



**UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN CLUJ-NAPOCA
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII**

Ing. Florin-Gabriel BLAGA

TEZĂ DE DOCTORAT

**ACȚIUNEA DINAMICĂ A VÂNTULUI ASUPRA
STRUCTURILOR METALICE MULTIETAJATE**

Conducător științific:

Prof. dr. ing. Cosmin-Gruia CHIOREAN

2022

Lista figurilor

<i>Fig. 2.1 Colapsul cauzat de vânt al unei turbine eoliene</i>	7
<i>Fig. 2.2 Structură metalică spațială prăbușită sub acțiunea vântului</i>	7
<i>Fig. 2.3 Deformarea tablierului podului Takoma sub acțiunea vântului</i>	7
<i>Fig. 2.4 Colapsul turnurilor de răcire, Ferrybridge, Anglia, 1965</i>	7
<i>Fig. 2.5 Procesul stochastic al vitezei vântului</i>	11
<i>Fig. 2.6 Proflul logaritmic al factorului de rugozitate</i>	12
<i>Fig. 2.7 Variația vitezei de referință a vântului V_1, V_2, V_3</i>	15
<i>Fig. 2.8 Presiunea vântului la $z = 30$ m</i>	15
<i>Fig. 2.9 Cele trei componente ale acțiunii vântului:</i>	
<i>$V_m(t)$-componenta medie sau statică,</i>	
<i>$V(t)$-componenta fluctuantă față de medie,</i>	
<i>$V_r(t)$-componenta cvasi-rezonantă</i>	16
<i>Fig. 2.10 Structura analizei statice la acțiunea vântului</i>	17
<i>Fig. 3.1 Variația vitezei vântului cu înălțimea pentru diferite zone de rugozitate</i>	21
<i>Fig. 3.2 Variația vitezei vântului între obstacole, modelul $k - \omega$ SST</i>	24
<i>Fig. 3.3 Dimensiunile domeniului de calcul pentru structura S2</i>	25
<i>Fig. 3.4 Variația vitezei cu înălțimea</i>	26
<i>Fig. 3.5 Domeniul de calcul- structura S1-discretizarea în elemente finite</i>	27
<i>Fig. 3.6 Secțiune prin domeniul de calcul-structura S1</i>	27
<i>Fig. 3.7 Spectrul de putere al vitezei vântului $Z=32,8$ m – structura S1</i>	28
<i>Fig. 3.8 Spectrul de putere al vitezei vântului $Z=32,8$ m – structura S2</i>	28
<i>Fig. 3.9 Spectrul de putere al vitezei vântului $Z=32,8$ m – structura S3</i>	28
<i>Fig. 3.10 Vedere tridimensională a vitezei curenților de aer-structura S1</i>	29
<i>Fig. 3.11 Variația vitezei vântului în jurul obstacolelor-structura S1</i>	30
<i>Fig. 3.12 Variația vitezei vântului, $Z=22$m-structura S1</i>	30

<i>Fig. 3.13 Variația vitezei vântului, Z=22m-structura S2</i>	30
<i>Fig. 3.14 Variația vitezei vântului, Z=22m-structura S3</i>	31
<i>Fig. 3.15 Variația presiunii pe fața expusă, Z=22m-structura S1</i>	31
<i>Fig. 3.16 Variația presiunii pe fața expusă, Z=22m-structura S2</i>	31
<i>Fig. 3.17 Variația presiunii pe fața expusă, Z=22m-structura S3</i>	32
<i>Fig. 3.18 Variația componentei V_x, Z=22m-structura S2</i>	32
<i>Fig. 3.19 Variația presiunii pe fața neexpusă, Z=22m-structura S1</i>	32
<i>Fig. 3.20 Variația presiunii pe fața neexpusă, Z=22m-structura S2</i>	32
<i>Fig. 3.21 Variația presiunii pe fața neexpusă, Z=22m-structura S3</i>	33
<i>Fig. 3.22 Spectrul de putere al variației vitezei vântului, Z=22m-structura S1</i>	33
<i>Fig. 3.23 Tunelul de vânt deschis Gunt HM 170</i>	34
<i>Fig. 3.24 Procesul de imprimare a machetei</i>	35
<i>Fig. 3.25 Schema geometrică a tunelului de vânt și a machetei</i>	35
<i>Fig. 3.26 Transmiterea vitezei vântului și a presiunii</i>	36
<i>Fig. 3.27 Preluarea variației vitezei și a presiunii</i>	36
<i>Fig. 3.28 Variația presiunii. a) sec. 23, b) sec. 24, c) sec. 25</i>	36
<i>Fig. 3.29 Variația vitezei. a) sec. 09, b) sec. 10, c) sec. 11</i>	37
<i>Fig. 3.30 Poziția punctelor de măsurare a presiunii</i>	37
<i>Fig. 3.31 Viteza vântului măsurată în proximitatea punctului B</i>	38
<i>Fig. 3.32 Presiunea măsurată în punctul B</i>	38
<i>Fig. 3.33 Poziția de preluare P_{maxM}, V_M</i>	39
<i>Fig. 4.1 Sistem dinamic cu un grad de libertate</i>	44
<i>Fig. 4.2 Deplasări laterale, structura S1, vânt CFD</i>	47
<i>Fig. 4.3 Echipare cu amortizori vâscoși</i>	48
<i>Fig. 4.4 Echipare cu masă adăugată</i>	48
<i>Fig. 4.5 Deplasări laterale, structura S1, vânt CFD</i>	49
<i>Fig. 4.6 Deplasări laterale, structura S1, vânt CFD</i>	49

