

Titlu proiect: Protecția seismică a structurilor cu sisteme de contravântuiri disipative echipate cu amortizoare cu fluid nano-micro magneto-reologic (SEMNAL-MRD) <u>http://www.ct.upt.ro/centre/cemsig/semnal-mrd.htm</u>
 Nr. contract: PN II nr. PCCA 77 / 2014

Raport Etapa II / 2015

DenumireEtapa II: Nano/micro fluide magneto-reologice (MR) compozite pentru dispozitive MR:etapă:acordarea proprietăților, proiectarea amortizorului

Activitatea II.1: Prepararea de nano-micro fluide MR compozite
Activitatea II.2: Caracterizarea structurală a FNM
Activitatea II.3: Analiză probelor la scară de laborator
Activitatea II.4: Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului
Activitatea II.5: Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare
Activitatea II.6: Evaluarea cerințelor seismice pentru structurile de referința
Activitatea II.7: Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului
Activitatea II.8: Principii de calcul de bază și date de intrare pentru amortizor
Activitatea II.9: Proiectarea amortizorului
Activitatea II.10: Analiză probelor la scară micropilot
Activitatea II.11: Stabilirea finală a tehnologiei de preparare
Activitatea II.12: Modele experimentale
Activitatea II.13: Unitatea de control pentru reglarea amortizorului



Cuprins

1.1. Obiectivele projectului 3 1.2. Obiectivele Etapei II / 2015 3 2. Sinteza activităților din Etapa II 3 2. Activitatea II.1 – Prepararea de nano-micro fluide MR compozite 3 2.1. Activitatea II.2 – Caracterizarea structurală a FINM – TEM & DLS 4 2.2.1. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF 4 2.2.1. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF 4 2.2.2. Măsurători DLS 5 2.3. Activitatea II.3 – Analiză probelor la scară de laborator 5 2.3. Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitatea II.5 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.1. Activitatea II.10 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.12 – Modele experimentale 11 2.8. Activitatea II.12 – Modele experimentale 11 2.9. Activitatea II.12 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Incercări experimentale asupra mode	1.	Intr	oducere	3
1.2. Obiectivele Etapei II / 2015 3 2. Sinteza activităților din Etapa II 3 2.1. Activitatea II.1 – Prepararea de nano-micro fluide MR compozite 3 2.2. Activitatea II.2 – Caracterizarea structurală a FNM – TEM & DLS 4 2.2.1. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF. 4 2.2. Măsurători DLS 5 2.3. Activitatea II.3 – Analiză probelor la scară de laborator 5 2.3.1. Analiza magneto-granulometrică 5 2.3.1. Analiza magneto-granulometrică 5 2.3.2. Măsurători de magneto-reologie 6 2.4. Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitatea II.1 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.1. Activitatea II.1 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.1 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 10 2.7. Activitatea II.1 – Calculu parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului ae tehnologiei de preparare 12 2.6. Activitatea II.2 – Modele experimentale as		1.1.	Obiectivele proiectului	3
2. Sinteza activităților din Etapa II 3 2.1. Activitatea II.1 – Prepararea de nano-micro fluide MR compozite 3 2.2. Activitatea II.2 – Caracterizarea structurală a FNM – TEM & DLS 4 2.2.1. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF. 4 2.2.2. Măsurători DLS 5 2.3. Activitatea II.3 – Analiză probelor la scară de laborator 5 2.3.1. Analiza magneto-granulometrică 5 2.3.2. Măsurători de magneto-reologie 6 2.4. Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitatea II.5 – Stabilirea tehnologiei de preparare 7 2.5.1. Activitatea II.10 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 7 2.5.2. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot. 10 2.7. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot. 10 2.7. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot. 10 2.8. Activitatea II.10 – Calculul parametrilor seismice pentru structurile de referință 11 2.9. Activitatea II.10 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Activități de umplere a modelului de amortizor. 12 2.9.1. Activități de umplere a m		1.2.	Obiectivele Etapei II / 2015	3
2.1. Activitatea II.1 – Prepararea de nano-micro fluide MR compozite 3 2.2. Activitatea II.2 – Caracterizarea structurală a FNM – TEM & DLS 4 2.2.1. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF 4 2.2. Măsurători DLS 5 2.3. Activitatea II.3 – Analiză probelor la scară de laborator 5 2.3.1. Analiza magneto-granulometrică 5 2.3.2. Măsurători de magneto-reologie 6 2.4. Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitatea II.10 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.1. Activitatea II.10 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 7 2.5.2. Activitatea II.10 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot 10 2.7. Activitatea II.10 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic (AMR) cu fluid LORDROSEAL (P2 – IMSAR) 13 2.9.1.1. Activitatea II.17 – Modele experimentale asupra modelului de	2.	Sint	eza activităților din Etapa II	3
2.2. Activitatea II.2 - Caracterizarea structurală a FNM - TEM & DLS 4 2.2.1. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF		2.1.	Activitatea II.1 – Prepararea de nano-micro fluide MR compozite	3
2.2.1. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF		2.2.	Activitatea II.2 – Caracterizarea structurală a FNM – TEM & DLS	4
2.2.2. Măsurători DLS 5 2.3. Activitatea II.3 – Analiză probelor la scară de laborator 5 2.3.1. Analiza magneto-granulometrică 5 2.3.2. Măsurători de magneto-reologie 6 2.4. Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitatea II.5 Stabilirea tehnologiei de preparare 7 2.5.1. Activitatea II.10 – Stabilirea tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.10 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.10 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot 10 2.7. Activitatea II.10 – Modele experimentale 11 2.8. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic şi elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor 12 2.9.1. Activitatea II.2 – IMSAR) 12 2.9.1.2. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor magneto-reologic (AMR) cu fluid LORD/ROSEAL (P2 – IMSAR) 13 2.9.1.2. Tered a proiectare a amortizorului de 10t <th></th> <th>2.2.1</th> <th>. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF</th> <th>4</th>		2.2.1	. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF	4
2.3. Activitatea II.3 – Analiză probelor la scară de laborator 5 2.3.1. Analiza magneto-granulometrică 5 2.3.2. Măsurători de magneto-reologie 6 2.4. Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitatea II.5 – Stabilirea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitație II.5 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.1. Activitatea II.11 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot. 10 2.7. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot. 10 2.7. Activitatea II.6 – Evaluarea cerințelor seismice pentru structurile de referință. 11 2.8. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor. 12 2.9.1. Activitătea Basupra modelului de amortizor. 12 2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor. 12 2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizorului (P1 – ROSEAL) 13 <t< td=""><td></td><td>2.2.2</td><td>. Măsurători DLS</td><td> 5</td></t<>		2.2.2	. Măsurători DLS	5
2.3.1. Analiza magneto-granulometrică 5 2.3.2. Măsurători de magneto-reologie 6 2.4. Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitatea II.5 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.1. Activitatea II.1 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.2. Activitatea II.1 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.1 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.1 – Modele experimentale 10 2.7. Activitatea II.6 – Evaluarea cerințelor seismice pentru structurile de referință 11 2.8. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor 12 2.9.1.3. Concluzii si recomandări pentru proiectarea amortizorului (P1 – ROSEAL) 12 2.9.1.3. Concluzi si recomandări pentru proiectarea amortizorului (P1 – ROSEAL) 15 2.9.2. Tena de proiectare a amortizorului de 10t 15 2.9.2. Tena de proiectare a amortizorului de 10t 15 <td< td=""><td></td><td>2.3.</td><td>Activitatea II.3 – Analiză probelor la scară de laborator</td><td> 5</td></td<>		2.3.	Activitatea II.3 – Analiză probelor la scară de laborator	5
2.3.2. Măsurători de magneto-reologie 6 2.4. Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitatea II.5 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.1. Activitatea II.5 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.2. Activitatea II.11 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot. 10 2.7. Activitatea II.2 – Modele experimentale 11 2.8. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor seismice pentru structurile de referință 11 2.8. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor 12 2.9.1.1. Activități de umplere a modelului de amortizor (P1 – ROSEAL) 12 2.9.1.3. Concluzii si recomandări pentru proiectarea amortizorului (P1 – ROSEAL) 13 2.9.1.3. Concluzii si recomandări pentru proiectarea amortizorului (P1 – ROSEAL): 15 2.9.2. Tema de proiecctare a amortizorului de 10t 16 2.11.1. Activitatea II.9 – Proiectarea amortizorului de 10t		2.3.1	. Analiza magneto-granulometrică	5
2.4. Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului 7 2.5. Activitățile II.5 & II.11 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.1. Activitatea II.5 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.2. Activitatea II.10 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot. 10 2.7. Activitatea II.6 – Evaluarea cerințelor seismice pentru structurile de referință 11 2.8. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor 12 2.9.1.1. Activități de umplere a modelului de amortizor (PI – ROSEAL) 12 2.9.1.2. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor magneto-reologic (AMR) cu fluid 13 2.9.1.3. Concluzii si recomandări pentru proiectarea amortizorului (PI – ROSEAL) 15 2.9.2. Tema de proiectare a amortizorului de 10t 15 2.10. Activitatea II.9 – Proiectarea amortizorului de 10t 16 2.11.1. Principii de calcul de bază și date de intrare pentru amortizor 16 2.11.1.		2.3.2	. Măsurători de magneto-reologie	6
 2.5. Activitățile II.5 & II.11 – Stabilirea tehnologiei de preparare		2.4.	Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului	7
2.5.1. Activitatea II.5 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare 7 2.5.2. Activitatea II.11 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare 9 2.6. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot 10 2.7. Activitatea II.12 – Modele experimentale 11 2.8. Activitatea II.6 – Evaluarea cerințelor seismice pentru structurile de referință 11 2.9. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor 12 2.9.1.1. Activități de umplere a modelului de amortizor (P1 – ROSEAL) 12 2.9.1.2. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor magneto-reologic (AMR) cu fluid LORD/ROSEAL (P2 – IMSAR) 13 2.9.1.3. Concluzii si recomandări pentru proiectarea amortizorului (P1 – ROSEAL): 15 2.9.2. Tema de proiectare a amortizorului de 10t 15 2.10. Activitatea II.8 – Principii de calcul de bază și date de intrare pentru amortizor 16 2.11.1. Poriectarea amortizorului de 10t 16 2.12.1. Pregătire în vederea fabricării amortizorului de 10t 17 2.12. Activitatea II.		2.5.	Activitățile II.5 & II.11 – Stabilirea tehnologiei de preparare	7
 2.5.2. Activitatea II.11 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare		2.5.1	. Activitatea II.5 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare	7
 2.6. Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot		2.5.2	. Activitatea II.11 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare	9
2.7. Activitatea II.12 – Modele experimentale		2.6.	Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot	10
2.8. Activitatea II.6 – Evaluarea cerințelor seismice pentru structurile de referință 11 2.9. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului 12 2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor		2.7.	Activitatea II.12 – Modele experimentale	11
 2.9. Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului		2.8.	Activitatea II.6 – Evaluarea cerințelor seismice pentru structurile de referință	11
proiectare a amortizorului122.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor.122.9.1.1. Activități de umplere a modelului de amortizor (P1 – ROSEAL)122.9.1.2. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor magneto-reologic (AMR) cu fluid LORD/ROSEAL (P2 – IMSAR).132.9.1.3. Concluzii si recomandări pentru proiectarea amortizorului (P1 – ROSEAL):152.9.2. Tema de proiectare a amortizorului de 10t152.10. Activitatea II.8 – Principii de calcul de bază și date de intrare pentru amortizor162.11. Activitatea II.9 – Proiectarea amortizorului de 10t162.11.1. Proiectarea amortizorului de 10t172.12. Activitatea II.13 – Unitatea de control pentru reglarea amortizorului (P2-IMSAR)182.12.1. Simularea numerică a strategiei de control al AMR implementată analogic182.13. Activitatea II.14 – Specificații tehnice pentru fabricație și controlul calității194. Referințe20		2.9.	Activitatea II.7 - Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de	
2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor			proiectare a amortizorului	12
 2.9.1.1. Activități de umplere a modelului de amortizor (P1 – ROSEAL)		2.9.1	. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor	12
 2.9.1.2. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor magneto-reologic (AMR) cu fluid LORD/ROSEAL (P2 – IMSAR)		2.9.1	.1. Activități de umplere a modelului de amortizor (P1 – ROSEAL)	12
 2.9.1.3. Concluzii si recomandări pentru proiectarea amortizorului (P1 – ROSEAL):		2.9.1	.2. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor magneto-reologic (AMR) cu fluid LORD/ROSEAL (P2 – IMSAR)	13
 2.9.2. Tema de proiectare a amortizorului de 10t		2.9.1	.3. Concluzii si recomandări pentru proiectarea amortizorului (P1 – ROSEAL):	15
 2.10. Activitatea II.8 – Principii de calcul de bază și date de intrare pentru amortizor		2.9.2	. Tema de proiectare a amortizorului de 10t	15
 2.11. Activitatea II.9 – Proiectarea amortizorului		2.10.	Activitatea II.8 – Principii de calcul de bază și date de intrare pentru amortizor	16
 2.11.1. Proiectarea amortizorului de 10t		2.11.	Activitatea II.9 – Proiectarea amortizorului	16
 2.11.2. Pregătire în vederea fabricării amortizorului de 10t		2.11.	1. Proiectarea amortizorului de 10t	16
 2.12. Activitatea II.13 – Unitatea de control pentru reglarea amortizorului (P2-IMSAR)		2.11.	2. Pregătire în vederea fabricării amortizorului de 10t	17
 2.12.1. Simularea numerică a strategiei de control al AMR implementată analogic		2.12.	Activitatea II.13 – Unitatea de control pentru reglarea amortizorului (P2-IMSAR)	18
 2.13. Activitatea II.14 – Specificații tehnice pentru fabricație și controlul calității		2.12.	1. Simularea numerică a strategiei de control al AMR implementată analogic	18
 Concluzii		2.13.	Activitatea II.14 – Specificații tehnice pentru fabricație și controlul calității	19
4. Referințe	3.	Con	cluzii	19
	4.	Ref	erințe	20

