.27	5.60	8.59	4.08
	Abaterea	0.35	0.41	0.27	0.44	0.56	0.50	0.42
	Dispersia	0.12	0.17	0.07	0.20	0.32	0.25	0.19
	Coef. var.	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.82
05	Media [mm]	0.53	0.58	0.37	0.67	0.84	0.74	0.62
	Eroarea [%]	4.56	3.07	2.00	4.44	7.61	11.3	5.5
	Abaterea	0.47	0.56	0.30	0.63	0.84	0.65	0.58
	Dispersia	0.22	0.31	0.09	0.40	0.70	0.42	0.36
	Coef. var.	0.9	1.0	0.8	0.9	1.0	0.9	0.92
11	Media [mm]	0.53	0.61	0.33	0.69	0.89	0.71	0.63
	Eroarea [%]	4.21	2.96	1.63	4.12	7.34	9.98	5.04
	Abaterea	0.43	0.49	0.26	0.57	0.72	0.59	0.51
	Dispersia	0.19	0.24	0.07	0.32	0.52	0.35	0.28
	Coef. var.	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Media diferențelor pe set accelerograme $\overline{\Delta x} = 0.59$ mm								

În urma prelucrării statistice a diferențelor pentru deplasările relative de nivel, a rezultat o diferență medie de 0,59 mm între cele două seturi de date obținute la analiza dinamică cu cele două programe, valoare care evidențiază corectitudinea modelului analitic-computațional propus în cadrul acestui studiu.

Abaterea pătratică medie pentru acest caz de analiză ia valori între 0,42÷0,58 mm și arată reprezentativitatea valorii medii pentru diferențele prelucrate. Limitele între care variază diferențele între rezultatele celor două programe sunt apropiate de valoarea medie, valorile

dispersiei de $0,19 \div 0,36$ și ale coeficientului de variație $0,8 \div 0,92$, arătând faptul că distribuția diferențelor este omogenă, într-un interval de variație mic.

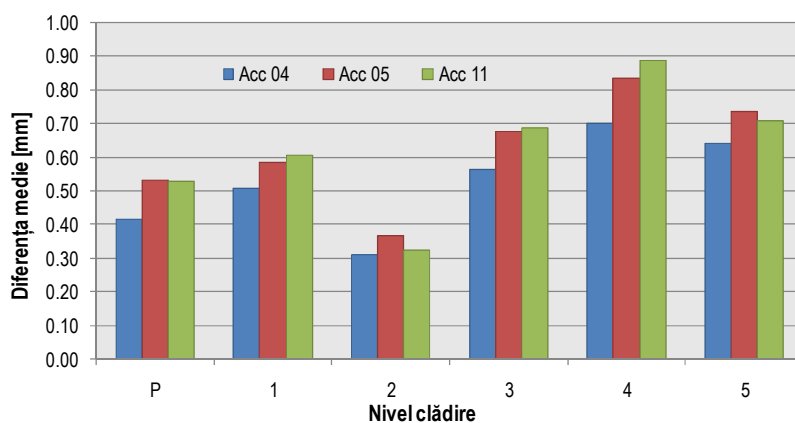


Fig. A.28 Valoarea diferențelor medii între deplasările relative de nivel obținute cu *SAP2000* și *GenEcAm* la clădirea P+5E fără amortizori, pentru $T_c=1,6$ s

Așa cum se observă și din fig. A.28, în acest caz, ca și în cele anterioare, rezultatele oferite de aplicația *GenEcAm* sunt foarte apropiate de cele oferite de programul *SAP2000*, fapt care validează modelul analitic-computațional de analiză la seism a clădirilor echipate antiseismic propus în acest studiu și aplicat în programul *GenEcAm*.