<i>Fig. 4.7 Deplasări laterale, structura S1, vânt CFD</i>	50
<i>Fig. 4.8 Acelerații ale ultimului nivel, structura S1, vânt V1</i>	51
<i>Fig. 4.9 Acelerații ale ultimului nivel, structura S2, vânt CFD</i>	51
<i>Fig. 4.10 Acelerații ale ultimului nivel, structura S3, vânt V1</i>	52
<i>Fig. 4.11 Sistemul dinamic cu n GDL echipat cu masă adăugată</i>	54
<i>Fig. 4.12 Schema forțelor sistemului echipat cu masă adăugată la ultimul nivel</i>	54
<i>Fig. 5.1 Sistemul dinamic cu un grad de libertate</i>	59
<i>Fig. 5.2 Sistemul dinamic cu n grade de libertate</i>	60
<i>Fig. 5.3 Starea energetică a structurii de referință S1, vântul V2</i>	63
<i>Fig. 5.4 Starea energetică a structurii S2 echipate cu amortizare, vântul CFD</i>	63
<i>Fig. 5.5 Starea energetică a structurii S1 echipate cu amortizare, vântul V2</i>	64
<i>Fig. 5.6 Starea energetică a structurii S3 echipate cu amortizare, vântul V1</i>	64
<i>Fig. 5.7 Starea energetică a structurii S1 echipate cu masă adăugată, vântul V1</i>	65
<i>Fig. 5.8 Structura S1, vântul V1, deplasări laterale ale ultimului nivel</i>	65
<i>Fig. 5.9 Structura S1, vântul V1, viteze ale ultimului nivel</i>	66
<i>Fig. 5.10 Energia de deformare E_s a structurii de referință S1 acționate de vântul V1</i>	66
<i>Fig. 5.11 Energia de cinetică E_k a structurii de referință S1 acționate de vântul V1</i>	67
<i>Fig. 5.12 Energia de deformare E_s a structurii S1 acționate de vântul V1, echipată cu amortizare adăugată $\zeta=8\%$.</i>	67
<i>Fig. 5.13 Energia de cinetică E_k a structurii S1 acționate de vântul V1, echipată cu amortizare adăugată $\zeta=8\%$.</i>	68
<i>Fig. 5.14 Starea energetică clasică vs starea energetică propusă a structurii de referință S1 acționată de vântul V1</i>	68
<i>Fig. 5.15 Starea energetică propusă ($E_k+E_s+E_a$) în cazul structurii S2 acționate de vântul V3 echipată cu cele două sisteme de protecție pasivă TMD1, respectiv TMD2</i>	69
<i>Fig. 5.16 Starea energetică propusă (E_i) în cazul structurii de referință S3</i>	