1. <u>Introducere</u>

Prezentul raport prezintă în introducere obiectivele generale ale proiectului SEMNAL-MRD, și respectiv obiectivele Etapei II/2015. În continuare, se prezintă o sinteză a activităților prevăzute în planul de realizare a proiectului în Etapa II/2015, și concluziile generale.

1.1. <u>Obiectivele proiectului</u>

Obiectivul general al proiectului este dezvoltarea unui sistem de protecție anti-seismica, care utilizează amortizoare pe baza de fluide MR, care să acționeze într-un sistem de control structural semi-activ. Obiectivele specifice în această etapă a proiectului de cercetare sunt următoarele:

- Dezvoltarea unor nano-micro fluide magneto-reologice care să fie compatibile cu cerințele amortizoarelor anti-seismice;
- Proiectarea și fabricarea unui amortizor MR prototip, de capacitate 10 t;
- Evaluarea și validarea prototipului prin încercări experimentale, ce vor avea ca referință EN 15129-2009: Dispozitive anti-seismice;
- Proiectarea, fabricarea, testarea și modelarea numerică a unui sistem hibrid contravântuire cu flambaj împiedicat amortizor; calibrarea unui model numeric capabil să simuleze comportarea amortizorului;
- Testarea numerică a unor structuri în cadre echipate cu sisteme hibride de disipare "contravântuireamortizor";
- Proiectarea și testarea numerică a algoritmului de control pentru un sistem cu singur grad de libertate.

1.2. Obiectivele Etapei II / 2015

Programul de cercetare al Etapei II/2015 are ca obiect dezvoltarea unor nano-micro fluide magneto-reologice compatibile cu cerințele amortizoarelor anti-seismice, acordarea proprietăților acestor fluide și respectiv proiectarea amortizorului de 10t.

2. Sinteza activităților din Etapa II

2.1. <u>Activitatea II.1 – Prepararea de nano-micro fluide MR compozite</u>

La P1 – ROSEAL au fost preparate la nivel de laborator și predate către P3 – AR-TF, nano-fluide magnetice (NFM) cu diferite magnetizații de saturație (Ms) și anume:

- NFM UTR cu Ms 100;
- NFM UTR cu Ms 500;
- NFM UTR cu Ms 1000.

Nano-fluidele magnetice de mai sus sunt materiale de baza pentru prepararea la nivel de laborator de nanomicro-fluide MR compozite cu o tensiune de prag mare, prin variația: (a) magnetizației de saturație a nanofluidului de bază; (b) fracției volumice a particulelor feromagnetice (Fe) multi-domeniale moi; (c) dimensiunea medie a particulelor feromagnetice multi-domeniale.

Prepararea nano-fluidelor magnetice nepolare pentru amortizor se realizează în 2 etape: (1) sinteza nanoparticulelor magnetice acoperite cu monostrat de surfactant chemisorbit (acid oleic, OA) și, (2) dispersarea nanoparticulelor magnetice stabilizate în solventul organic nepolar cu presiune de vapori redusă (ulei de transformator, UTR). Aceste etape sunt sugestiv prezentate în raportul extins.