<i>aționată de vântul V3 vs echipare cu contravântuiri</i>	70
<i>Fig. 5.17 Starea energetică (Ea) a structurii de referință S2 aționată de</i>	
<i>vântul V3 echipată cu amortizare adăugată $\zeta=8\%$ și contravântuiri</i>	70
<i>Fig. 6.1 Structuri de referință, alcătuire geometrică și secțională</i>	72
<i>Fig. 6.2 Structuri contravântuite, alcătuire geometrică și secțională</i>	72
<i>Fig. 6.3 Structurile echipate cu masă adăugată, configurația TMD1</i>	73
<i>Fig. 6.4 Structurile echipate cu masă adăugată, configurația TMD2</i>	73
<i>Fig. 6.5 Perioade proprii fundamentale-structura S1</i>	74
<i>Fig. 6.6 Perioade proprii fundamentale-structura S2</i>	75
<i>Fig. 6.7 Perioade proprii fundamentale-structura S3</i>	75
<i>Fig. 6.8 Vântul V1, variația vitezei și a presiunii de referință</i>	76
<i>Fig. 6.9 Vântul V2, variația vitezei și a presiunii de referință</i>	76
<i>Fig. 6.10 Vântul V3, variația vitezei și a presiunii de referință</i>	77
<i>Fig. 6.11 Structura S1, forțe concentrate de nivel produse de vântul V1</i>	77
<i>Fig. 6.12 Structura S2, forțe concentrate de nivel produse de vântul V1</i>	78
<i>Fig. 6.13 Structura S3, forțe concentrate de nivel produse de vântul V1</i>	79
<i>Fig. 6.14 Variația presiunii pe fațada expusă a Structurii 1 și a structurilor adiacente</i>	80
<i>Fig. 6.15 Presiunea generată de vânt, fațada expusă, structura S1</i>	81
<i>Fig. 6.16 Presiunea generată de vânt, fațada expusă, structura S2</i>	81
<i>Fig. 6.17 Presiunea generată de vânt, fațada expusă, structura S3</i>	82
<i>Fig. 6.18 Presiunea generată de vânt, fațada opusă, structura S1</i>	82
<i>Fig. 6.19 Presiunea generată de vânt, fațada opusă, structura S2</i>	83
<i>Fig. 6.20 Presiunea generată de vânt, fațada opusă, structura S3</i>	83
<i>Fig. 6.21 Structura S1, distribuția forțelor concentrate de nivel</i>	84
<i>Fig. 6.22 Structura S2, distribuția forțelor concentrate de nivel</i>	84
<i>Fig. 6.23 Structura S3, distribuția forțelor concentrate de nivel</i>	85
<i>Fig. 6.24 Modelul dinamic cu n grade de libertate</i>	86

<i>Fig. 6.25 Deplasări laterale, structura S1, vântul V1</i>	86
<i>Fig. 6.26 Deplasări laterale, structura S2, vântul V2</i>	87
<i>Fig. 6.27 Deplasări laterale, structura S3, vântul V3</i>	88
<i>Fig. 6.28 Deplasări laterale, structura S1, $\zeta=2\%$</i>	88
<i>Fig. 6.29 Deplasări laterale, structura S2, $\zeta=2\%$</i>	89
<i>Fig. 6.30 Deplasări laterale, structura S3, $\zeta=2\%$</i>	89
<i>Fig. 6.31 Deplasări laterale, structura S1, vântul V1</i>	90
<i>Fig. 6.32 Deplasări laterale, structura S1, vântul V1 ($t \in [50\div 150]$)</i>	90
<i>Fig. 6.33 Deplasări laterale, structura S2, vântul V2</i>	91
<i>Fig. 6.34 Deplasări laterale, structura S2, vântul V2 ($t \in [0\div 50]$)</i>	91
<i>Fig. 6.35 Deplasări laterale, structura S3, vântul V3</i>	92
<i>Fig. 6.36 Deplasări laterale, structura S3, vântul V3 ($t \in [170\div 220]$)</i>	92
<i>Fig. 6.37 Deplasări laterale, structura S3, vântul V1</i>	93
<i>Fig. 6.38 Deplasări laterale, structura S3, vântul V1 ($t \in [80\div 150]$)</i>	94
<i>Fig. 6.39 Deplasări laterale, structura S2, vântul V3</i>	94
<i>Fig. 6.40 Deplasări laterale, structura S2, vântul V3 ($t \in [180\div 230]$)</i>	95
<i>Fig. 6.41 Deplasări laterale, structura S1, vântul V1 ($t \in [0\div 100]$)</i>	96
<i>Fig. 6.42 Deplasări laterale, structura S1, vântul CFD</i>	97
<i>Fig. 6.43 Deplasări laterale, structura S2, vântul CFD ($t \in [0\div 100]$)</i>	98
<i>Fig. 6.44 Deplasări laterale, structura S3, vântul CFD ($t \in [0\div 50]$)</i>	99
<i>Fig. 6.45 Accelerații ale ultimului nivel, structura S1, vântul V1 ($t \in [50\div 100]$)</i>	100
<i>Fig. 6.46 Accelerații ale ultimului nivel, structura S2, vântul V2 ($t \in [0\div 30]$)</i>	100
<i>Fig. 6.47 Accelerații ale ultimului nivel, structura S3, vântul V3 ($t \in [280\div 330]$)</i>	101
<i>Fig. 6.48 Accelerații ale ultimului nivel, structura S3, vântul V1 ($t \in [270\div 350]$)</i>	102
<i>Fig. 6.49 Accelerații ale ultimului nivel, structura S1, vântul V2 ($t \in [0\div 50]$)</i>	102
<i>Fig. 6.50 Accelerații ale ultimului nivel, structura S2, vântul V3 ($t \in [40\div 80]$)</i>	103
<i>Fig. 6.51 Accelerații ale ultimului nivel, structura S1, vântul CFD ($t \in [210\div 250]$)</i>	103