Pasul 1 – (Sinteza nanoparticulelor de magnetită acoperite cu surfactant) cuprinde:

- coprecipitarea (la temperatura de 80 °C) a magnetitei din soluții apoase de săruri de Fe³⁺ și Fe²⁺ în prezența unei soluții concentrate de NH₄OH (25%) (rezulta particule de magnetită subdomenice);
- stabilizare sterică (chemisorbția acidului oleic la 80-82 °C);
- separare de faze;
- decantare magnetică și spălare repetată (rezulta nanoparticule magnetice acoperite în monostrat și acid oleic liber);
- extracția nanoparticulelor acoperite cu monostrat (adaos de acetonă, extracție) (rezulta *nanoparticule de magnetită stabilizate*).

<u>Pasul 2</u> – (Dispersarea nanoparticulelor magnetice în ulei de transformator): cuprinde:

- dispersia nanoparticulelor de magnetită acoperite cu acid oleic în monostrat în hidrocarbură la temperatura de 120-130 °C;
- decantare magnetică/filtrare;
- floculare repetată și redispersare a nanoparticulelor magnetice (eliminarea acidului oleic liber, proces de purificarea avansată) (rezultand *nanofluid magnetic nepolar*).

Reușita procedeului depinde de mai mulți factori, printre care temperatura de coprecipitare în masa de reacție, adăugarea rapidă a soluției alcaline și atingerea pH-ului de cca. 8,5-9, precum și de viteza de agitare. Experimentele de laborator au vizat optimizarea procedeului ținând cont de factorii amintiți. Probele realizate sunt prezentate în Tabelul 1.

Fluidele magnetizabile nano-micro compozite sunt suspensii de particule micrometrice de fier (produs Merck, cod 1.03819.0500; diametru mediu 10 micrometri) într-un nanofluid magnetic. Particulele feromagnetice sunt multidomenice și moi din punct de vedere magnetic (cu magnetizație remanentă practic nulă). Particulele de Fe se dispersează în nanofluidul magnetic prin agitare mecanică, cu diferite valori ale fracției volumice. Mecanismul de stabilizare se bazează pe interacțiunea magnetică dintre nanoparticulele magnetice cu moment magnetic permanent si particulele feromagnetice multidomenice. Stratul de nanoparticule ce învelește fiecare particulă micrometrică de Fe împiedică contactul direct dintre particulele de Fe și reduce viteza de sedimentare. Probele realizate sunt prezentate în Tabelul 1.

			1 1			
Nr.	Cod probă	Cod probă Descriere probă		Fracție volumică	Magnetizație,	
Crt.	Cou proba	Desencie pioba	Fe ₃ O ₄ , \ [%]	Fe, ϕ_{Fe} [%]	M [G]	
1	140806-1	FM/UTR 4T (Fe ₃ O ₄ -OA)		0	980	
2	140901-3	F1000 + 4% Fe		4	1830	
3	140901-6	F1000 + 10% Fe		10	3129	
4	141002-1	F1000 + 15% Fe		15	4094	
5	141002-2	F1000 + 20% Fe	22.90	20	5502	
6	141002-3	F1000 + 25% Fe		25	6403	
7	141002-4	F1000 + 30% Fe		30	7821	
8	141002-5	F1000 + 35% Fe		35	9061	
9	141002-5	F1000 + 44% Fe		44	11123	
10	150219-26	FM/UTR 4T (Fe ₃ O ₄ -OA)		0	512	
11	150220-1	F500 + 5% Fe		5	798	
12	150220-2	F500 + 10% Fe		10	992	
13	150220-3	F500 + 15% Fe		15	3799	
14	150220-4	F500 + 20% Fe	11.67	20	4608	
15	150220-5	F500 + 25% Fe		25	5289	
16	150220-6	F500 + 30% Fe		30	7332	
17	150220-7	F500 + 35% Fe		35	8678	
18	150220-8	F500 + 40% Fe		40	9466	
19	151013-1	FM/UTR 4T (Fe ₃ O ₄ -OA)		0	102	
20	151013-2	F100 + 5% Fe		5	166	
21	151013-3	F100 + 10% Fe		10	859	
22	151013-4	F100 + 15% Fe		15	1538	
23	151013-5	F100 + 20% Fe	2.75	20	4071	
24	151013-6	F100 + 25% Fe		25	4922	
25	151013-7	F100 + 30% Fe		30	6360	
26	151013-8	F100 + 35% Fe		35	7392	
27	151013-9	F100 + 40% Fe		40	8056	

Tabelul 1. Nano-fluide magnetice și nano-micro compozite preparate la scară de laborator

2.2. <u>Activitatea II.2 – Caracterizarea structurală a FNM – TEM & DLS</u>

2.2.1. Investigații TEM pentru nano-particulele magnetice (NPM) din fero-fluidele de bază pentru MRF

Din analiza TEM (vezi Figura 1a și Figura 1b) se observă că dimensiunile NPM individuale sunt sub 10 nm pentru majoritatea particulelor. Astfel, considerând și particulele mai mici și mai mari, dimensiunile NPM sunt în intervalul 5-15 nm. Prin urmare, fluidele MR pe bază de fero-fluid au nano-particule ferimagnetice sub-

domenice de ordinul 10 nm și, particule feromagnetice multi-domenice de Fe, au dimensiunea medie de cca. 10 micrometri (conform specificației producătorului (Merck)).



Figura 1. (a) Imagine TEM cu comparație la 20 nm, (b) Imagine TEM cu comparație la 50 nm

2.2.2. Măsurători DLS

Investigațiile de granulometrie prin metoda DLS au fost efectuate pe un instrument Malvern Zetasizer Nano ZS, prin împrăștierea înapoi (173°) a unui fascicul laser HeNe (632.8 nm). Probele (vezi Tabelul 2) au fost măsurate pe rând (Figura 2a și Figura 2b) într-o cuvă de polistiren, volumul unei probe fiind de 1.5 ml. Toate valorile afișate au fost calculate folosind software-ul Malvern Software DTS (Nano) Version 6.2.

Tababul 2 Drahala investigate min matada DI S

	rabelul 2. Flobele investigate prin incloda DLS													
Nr.	Proba				Cod probă		Observații			D [nm	1]	PDI		
1		F100	MF/UT	R (Fe ₃ O	4-OA)		151013-1	M=102	G; ρ	=0.9737 g	g/cm ³	26		0.294
2	2 T100 MF/UTR (Fe ₃ O ₄ -OA)			150219-27	M=110) G; p	e0.9747g	g/cm ³	33		0.331			
Z-Average inte Result qu	(d.nm): Pdl: ercept: Jality :	25.98 0.294 0.944 Good	Peak 1: Peak 2: Peak 3:	Size (d.nm): 5.750 12.80 0.000	% Number: 26.7 73.3 0.0	St Dev 1.035 3.906 0.000	/ (d.nm):	Z-Average (d.nm): Pdi: Intercept: Result quality :	33.21 0.331 0.916 Good	Peak 1: Peak 2: Peak 3:	Size (d.nm): 6.701 16.74 0.000	% Number: 46.2 53.8 0.0	St Dev 1.488 4.973 0.000	(d.nm):



Figura 2. (a) Proba 1 (cod 151013-1) - distribuție după număr, (b) Proba 2 (cod 150219-27) - distribuție după număr.

2.3. <u>Activitatea II.3 – Analiză probelor la scară de laborator</u>

2.3.1. Analiza magneto-granulometrică

Curba de magnetizare a probei de 100G a fost prelucrată prin regresie neliniară (ș.a. magneto-granulometrie) cu modelul Langevin pentru fluide magnetice diluate. S-a presupus o distribuție log-normală a diametrului magnetic al nano-particulelor:

$$P(d_m) = \frac{1}{d \cdot S \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\left(\ln(d_m + D_0)\right)^2}{2S^2}}$$

În urma regresiei s-au obținut pentru parametrii distribuției log-normale următoarele valori: $D_0 = 5.71 + 0.01$ nm, și S = 0.386 + 0.005. Coeficientul R² de regresie este R²=0.99978. Diametrul magnetic mediu al nano-particulelor este d_m = 6.2 nm iar deviația standard este d_{m,std} = 2.5 nm.