<i>Fig. 6.52</i>	<i>Accelerații ale ultimului nivel, structura S2, vântul CFD ($t \in [0 \div 20]$)</i>	104
<i>Fig. 6.53</i>	<i>Accelerații ale ultimului nivel, structura S3, vântul CFD ($t \in [0 \div 80]$)</i>	104
<i>Fig. 6.54</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V1 ($t \in [60 \div 120]$)</i>	105
<i>Fig. 6.55</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V1</i>	106
<i>Fig. 6.56</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V1 ($t \in [60 \div 120]$)</i>	106
<i>Fig. 6.57</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V1 ($t \in [60 \div 120]$)</i>	107
<i>Fig. 6.58</i>	<i>Deplasări laterale, structura S1: a) Vântul V1, b) Cutremur Vrancea 1977</i>	107
<i>Fig. 6.59</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V1</i>	108
<i>Fig. 6.60</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V1 ($t \in [100 \div 140]$)</i>	108
<i>Fig. 6.61</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V1 ($t \in [450 \div 550]$)</i>	109
<i>Fig. 6.62</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V1 ($t \in [0 \div 40]$)</i>	109
<i>Fig. 6.63</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V3 ($t \in [100 \div 200]$)</i>	110
<i>Fig. 6.64</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V3 ($t \in [100 \div 200]$)</i>	110
<i>Fig. 6.65</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V3 ($t \in [100 \div 200]$)</i>	110
<i>Fig. 6.66</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V3</i>	110
<i>Fig. 6.67</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V3 ($t \in [220 \div 250]$)</i>	110
<i>Fig. 6.68</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V2</i>	112
<i>Fig. 6.69</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V2 ($t \in [0 \div 60]$)</i>	112
<i>Fig. 6.70</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V2</i>	113
<i>Fig. 6.71</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V2 ($t \in [0 \div 100]$)</i>	113
<i>Fig. 6.72</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V3</i>	114
<i>Fig. 6.73</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V3 ($t \in [70 \div 120]$)</i>	114
<i>Fig. 6.74</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul CFD</i>	115
<i>Fig. 6.75</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul CFD ($t \in [0 \div 60]$)</i>	115
<i>Fig. 6.76</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul CFD ($t \in [0 \div 100]$)</i>	116
<i>Fig. 6.77</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul CFD</i>	116
<i>Fig. 6.78</i>	<i>Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul CFD ($t \in [0 \div 100]$)</i>	117

<i>Fig. 6.79 Bilanț energetic, structura de referință S1, vântul V1</i>	118
<i>Fig. 6.80 Bilanț energetic, structura de referință S1, cutremurul Vrancea 1977 N-S</i>	118
<i>Fig. 6.81 Energie disipată E_d, structura S2, vântul V3</i>	119
<i>Fig. 6.82 Energie disipată E_d, structura S2 cu mase edăugate, vântul V3</i>	119
<i>Fig. 6.83 Viteza ultimului nivel, structura S2, vântul V3 ($t \in [140 \div 250]$)</i>	120
<i>Fig. 6.84 Energie disipată E_d, flexibilizare vs rigidizare, structura S2, vântul V3</i>	120
<i>Fig. 6.85 Energie disipată E_d, amortizare vs echipare, structura S2, vântul V3</i>	121
<i>Fig. 6.86 Energie disipată E_d, flexibilizare vs rigidizare, structura S3, vântul V3</i>	121
<i>Fig. 6.87 Energie disipată E_d, structura S2, vântul V2</i>	122
<i>Fig. 6.88 Energie disipată E_d, structura S2, vântul V2 ($t \in [0 \div 100]$)</i>	122
<i>Fig. 6.89 Energie disipată E_d, structura S3, vântul V3</i>	123
<i>Fig. 6.90 Energie disipată E_d, structura S3 echipată cu mase adăugate, vântul V3</i>	123
<i>Fig. 6.91 Energie disipată E_d, amortizare vs echipare, structura S3, vântul V3</i>	124
<i>Fig. 6.92 Energie disipată E_d, structura S2, vântul V2 ($t \in [0 \div 20]$)</i>	124
<i>Fig. 6.93 Energie disipată E_d, echipare cu masă adăugată TMD1, vântul V1</i>	125
<i>Fig. 6.94 Energie disipată E_d, echipare cu masă adăugată TMD1, vântul V2</i>	125
<i>Fig. 6.95 Energie disipată E_d, echipare cu masă adăugată TMD1, vântul V3</i>	125
<i>Fig. 6.96 Energie disipată E_d, structura S1</i>	126
<i>Fig. 6.97 Energie disipată E_d, structura S1, echipare cu TMD1</i>	126
<i>Fig. 6.98 Energie disipată E_d, structura S2, echipare cu TMD1</i>	127
<i>Fig. 6.99 Energie disipată E_d, structura S3, echipare cu TMD1</i>	127
<i>Fig. 7.1 Variații ale vântului generate matematic</i>	128
<i>Fig. 7.2 Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S3, vântul V1 ($t \in [80 \div 150]$)</i>	129
<i>Fig. 7.3 Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul CFD ($t \in [250 \div 450]$)</i>	129
<i>Fig. 7.4 Acceleratii ale ultimului nivel, structura S3, vântul V1</i>	130
<i>Fig. 7.5 Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S2, vântul V3</i>	130
<i>Fig. 7.6 Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S1, vântul V1</i>	131

<i>Fig. 7.7 Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S3, vântul V1 ($t \in [200\div 250]$)</i>	131
<i>Fig. 7.8 Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S2, vântul V3</i>	132
<i>Fig. 7.9 Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S2, vântul CFD</i>	132
<i>Fig. 7.10 Energie indusă vs energie disipată, structura S1, vântul V3</i>	133
<i>Fig. 7.11 Energie disipată, structura S3, vântul CFD</i>	133
<i>Fig. 7.12 Energie indusă, structura S3, vântul V3</i>	135
<i>Fig. 7.13 Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S3, vântul V3</i>	135
<i>Fig. 7.14 Viteză vs presiune în abordarea cvasi-staționară, structura S1, vântul V1, $z=30,0$ m</i>	136
<i>Fig. 7.15 Viteză vs presiune în abordarea CFD, Structura S1, vântul CFD, $z=32,8$ m</i>	136
<i>Fig. 7.16 Forța tăietoare de bază vs acțiunea vântului V3 la $z=46.0$ m, structura S3</i>	137
<i>Fig. 7.17 Forța tăietoare de bază vs acțiunea seismică Vrancea 1977, structura S3</i>	138

Lista tabelelor

<i>Tab. 3.1 Discretizarea în elemente finite</i>	28
<i>Tab. 3.2 Evaluarea coeficienților de presiune</i>	39
<i>Tab. 4.1 Răspunsul dinamic al sistemului cu un grad de libertate</i>	44
<i>Tab. 4.2 Câteva valori normate ale fracțiunii de amortizare critică ζ</i>	45
<i>Tab. 6.1 Perioade proprii de vibrație</i>	74