Figura 3. (a) magnetizare: date experimentale și curba de fitare, (b) distribuția log-normală cu param. obținuți prin fitare

2.3.2. Măsurători de magneto-reologie

S-a intenționat investigarea influenței creșterii fracției volumice de fier și a intensificării câmpului magnetic extern asupra efectelor magneto-reologice (MR) și magneto-vâscoase (MV) ale fluidelor preparate. Măsurătorile experimentale s-au realizat pe o instalație deosebit de performantă, de ultimă generație și anume cu magneto-reometrul Physica MCR 300, produs de Anton Paar, Germania (vezi Figura 4a). Raportul extins prezintă în detaliu magneto-reometrul utilizat, caracteristicile lui și ale celulei de măsura, respectiv formulele de calcul pentru conversia între datele măsurate și parametrii reologici.



Figura 4. (a) Magneto-reometrul MCR 300, (b) Principiul și detaliile celulei magneto-reologice

Curbele de vâscozitate pentru probele-mamă F100, F500 și F1000 (utilizate ca lichid de bază pentru probele celor trei seturi) în absența câmpului magnetic extern și la diferite valori ale inducției câmpului magnetic aplicat sunt ilustrate în Figura 5a.



Figura 5. (a) Curbele de vâscozitate în absența și în prezența unui câmp magnetic extern – probele-mamă, F100, F500 și F1000, (b) Curbele de vâscozitate în absența și în prezenta unui câmp magnetic extern – proba-mama F1000 ($\Phi_{Fe} = 0\%$) și proba F1000-4 ($\Phi_{Fe} = 20\%$).

După adăugarea pulberii de Fe în aceste probe mamă, chiar în absența câmpului magnetic se formează aglomerări de microparticule de Fe, ceea ce se reflectă atât în comportarea reologică a probelor, care devine de tip shear-thinnig (vâscozitatea scade cu creșterea vitezei de forfecare), cât și în comportarea magnetoreologică, manifestandu-se un efect magneto-vascos mult mai pronunțat decât în cazul probelormamă. Acest lucru se observă de exemlu în Figura 5b, care prezintă curbele de vascozitate ale probei-mama F1000 ($\Phi_{Fe} = 0\%$), comparativ cu cele ale probei F1000-4 ($\Phi_{Fe} = 20\%$). Aceeași alură o au și curbele de vâscozitate ale celorlalte probe, la toate observandu-se o tendință de saturație a efectului în prezența câmpurilor magnetice intense.

În raportul extins se prezintă un studiu experimental și teoretic al tensiunii de prag statice și dinamice, al efectului magneto-reologic și efectului magneto-vâscos (la diferite viteze de forfecare), și se trag concluzii importante privind posibilitatea de utilizare a diverselor tipuri de fluide magneto-reologice. Se compară probele similare din cele 3 seturi de fluide, între ele și cu suspensia MR comercială MRF 140 CG.

Avantajele compozitelor bidisperse sunt după cum urmează:

- La compozitele bidisperse, particulele "mari" (micro-particulele de Fe) asigură deci avantajul unui efect magneto-reologic în general mai intens decât cel experimentat de fluidele MR convenționale.
- În plus, existenta particulelor "mici" (nanoparticulele de magnetită) oferă încă două avantaje față de suspensiile MR convenționale: îmbunătățirea stabilității în absența unui c.m. extern (particulele "mici" se agită termic, încetinind sedimentarea celor mari) și o redispersabilitate a particulelor mult mai bună (nanoparticulele de magnetită formează "nori" în jurul celor mari, reducând efectul aglomerării acestora).
- Referitor la cele 3 seturi de compozite investigate, s-a constatat faptul că redispersarea particuleor a fost cu atât mai anevoioasă cu cât fracția volumică a nano-particulelor de magnetită a fost mai mică (setul F100).

Observații:

- Tensiunile statice de prag cele mai mari se obțin pentru probele cele mai concentrate (setul F1000).
- Pentru valori ale inducției c.m. B > 200 mT, proba F 1000-2 ($\Phi_{Fe} = 10\%$, $\Phi_{Fe} = 30.61\%$) are tensiunea statică de prag superioară celei a fluidului MRF 140 CG ($\Phi = 40\%$).

Față de fluidul MR comercial, probele din acest set oferă avantajele suplimentare ale unei stabilități cinetice mai bune în absența c.m. și a unei redispersabilități mai lejere. În raportul extins, dependența tensiunii dinamice de prag (model Bingham) și a tensiunii statice de prag de fracție volumică totală a particulelor la diverse valori ale inductiei c.m. în probe, pentru toate cele 3 seturi de probe, comparativ cu proba MRF 140 CG, este ilustrată sugestiv de Fig. 2.3. 15-20 (vezi raportul extins).

Concluziile măsurătorilor de magneto-reologie:

- Compozitele bidisperse analizate prezintă un efect magneto-reologic intens, dovendindu-se potențiali candidați pentru aplicațiile care necesită valori mari ale tensiunii de prag (statice sau dinamice): amortizoarele de șocuri și vibrații seismice, frâne, ambreiaje, valve de control și articulații artificiale.
- Așa cum s-a mai arătat, efectul magneto-reologic este comparabil (chiar mai puternic) decât cel manifestat în fluidele magneto-reologice convenționale cu aceeași fracție volumică solidă.
- În plus, compozitele prezintă două avantaje: o stabilitate mai bună în absența c.m., precum și o redispersabilitate mai ușoară, redispersabilitate favorizată de valori mari ale fracției volumice a nanoparticulelor de magnetită. Prin urmare, se recomandă utilizarea acestor compozite bidisperse în aplicațiile tehnice amintite.

2.4. <u>Activitatea II.4 – Măsurarea curbei de magnetizație a nano-fluidului</u>

S-au măsurat toate curbele de primă magnetizare a celor trei seturi de fluide MR descrise anterior. În raportul extins se prezintă toate curbele de primă magnetizare ale ultimului set (100G) de fluide MR iar, (pentru simplificare) în cazul celorlalte seturi (1000 G si 500 G) se prezintă doar primul și ultimul fluid din set. Pentru ultima curbă de primă magnetizare se prezintă și fișa de măsurători.

2.5. <u>Activitățile II.5 & II.11 – Stabilirea tehnologiei de preparare</u>

2.5.1. Activitatea II.5 – Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare

P3 – AR-FT a selectat, pe baza investigațiilor, diferite tipuri de nano-micro-fluide MR compozite și anume:

- FCM pe baza de MF/UTR cu Ms 100 G cu fracție volumică $\Phi_{Fe} 0\%$;
- FCM pe baza de MF/UTR cu Ms 500 G cu fracție volumică $\Phi_{Fe} 0\%$
- FCM pe baza de MF/UTR cu Ms 500 G cu fracție volumică $\Phi_{Fe} 20\%$
- FCM pe baza de MF/UTR cu Ms 500 G cu fracție volumică $\Phi_{Fe} 30\%$
- FCM pe baza de MF/UTR cu Ms 500 G cu fracție volumică $\Phi_{Fe} 40\%$

- FCM pe baza de MF/UTR cu Ms 1000 G cu fracție volumică $\Phi_{\text{Fe}} 0\%$
- FCM pe baza de MF/UTR cu Ms 1000 G cu fracție volumică $\Phi_{Fe} 20\%$
- FCM pe baza de MF/UTR cu Ms 1000 G cu fracție volumică $\Phi_{Fe} 30\%$
- FCM pe baza de MF/UTR cu Ms 1000 G cu fracție volumică $\Phi_{Fe} 40\%$

În baza concluziilor stabilite la Activitatea II.3 din prezentul proiect, s-a stabilit procedura tehnologică de sinteză preliminară la scara micro-pilot a nano-fluidului de bază de înaltă magnetizație. În Tabelul 3. se prezintă probele preparate de către partenerul P1 – ROSEAL.

Stabilirea preliminară a tehnologiei de preparare a nano-microfluide MR compozite a avut la bază sinteza la scară micro-pilot a nano-fluidelor magnetice (vezi Figura 6), completata cu procedura de adăugare a fracției de Fe de dimensiuni micronice conform Figura 7.



Figura 6. Sinteza nano-fluidelor magnetice pe baza de ulei de transformator la scara micro-pilot.



Figura 7. Procedura de adăugare a fracției volumice de Fe de dimensiuni micronice.