1. Introducere

1.1. Trecut și prezent în acțiunea vântului asupra construcțiilor

În domeniul Ingineriei Civile, preocuparea cercetătorilor și a proiectanților față de acțiunea vântului este o constantă atât din punct de vedere al determinării valorilor parametrilor asociați acestei acțiuni dinamice cât și din punct de vedere al standardizării acestei acțiuni în activitatea de proiectare. Spre deosebire de alte acțiuni considerate în activitatea de proiectare a structurilor, acțiunea vântului poate fi văzută, simțită, admirată sau chiar temută prin efectele spectaculoase (smulgeri de acoperișuri, de tabliere ale podurilor, de elemente ale structurilor de transport a energiei electrice etc.). Când vântul puternic acționează asupra elementelor mediului natural, imaginile spectaculoase îndreaptă gândirea inginerului constructor spre necesitatea definirii / determinării parametrului dinamic / cinematic care conduce la rezultate adecvate în activitatea de alcătuire și de dimensionare secțională. În mare măsură, "substituirea" rafalelor prin acțiuni statice constituie nu numai o preocupare a cercetării din domeniu ci și o vulnerabilitate a acestei substituirii. Într-adevăr, înlocuirea efectului dinamic printr-o acțiune statică este de natură să inducă proiectantului de structuri atât insatisfacții cât și nemulțumiri asociate echivalării efectelor dinamice prin acțiuni statice acoperitoare. Vântul este - de fapt - un fenomen natural care, din punct de vedere meteorologic este, astăzi, prognozat cu o bună aproximație din punct de vedere al vitezei, al locului și al timpului de acțiune. O astfel de prognoză este rezultatul unei modelări matematice complexe a fenomenului și o dovadă a importanței economice și sociale a acestei prognozări. Într-un astfel de context creat de probabilitatea ridicată a prognozării meteorologice a vântului, nemulțumirea și nesiguranța percepute de proiectantul de structuri sunt amplificate. Studiul acțiunii dinamice a vântului asupra construcțiilor devine, astfel, o necesitate care trebuie să cuprindă variația în timp a vitezei și, mai ales, a presiunii generate de masele de aer în mișcare (vântul) la contactul acestora cu diferite obstacole.

Importanța considerării acțiunii dinamice a vântului constă nu în mod necesar în acuratețea rezultatelor, cât în efectul includerii acțiunii dinamice ca atare.

Acesta este principalul și permanentul obiectiv al acestei teze. Pornind de la valori „de teren” ale acțiunii vântului, sunt prezentate componentele răspunsului structural (deplasări, viteze, accelerații, forțe tăietoare de bază) ale acțiunii dinamice. Tabloul tradițional al răspunsului structural este extins prin studiul stării energetice a structurii alături de starea statică și cinematică. Autorul consideră importantă și utilă această extindere atât prin valorile parametrilor asociați stării energetice (energie indusă, energie disipată) cât și prin compararea acestor valori în diferite situații de acțiune și de alcătuire structurală. În același timp, includerea stării energetice creează posibilitatea studierii eficienței protecției pasive la vânt a structurilor de construcții. Absorbția energiei induse structurii de acțiunea vântului constituie esența eficacității protecției

pasive constituite prin amortizare adăugată sau prin mase adăugate. Mișcarea mecanică este permanent însoțită de generarea și disiparea energiei induse structurii. În mare măsură, eficiența protecției pasive (la cutremur, la vânt) este asociată doar componentei de disipare a energiei, fiind cvasi-neglijată componenta de energie indusă. Teza oferă, prin augmentarea stării mecanice tradiționale (starea statică, starea cinematică), atât un tablou mai cuprinzător al acestei stări cât și cadrul comparativ al unor multiple situații de alcătuire structurală și acțiune dinamică a vântului. Acest tablou include mai multe stări de amortizare adăugată de tip liniar vâscos, de mase adăugate la diferite niveluri ale unei structuri multietajate și de rigiditate laterală.

Prin bibliografia studiată și prin rezultatele proprii obținute, autorul a încercat să prezinte permanența preocupărilor de considerare a dinamicității vântului și de exprimare a efectelor acesteia.

1.2. Scurt rezumat al capitolelor

Teza este structurată în șase capitole care cuprind o critică a înlocuirii dinamicității vântului prin forțe statice echivalente, o prezentare concisă a importanței considerării acestei dinamicități și un studiu extins al răspunsului dinamic la vânt al unor structuri multietajate.

1.2.1. Capitolul 2

Având în vedere obiectivul principal al cercetării întreprinse, autorul a considerat important să evidențieze necesitatea asocierii dinamicității acțiunii cu tipul de analiză - dinamică. În acest context, este inclusă o critică adusă procedeele tradiționale de substituire a acțiunii dinamice a vântului prin forțe statice echivalente. Din aceleași considerente este elaborat un tablou care cuprinde procedeele statice de analiză structurală la vânt, inclusiv actualele prevederi naționale și europene [1], [2]. Prezentarea prevederilor de proiectare este, la rândul său, însoțită de explicarea funcțiunii diferiților parametri incluși în procedeele statice pentru echivalarea dinamicității substitute.