Proba	Fractia volumica de magnetită φ	Fractia volumică de Fe Φ_{Fe} [%]	Fractia volumică totală Φ_{tot} [%]	Magnetizarea probei <i>M</i> [G]
F 100 micro-pilot	2.75	0	2.75	106
F 500 micro-pilot		0	11.67	492
F 500-4 micro-pilot	11.67	20	29.34	3785
F 500-6 micro-pilot	11.07	30	38.17	5666
F 500-8 micro-pilot		40	47.00	7799
F 1000 micro-pilot		0	22.90	939
F 1000-4 micro-pilot	22.00	20	38.82	4137
F 1000-6 micro-pilot	22.90	30	46.03	6819
F 1000-8 micro-pilot		40	53.74	8663

ruberur 5. riezentureu proberor miero propurute de eutre purtenerur r riebelli fi	Tabelul 3. Prezentarea	probelor micro-p	oilot preparate de către p	oartenerul P1 - ROSEAL
---	------------------------	------------------	----------------------------	------------------------

Tabelul 4. Caracteristicile magnetice ale nano-micro fluideor MR compozite

Proba	Fracția volumica de magnetita $\Phi_{Fe3O4}[\%]$	Fracția volumica de Fe Φ_{Fe} [%]	Fracția volumica totala Φ _{totala} [%]	Magnetizarea probei M _s [G]
F 100 micro-pilot	2.75	0	2.75	106
F 500 micro-pilot		0	11.67	492
F 500-4 micro-pilot	11.67	20	29.34	3785
F 500-6 micro-pilot		30	38.17	5666
F 500-8 micro-pilot		40	47.00	7799
F 1000 micro-pilot		0	22.90	939
F 1000-4 micro-pilot	22.90	20	38.82	4137
F 1000-6 micro-pilot		30	46.03	6819
F 1000-8 micro-pilot		40	53.74	8663

2.5.2. Activitatea II.11 – Stabilirea finală a tehnologiei de preparare

P3 - ARFT a selectat fluidul compozit magnetizabil nano-micro-structurat (FCM) pe bază de MF/UTR 500 G cu fracție volumică Φ_{Fe} 30%, în funcție de proprietățile magneto-reologice optime pentru aplicații de amortizare, iar P1 - ROSEAL a stabilit tehnologia finală de preparare la scară micro-pilot (Figura 6, Figura 8). Asupra tuturor probelor de fluid MR fabricat de P1 - ROSEAL, s-au efectuat toate investigațiile făcute și asupra probelor fabricate în laborator. De exemplu, în cadrul Activității II.2, proba de fluid cu codul 150219-27 asupra căreia s-a facut investigația DLS este fabricată de P1 - ROSEAL. În raportul extins se prezintă fișa de măsurători și curba de primă magnetizare a unui fluid MR de fabricație micro pilot P1 - ROSEAL.



Figura 8. Procedura de stabilire a fracției volumice de particule de Fe.



Figura 9. Curba de primă magnetizare a unui fluid de fabricație micro-pilot (P1 - ROSEAL)

2.6. <u>Activitatea II.10 – Analiză probelor la scară micro-pilot</u>

Curbele de vâscozitate pentru probele mamă F100, F500 și F1000 lab., respectiv F100, F500 și F1000 micropilot în absența câmpului magnetic extern și la diferite valori ale inducției câmpului magnetic aplicat sunt ilustrate în Figura 10a-b.





După adăugarea pulberii de Fe în aceste probe mamă, chiar în absența câmpului magnetic se formează aglomerări de micro-particule de Fe, ceea ce se reflectă atât în comportarea reologică a probelor, care devine de tip shear-thinnig (vâscozitatea scade cu creșterea vitezei de forfecare), cât și în comportarea magneto-reologică, manifestandu-se un efect magneto-vâscos mult mai pronunțat decât în cazul probelor-mamă. Acest lucru se observă de ex. în Figura 11, care prezintă curbele de vascozitate ale probelor mamă F1000 (laborator

și micro-pilot) ($\Phi_{Fe} = 0\%$), comparativ cu cele ale probelor F1000-4 (laborator și micro-pilot) ($\Phi_{Fe} = 20\%$). Aceeași alură o au și curbele de vâscozitate ale celorlalte probe, la toate observandu-se o tendință de saturație a efectului în prezența câmpurilor magnetice intense.



Figura 11. Curbele de vâscozitate în absența și în prezența unui câmp magnetic extern - probele-mamă F1000 $(\Phi_{Fe} = 0\%)$ și probele F1000-4 $(\Phi_{Fe} = 20\%)$.

Proba preparată în laborator are tensiunile de prag ceva mai mici la toate valorile inducției c.m. aplicat, cu exceptia lui B = 0. Limitările de măsurare ale reometrului nu au permis determinarea curbei de curgere (respectiv a tensiunii de prag foarte mari) a probei F1000-8 micro-pilot la B = 600 mT. Efectul MV în cazul probelor compozite similare din seturile F500 este comparabil. În cazul compozitelor din seturile F1000, probele micro-pilot prezintă un efect MV mai slab, așa cum era de așteptat din cauza vâscozității mai mari a probei mamă F1000 micro-pilot. Ca și în cazul tensiunii de prag, dependența efectului magneto-vâscos funcție de fracția volumică de Fe este ilustrată la diferite valori ale inducției c.m., la cele două valori ale vitezei de forfecare analizate, pentru probele similare din cele 2 seturi, comparativ cu suspensia comercială MRF 140-CG (Fig. 2.10. 16.-19. din raportul extins).

Ca și concluzie pe baza comparației, se recomandă utilizarea acestor compozite bi-disperse în aplicațiile tehnice amintite. Ținand cont de toate aspectele investigate (tensiune Bingham de prag, tensiune statică de prag, efect MV, stabilitate cinetică și redispersabilitate), se recomandă utilizarea uneia dintre probele compozite F500-6 (lab. sau micro-pilot) ($\Phi_{Fe} = 30, \varphi = 11.67 \%$).

2.7. Activitatea II.12 – Modele experimentale

S-a preparat FCM pe bază de NFM/UTR cu Ms 500 G cu fractie volumică ΦFe 30% având magnetizatie de saturație 6905 G, 400 ml. În Figura 12 sunt prezentate momente din timpul sintezei la scara micro-pilot a nanomicro-fluidelor. Utilizând tehnologia de fabricatie finală stabilită, Partenerul P1 – ROSEAL a trecut la executia nano-micro fluidelor MR cu proprietăți specifice dispozitivelor MR de amortizare, fluide dedicate modelelor experimentale.



(a)

Figura 12. Etape ale sintezei la scara micro-pilot a nano-micro-fluidelor

2.8. Activitatea II.6 – Evaluarea cerințelor seismice pentru structurile de referință

În cadrul acestei activități s-a investigat răspunsul unor structuri de referință în vederea evaluării cerințelor seismice. S-au realizat analize dinamice neliniare considerând două seturi de accelerograme artificiale scalate pe spectrul corespunzător amplasamentului (București și Timișoara). Aceste analize au permis identificarea modului de comportare al amortizorilor considerați în modelul structural și identificarea parametrilor funcționali în vederea elaborării temei de proiectare.

În plus, a fost dezvoltat un model numeric pentru a demonstra funcționalitatea comportării "multi-stage" aferentă sistemului hybrid – ce presupune conectarea în serie a unui amortizor magneto-reologic (MRD) și a unei contravântuiri cu flambaj împiedecat (BRB) – vezi Figura 13a. Pentru aceasta s-au conectat cele două modele numerice (calibrate pe baza încercărilor experimentale) aferente amortizorului și contravântuirii (BRB). În paralel cu amortizorul, a fost modelat un mecanism de blocare ("lock-out" mechanism) prin intermediul unui element de tip "gap-hook". Acest element are rolul de a activa contravântuirea cu flambaj împiedecat la anumite valori ale deplasărilor.

Rezultatele analizelor dinamice neliniare "time-history", vezi Figura 13b-c, au arătat faptul că sistemul de amortizare introduce forțe mari în stâlpi centrali (aferenți zonei contravântuite) corespunzător accelerațiilor caracteristice terenului moale, iar structurile trebuie proiectate cu atenție pentru a evita deformații plastice în aceste elemente și pentru a beneficia de avantajul sistemului hibrid considerând starea limită ultimă și starea limită de prevenire a colapsului. În cadrul Etapei III/2016, analizele structurale vor fi dezvoltate și actualizate pe baza încercărilor experimentale asupra amortizorului magneto-reologic, respectiv a sistemului hibrid amortizor (MRD) + contravîntuire (BRB).



Figura 13. (a) Modelul conceptual de funcționare a sistemului hibrid (amortizor + contravântuire cu flambaj împiedecat); (b) Formarea articulațiilor plastice pentru cadrul CBF fără amortizori (stadiul de prevenire al colapsului), (c) Formarea articulațiilor plastice pentru cadrul CBF cu amortizori (stadiul de prevenire al colapsului)

2.9. <u>Activitatea II.7 – Calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de</u> proiectare a amortizorului

În cadrul Activității II.7 au fost întreprinse un set de activități pentru calculul parametrilor amortizorului magneto-reologic și elaborarea temei de proiectare a amortizorului. Aceste activități pot fi enumerate astfel:

- Încercări experimentale asupra unui model de amortizor încărcat cu fluid magneto-reologic produs de LORD, și respectiv fluide magneto-reologice preparate de către P1 ROSEAL. În cea de-a doua variantă, umplerea amortizorului s-a realizat la P1 ROSEAL.
- Elaborarea temei de proiectare a amortizorului de 10t.

2.9.1. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor

2.9.1.1. Activități de umplere a modelului de amortizor (P1 – ROSEAL)

În vederea stabilirii condițiilor de proiectare în prima etapă s-a utilizat un amortizor experimental de la P2 – IMSAR, (vezi Figura 14), care a fost încărcat cu diferite fluide magneto-reologice (FCM).



Figura 14. Model de amortizor experimental încărcat cu fluide magneto-reolofice

În prima fază, P1 – ROSEAL a preparat pentru testare în amortizor, un fluid compozit magnetizabil nanomicro-structurat (FCM) pe baza de NFM/UTR 1000 G (Ms = 1090 G măsurat de către P3 - ARFT cu VSM) + 11% Fe (cu dimensiuni de 10 µm), cu magnetizatie de saturatie 4198 G. A fost încărcat amortizorul și s-a constatat o forță mare de rezistență la comprimare pe un aparat de măsurare forța pana la 100 daN cu viteza de deplasare mică (aproape static). S-a scos FCM din amortizor și s-a diluat cu ulei de transformator în proporție 1:1. Astfel s-a obținut un FCM pe bază de NFM/UTR 510 G cu fracție volumică Φ_{Fe} cca. 6,8% cu o magnetizație de saturație 1961 G. S-a încărcat amortizorul și pe un aparat de măsurare forța până la 100 daN cu viteza de deplasare mică (aproape statică), s-a măsurat forța amortizorului în funcție de variația intensității de curent. La tensiune de 12V și variația intensității de curent de la 0.04 până la 1.58A s-a obținut forța de la 5 pana la 9daN. Amortizorul astfel încărcat a fost trimis la IMSAR pentru teste funcționale preliminare.

În a doua fază, P3 - ARFT a selectat un nou fluid compozit magnetizabil nano-micro-structurat (FCM), pe bază de NFM/UTR 500 G cu fracție volumică $\Phi_{\rm Fe}$ 30%, în funcție de proprietățile optime magneto-reologice pentru aplicații de amortizare. P1 - ROSEAL a preparat FCM pe bază de NFM/UTR 517 G cu fracție volumică Φ_{Fe} 30% cu magnetizație de saturație de 6923 G, mult mai mare decât cea a fluidului utilizat în prima fază. Sa măsurat forța pe un aparat de măsurare forța până la 100 daN. Rezultatele, utilizând o tensiune de 12V, sunt prezentate în Tabelul 5.

Tabelul 5. Rezultate asupra modelului de amortizor (în cadrul ROSEAL)

				1			· · ·				
Nr.crt.	Cursa	59,8I	Forța	Ι	Forța	Ι	Forța	Ι	Forța	Ι	Forța
	(mm)	(amper)	(daN)								
1	0	0,04	2	0,06	3,5	0,08	20	0,12	5	0,16	7
2	3,5	0,04	18	0,06	26	0,08	21	0,12	31,2	0,16	31
3	7	0,04	16	0,06	15	0,08	40	0,12	32	0,16	36
4	10,5	0,04	12	0,06	29,4	0,08	35,8	0,12	38,6	0,16	49,4
5	14	0,04	9	0,06	27	0,08	37	0,12	59	0,16	100
6	17,5	0,04	9	0,06	26,5	0,08	37	0,12	60,2	0,16	-
7	21	0,04	9,2	0,06	26,8	0,08	38	0,12	59.8	0,16	-
8	24,5	0,04	11	0,06	28,4	0,08	41,2	0,12	60,6	0,16	-
9	28	0,04	12,2	0,06	31,2	0,08	45,8	0,12	64	0,16	-
10	31,5	0,04	15	0,06	34,4	0,08	50,6	0,12	67	0,16	-
11	35	0,04	18,2	0,06	39	0,08	56	0,12	74,4	0,16	-
12	38,5	0,04	22	0,06	42,5	0,08	61	0,12	78,6	0,16	-
13	42	0,04	27	0,06	48	0,08	61	0,12	86	0,16	-

Se observă că la o intensitate de curent de 0.16A, forța amortizorului nu s-a putut măsura după o anumită cursa (14 mm) cu aparatul din dotarea ROSEAL, acesta având capacitate de măsurare pana la 100 daN. În Figura 15a-e se prezintă etapele de încărcare a cilindrului amortizorului cu FCM, precum și subansamblul amortizor cu tijă și capac de închidere.



(a)



(b)





(d)



(e)

(c) Figura 15. Etape de încărcare a modelului de amortizor

2.9.1.2. Încercări experimentale asupra modelului de amortizor magneto-reologic (AMR) cu fluid LORD/ROSEAL (P2 – IMSAR)

Încercările au fost efectuate la IMSAR pe standul de ridicare a caracteristicilor de lucru Forță – Deplasare (F-D) ale amortizoarelor (vezi Figura 16a), pentru:

- realizarea și verificarea sistemului analogic de comandă al AMR (vezi Figura 16b);
- obținerea de date necesare pentru realizarea la ROSEAL a fluidului magneto-reologic.



Figura 16. (a) Standul de ridicare a caracteristicilor de lucru Forță-Deplasare, (b) Sistemul analogic de comandă

Au fost utilizate două AMR de tipul RD 1005-3 produse de firma LORD, unul original, reprezentat în Figura 17a, și unul modificat (vezi Figura 17b) astfel încât să fie demontabil pentru a putea fi încărcat cu diferite tipuri de fluid MR.



Figura 17. Tipuri de amortizor utilizate: (a) original - LORD, (b) modificat - IMSAR

Caracteristicile F-D ale AMR original pentru valori constante ale curentului de control aplicat circuitului electromagnetic și pentru valori proporționale cu deplasarea D, în conformitate cu strategia de control preconizată pentru protecția anti-seismică prin contravântuiri cu AMR, sunt prezentate în Figura 18.



Figura 18. Caracteristicile F-D ale AMR original pentru valori constante ale curentului de control

După cum se poate observa, Figura 18b-c evidențiază posibilitatea sistemului analogic realizat de a modula forțele dezvoltate de AMR în conformitate cu strategia de control preconizată, în special pentru frecvențe ale mișcării ciclice impuse sub 1.5 Hz. Această limitare a plajei de control se datorează, în principal, defazajului introdus de componentele circuitului analogic între semnalul de tensiune dat de traductorul de deplasare și semnalul de curent aplicat AMR. Pentru a reduce semnificativ timpul de răspuns al sistemului de control, acesta va fi realizat prin utilizarea unor plăci de prelucrare numerică a semnalelor (Digital Signal Processor-DSP), cu posibilități de conversie analog-numerică și de programare pentru implementarea strategiei de control dorite.

Încercările pe AMR modificat, au fost efectuate pentru două variante ale fluidului magneto-reologic încărcat la ROSEAL. Caracteristicile F-D ale AMR modificat, obținute pentru cele două variante de fluid MR încărcate

la ROSEAL, sunt prezentate în Figura 19ab. Forma diagramelor F-D obținute pe stand se datorează unor deficiențe de umplere a AMR cu fluid la ROSEAL (mai pronunțată la varianta 1).



Figura 19. Caracteristicile F-D ale AMR modificat: (a) Varianta 1 – fluid ROSEAL, (b) Varianta 2 – fluid ROSEAL

Din Figura 19a se observă că la primul set de încercări a existat (vezi Figura 16a) anumită corelare între valorile curentului aplicat și ale forțelor dezvoltate de AMR, încărcat cu prima variantă de fluid la ROSEAL. Valorile maxime ale acestor forțe sunt însă semnificativ mai mari decât ale forțelor dezvoltate de AMR original. Forțele prea mari care apar, chiar fără alimentarea cu curent a AMR, arată că fluidul utilizat în prima variantă a fost prea dens în raport cu dimensiunile orificiilor din piston. Acest fapt, coroborat cu fenomenul de saturație magnetică, a condus la reducerea drastică a plajei de control la o bandă îngustă, aflată în zona valorilor mari ale forțelor dezvoltate de amortizor pentru valorile admisibile ale curentului de control. Din Figura 19b se remarcă faptul că a doua variantă de fluid este mult mai bună decât prima, atât din punct de vedere a forțelor dezvoltate de AMR modificat, care sunt în domeniul celor dezvoltate de AMR original pentru aceleași valori ale curentului de control. În timpul încercărilor efectuate cu aplicarea curentului de control proporțional cu deplasarea, diafragma din cadrul AMR modificat s-a fisurat și acesta a început să piardă fluidul MR (varianta 2), rezultatele obținute în acest caz nefiind concludente.

2.9.1.3. Concluzii si recomandări pentru proiectarea amortizorului (P1 – ROSEAL):

Concluzii în urma rezultatelor obținute sunt:

- Încărcarea amortizorului nu s-a făcut complet;
- Nu s-a eliminat aerul complet;
- Rezultatele arată că la începutul cursei forța este mai mică.
- Pistonul nu era ghidat in cilindrul amortizorului din care cauză s-au introdus două benzi de ghidare din teflon grafitat, care la rândul lor au creat o forță de frecare în peretele cilindrului;
- Întrefierul, ca urmare a execuției necorespunzătoare, la amortizorul experimental nu era uniform (lucru foarte important) in plus pistonul atingea peretele cilindrului și astfel câmpul magnetic nu era controlabil (P1 ROSEAL a remediat situația).
- Cele prezentate mai sus vor fi luate în considerare la proiectarea amortizorului de 10t.

Recomandări pentru proiectarea amortizorului experimental de 10 tf:

- Capacitatea de variație a amortizorului este determinată de tipul de FCM precum și de întrefier (dimensiune și precizie de execuție), acesta din urma având o influență importantă asupra câmpului magnetic.
- Din acest motiv se recomandă ca amortizorul să permită modificarea dimensiunii întrefierului, pentru a putea efectua mai multe teste funcționale.

2.9.2. Tema de proiectare a amortizorului de 10t

Tabelul 6 oferă o privire de ansamblu cu privire la cerințele ce trebuie avute în vedere la proiectarea amortizorului de mică capacitate (10t). Aceste cerințe sunt prevăzute pentru următoarele aspecte: (i) gabarit, (ii) condiții de fixare, (iii) parametrii funcționali (forța, deplasare, viteză), (iv) comportarea amortizorului după atingerea forței maxime. Din punct de vedere al gabaritului, lungimea ar trebui să se încadreze între 800 și 1000 mm, iar diametrul să fie de aproximativ 200 mm. Din punct de vedere al condițiilor de fixare, amortizorul va necesita două tipuri de îmbinare: articulată și cu flanșe. În Figura 20 se ilustrează schema conceptuală a

amortizorului și condițiile de fixare de la cele două capete. Din punct de vedere al parametrilor funcționai, forța maximă de lucru a amortizorului va fi 10t. Cursa maximă a pistonului va fi de aproximativ 160 mm, cu deplasări de +/- 80 mm față de poziția neutră. Considerând utilizarea amortizorului într-un sistem hibrid (în combinație cu o contravântuire cu flambaj împiedicat BRB), după atingerea forței de 10t se dorește ca printr-un sistem "interlock" să se realizeze blocarea pistonului astfel încât mai departe să se activeze modul de lucru al contravântuirii. Acest aspect implică proiectarea părților componente ale amortizorului la o forță mai mare (e.g. 20t) asociată cu capacitatea maximă a contravântuirii.

	Tabelul 6. Cerințe pentru proiectarea amortizorulu	i de 10t
TIP / REGIM	PARAMETRU	VALORI
Gabarit	Lungime	800 – 1000 mm
Gabailt	Diametru	200 mm
Condiții de fixare ale	Capăt 1	Îmbinare articulată
amortizorului	Capăt 2	Îmbinare cu flanșă
Parametrii funcționali	Forța maximă	10 tone
(regim de funcționare	Deplasări maxime față de poziția neutră	\pm 80 mm
amortizor)	Viteze maxime	0.3 m/s
	Aceleași valori maxime pentru forță, deplasare, viteza	Până la atingerea forței maxime (10t)
Parametrii funcționali	Activarea sistemului "interlock" de blocare a dispozitivului	La atingerea forței de 10 tone
combinat cu o	Forța maximă pentru proiectarea părților componente ale amortizorului	≥ 20 tone
împiedecat BRB)	Deplasări ale pistonului (după blocare)	0 mm
	Viteze ale pistonului (după blocare)	0 mm/s



Figura 20. Schema conceptuală a amortizorului de 10t – ilustrând lungimea, diametrul aproximativ, și condiții de fixare (îmbinare cu flanșe la capătul din stânga, și îmbinare articulată la capătul din dreapta)

2.10. Activitatea II.8 – Principii de calcul de bază și date de intrare pentru amortizor

Pe baza temei de proiectare a amortizorului de 10t, și respectiv a încercărilor experimentale efectuate pe modelul de amortizor încărcat cu diferite tipuri de fluid magneto-reologic, în cadrul Activității II.8 au fost efectuate următoarele studii:

- Evaluarea soluțiilor constructive pentru amortizori bazate pe analiza soluțiilor tehnice existente și a modelelor pentru dispozitive antiseismice cu fluid magneto-reologic;
- Stabilirea datelor de calcul pentru amortizoarele de mică capacitate.

2.11. <u>Activitatea II.9 – Proiectarea amortizorului</u>

2.11.1. Proiectarea amortizorului de 10t

Amortizorul cu fluide magneto-reologice a fost proiectat de P2 – IMSAR pe baza temei de proiectare elaborate, și respectiv a investigațiilor efectuate asupra modelelor de amortizori. Soluția propusă implică un amortizor hidraulic comandat/reglat de două dispozitive cu fluid magneto-reologic (vezi Figura 21a). Avantajul soluției constă în reducerea volumului de fluid magneto-reologic folosit. Figura 21 prezintă schema conceptuală de funcționare, precum și o secțiune prin amortizorul hidraulic (vedere 3D). În plus, soluția propusă permite blocarea pistonului principal (din cadrul amortizorului hidraulic). Astfel, în cazul unui cutremur de intensitate mică va lucra doar amortizorul, iar în cazul unui cutremur de intensitate mai mare, la început va intra în funcțiune amortizorul, și după depășirea forței de 10t va întra în funcțiune contravântuirea cu flambaj împiedicat. Principalele părți componente ale amortizorului hidraulic (e.g. învelișul exterior, pistonul) au fost proiectate la capacitatea de 21 tone.



Figura 21. (a) Schema conceptuală de funcționare a amortizorului hidraulic cu comandă magneto-reologică, (b) secțiune prin amortizorul hidraulic (vedere 3D)

2.11.2. Pregătire în vederea fabricării amortizorului de 10t

Planșele de execuție (pentru amortizorul hidraulic) au fost realizate și transmise către P4 – TITAN, iar planșele pentru dispozitivul de comandă magneto-reologică sunt în curs de finalizare. În cadrul ședinței de lucru din Noiembrie 2015, partenerul P4 – TITAN a reafirmat capabilitatea tehnico-economică de realizare a prototipului de amortizor și pe baza informațiilor transmise s-a trecut la achiziționarea materialelor necesare fabricării amortizorului. S-au achiziționat următoarele materiale:

- Otel aliat 42CrMo4 bare laminate/forjate de diametre D = 90; 170; 180; 210 mm.
- Bară oțel tip ARMCO Pure Iron D = 30 mm.
- Sarma Cu 99.9 dublu emailată D = 0.9 mm.

Pentru desenele primite de la partenerul P2 – IMS-AR s-a trecut la întocmirea tehnologiilor de fabricație, debitarea materialelor și efectuarea tratamentelor termice premergătoare fabricației. În plus, pentru stabilirea unui protocol de încercări de casa după fabricarea amortizorului s-au efectuat simulări de test pe Bancul de testare amortizori tip BARKER/DIACON S-2000, utilizând un amortizor mecanic tip PSA-35 cu următoarele caracteristici:

- Forța: 222.40 kN
- Cursa: 152 mm.
- Accelerația max.: 0.02 g.

În Figura 22 este prezentat amortizorul PSA-35 montat pe standul de testare în poziția de lucru. Încercările constau în deplasarea amortizorului pe 90% din cursa nominală cu o viteză de deplasare constantă pe extensie și compresie și se măsoară forța rezultantă. S-au făcut determinări la diverse valori ale vitezei de deplasare ce pot fi vizualizate în graficele din Figura 23.



Figura 22. Amortizorul PSA-35 montat pe standul de testare

Probele ce vor fi efectuate cu amortizorul prototip (10t) vor fi similare, variind intensitatea curentului bobinei în mai multe trepte de reglaj pentru aceeași viteză de deplasare. Din încercările de casă ce vor fi efectuate se pot deduce diagramele de variație a forței de răspuns a amortizorului funcție de intensitatea curentului aplicat la bornele bobinei pentru o anumită viteză de deplasare relativ constantă.



Figura 23. Rezultate ale încercărilor efectuate pe bancul de testare BARKER/DIACON S-2000

2.12. Activitatea II.13 – Unitatea de control pentru reglarea amortizorului (P2-IMSAR)

2.12.1. Simularea numerică a strategiei de control al AMR implementată analogic

Reprezentarea schematică și analitică a modelului amortizorului testat au fost prezentate în Raportul Etapei I/2014 (pag. 9-10). Parametrii modelului AMR LORD 1005-3 au fost identificați pe baza unui volum considerabil de date experimentale printr-o metodă inversă asistată de Algoritmi Genetici [8,9,10]. Pentru simularea numerică a modelul analitic al AMR împreună cu cel al sistemului de control realizat practic în cadrul acestei faze, a fost dezvoltat un program în mediul de programare Matlab-Simulink. Schema Simulink dezvoltată in cadrul acestei faze este prezentată în Figura 24.



Figura 24. Schema Simulink realizată pt. simularea numerică a răspunsului dinamic cu strategia de control adoptată

Semnalele de intrare necesare aplicării modelului analitic sunt deplasarea relativă dintre capetele de prindere ale AMR, măsurată cu traductorul de deplasare, și viteza acestei mișcări obținută prin derivare numerică.

Parametrii modelului sunt și ei considerați ca date de intrare a modelului pentru a facilita modificarea lor fără a intra în ecuațiile de mișcare și de sinteză a semnalelor de control. Mărimea de ieșire a sistemului modelat este forța dezvoltată de AMR. Parametrii sistemului de control la ieșirea căruia se obține curentul aplicat bobinelor din pistonul AMR, în conformitate cu strategia de control implementată, se determină astfel încât caracteristicile F-D obținute prin simulare numerică să aproximeze satisfăcător cele determinate experimental. Notațiile parametrilor modelului fenomenologic al AMR sunt aceleași cu cele utilizate în Raportul aferent fazei anterioare (Etapa I/2014). Validarea experimentală a programului de simulare a sistemului de implementare a controlului analogic (vezi Figura 25) a condus la o serie de concluzii deosebit de utile pentru proiectarea și realizarea unui sistem de control digital, bazat pe utilizarea unor DSP programabile.



Figura 25. Simularea numerică a răspunsului dinamic al AMR cu strategia de control adoptată

2.13. Activitatea II.14 – Specificații tehnice pentru fabricație și controlul calității

În cadrul activității II.14 au fost elaborate specificații tehnice pentru fabricație și controlul calității – atât din punct de vedere al fluidului magneto-reologic cât și al amortizorului hidraulic și al dispozitivelor de comandă cu fluid magneto-reologic. Aceste informații sunt detaliate pe planșele de execuție și respectiv în caietul de sarcini sub formă centralizată.

3. Concluzii

În cadrul Etapei II/2015 au fost realizate un set de activități care au avut ca obiect dezvoltarea unor nano-micro fluide magneto-reologice compatibile cu cerințele amortizoarelor anti-seismice, acordarea proprietăților acestor fluide, și respectiv proiectarea amortizorului de 10t.

În Secțiunea 2 se prezintă sinteza activităților din cadrul Etapei II/2015. Au fost întreprinse ample activități pentru prepararea fluidelor magneto-reologice, caracterizarea structurală a fluidelor, analiza probelor la scară de laborator / micro-pilot, măsurarea curbei de magnetizație, stabilirea tehnologiei de preparare. În plus, au fost stabilite principii de calcul de bază și date de intrare pentru amortizor. Pentru proiectarea amortizorului, au fost realizate în prelabil un set de activități premergătoare: (i) umplerea modelului de amortizor cu fluide preparat la ROSEAL, efectuarea încercărilor experimentale asupra modelului de amortizor magneto-reologic și evaluarea răspunsului, elaborarea temei de proiectarea, respectiv pregătirea în vederea fabricării. Alte activități au fost legate de unitatea de control pentru reglarea amortizorului și specificații tehnice pentru fabricație și controlul calității. Secțiunea 2 relevă experiența și calificarea partenerilor pentru realizarea obiectivelor Etapei II/2015, respectiv a Etapei III/2016. Partenerul ROSEAL SA dispune de tehnologia necesară producerii unor cantități importante de fluide MR pe bază de ferofluid, variind în limite largi parametrii de compoziție. Partenerul IMS-AR dispune de cunoștințele necesare proiectării amortizorului MR, iar TITAN SA dispune de tehnologia necesară fabricării amortizorului, respectiv de dotarea necesară pentru efectuarea testelor în fabrică asupra amortizorului pentru stabilirea parametrilor tehnici și constructivi. În plus,

UPT dispune de experiența necesară pentru investigarea și validarea amortizorului, respectiv a sistemului hibrid contravântuire + amortizor, dar și pentru testarea numerică a sistemelor de amortizare cuplate în structură.

Din perspectiva activităților de coordonare, raportare și diseminare – în cadrul Etapei II/2015 au fost organizate două ședințe de lucru în cadrul proiectului (în 06 Februarie la TITAN / București; în 13 Noiembrie la ROSEAL / Odorheiu Secuiesc), și o întâlnire la care s-au realizat încercări experimentale pe modelul de amortizor (în 06 Martie la IMSAR / Bucureșri). În plus, au fost întreprinse activități pentru elaborarea raportului financiar și tehnic, și a fost actualizată pagina web dedicată proiectului (http://www.ct.upt.ro/centre/cemsig/semnal-mrd.htm). De asemenea, a fost prezentat proiectul (scop și obiective, parteneriat, activități de cercetare, și rezultate obținute) în cadrul ședinței de lucru a comisiei de inginerie seismică ECCS TC13 (Seismic Design) ce a avut loc în 29-30 Octombrie la Paris. Diseminarea rezultatelor obținute în cadrul proiectului a fost realizată și prin intermediul unor articole care au fost publicate (sau în curs de publicare) în jurnale internaționale aflate în circuitul ISI, respectiv în cadrul unor conferințe naționale și internaționale.

În cadrul Etapei III/2016, activitățile vor avea următoarele rezultate principale:

- Fabricare și testare amortizor
- Caracterizare amortizor pentru modelare
- Testare ansamblu contravântuire + amortizor în regim pasiv
- Propunere program de investigare care să conducă la realizarea și testarea sistemului semi-activ (amortizor + contravântuire)
- Definitivare proiect amortizor pentru intrarea in producție

4. <u>Referințe</u>

- [1] D. Bica, R.Minea, Patent RO 97556(1989); D. Bica, Rom. Rep. Phys. 47(1995)
- [2] Bica D., Vekas L., Balanean F., Borbath I., Boros T.F., Galffy D., Procedeu de obtinere a fluidelor magnetice compozite pentru etansari magnetofluidice rotitoare, pentru presiuni ridicate, OSIM Nr. 122725/2009.
- [3] Daniela Susan-Resiga, L. Vékás, Doina Bica, Flow behaviour of extremely bidisperse magnetizable fluids, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 322 (20), 2010, pg. 3166-3172 (doi: 10.1016/j.jmmm.2010.05.055).
- [4] Larson R.G., The structure and rheology of complex fluids, 1999, Oxford Univ.Press Part III. Particulate Suspensions, p. 261-323
- [5] Kavlicoglu B., Gordaninejad F., Evrensel C. A., Cobanoglu N., Xin M., Heine C., Fuchs A., Korol,G., "A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch", 2002, Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures, San Diego
- [6] Caiet sarcini cod. PL-01-44, S.C. ROSEAL S.A. Odorheiu Secuiesc
- [7] Ladislau Vekas Nanofluide Magnetice. Sinteza. Structura. Proprietati. Aplicatii, Editura Academiei Ramnana 2013
- [8] M.Giuclea, T.Sireteanu, D.Stancioiu, C.W. Stammers, Model parameter identification for vehicle vibration control with magnetorheological dampers using computational intelligence methods, Pro. Instn. Mech. Engers. 218 PartI: J.Systems and Control Engineering, no.17, 2004, pp.569-581
- [9] M.Giuclea, T.Sireteanu, Gh. Ghita, Metode de inteligenta computationala cu aplicatii la sisteme dinamice, Editura Bren, Bucuresti, 2008, ISBN 978-973648-786-6
- [10] E. Guglielmino, T. Sireteanu, C. W. Stammers, G. Ghita, M. Giuclea, Semi-active Suspension Control, Springer Verlag (2008)