1.2.2. Capitolul 3

Considerarea dinamicității unor acțiuni asupra structurilor de construcții este, deja, o componentă cunoscută de inginerii proiectanți încă din timpul studiilor și adoptată cvasi-unanim. Desigur, este vorba de acțiunea seismică asupra structurilor din Ingineria Civilă. Vântul, o acțiune dinamică prin însăși natura sa, nu poate fi asociat analizelor structurale în același mod. Este necesară includerea vântului și a dinamicității acțiunii sale într-un cadru mai larg - Dinamica Fluidelor. O astfel de abordare a necesitat definirea unei zone urbane de rugozitate care include un ansamblu construit. Rugozitatea este un fenomen natural care guvernează - prin efectele sale - acțiunea dinamică a vântului asupra clădirilor.

Un alt efect natural care însoțește acțiunea fluidelor, inclusiv a vântului, este fenomenul de turbulență. Acest fenomen este abordat în Dinamica Fluidelor prin modele matematice, cele mai utilizate modele de analiză a curgerii turbulente fiind cele cuprinse

în familia RANS (*Reynolds averaged Navier-Stokes equations*). Analiza curgerii vântului în jurul unor obstacole fixe (clădiri) a necesitat crearea / definirea analitică a unui domeniu de calcul compus din elemente finite spațiale. Caracteristicile curgerii turbulente a vântului (puterea variației vitezei, coeficientul de presiune pe clădirea studiată) obținute în modelul matematic, au fost comparate cu rezultatele testelor efectuate într-un tunel de vânt pe o machetă confecționată la scara 1:857.

1.2.3. Capitolul 4

Abordarea dinamică a cțiunii vântului nu poate face abstracție de fenomenele mecanice naturale asociate acestei acțiuni. Amortizarea mișcării vibratorii induse de vânt este un astfel de fenomen inevitabil, în același timp, obiectivul analizei efectelor maselor adăugate și a amortizării adăugate asupra răspunsului structurii la vânt a necesitat includerea amortizării inerente și a celei adăugate în analizele structurale efectuate. Autorul a considerat necesar - în acest context - elaborarea unui studiu sintetic despre amortizarea liniar vâscoasă. Acest tip de amortizare este, de fapt, cel mai utilizat în modelarea sistemului dinamic al unei structuri echipate cu protecție pasivă de tip amortizare adăugată.

1.2.4. Capitolul 5

Proiectarea structurilor specifice Ingineriei Civile [3] precum și evaluarea stării de rezistență și stabilitate [4] a acestor structuri constituie activități curente puternic ancorate în tradiția ingineriei structurale: verificarea stării mecanice constituite din starea mecanică statică (de rezistență) și starea mecanică cinematică (de deplasări). Chiar în situația echipării structurilor (proiectate / existente) cu dispozitive de disipare a energiei induse (mai ales de acțiunea seismică), activitatea inginerului structurist constă în verificările tradiționale în contextul în care echiparea are rolul de a reduce răspunsul structural, starea energetică a structurii trebuie inclusă în starea mecanică alături de clasicele stări statică și cinematică. Capitolul cinci constituie o abordare a răspunsului la vânt al structurilor analizate din punct de vedere al stării lor energetice. Această stare este exprimată prin două dintre componentele sale: energia indusă de acțiunea dinamică a vântului și energia disipată de structuri în situațiile de: structură neechipată (de referință), structură echipată cu contravântuiri, echipată cu amortizare liniar vâscoasă adăugată (nivelul de amortizare este exprimat prin valorile fracțiunii de amortizare critică), echipată cu mase adăugate amplasate la ultimul nivel și, respectiv la un nivel intermediar.

În acest capitol sunt definite componentele stării energetice: energie indusă E_i , energie disipată E_d , energie cinetică E_k și energie de deformație E_s .

1.2.5 Capitolul 6

Acest capitol este dedicat analizelor numerice efectuate pe trei structuri de tip cadre plane multietajate din oțel. Cele trei structuri analizate au 12 niveluri, 16 niveluri și, respectiv 21 de niveluri, cinci deschideri și sunt acționate de cele patru acțiuni dinamice de tip vânt considerate în două ipostaze: vânt cvasi-staționar (obținut prin procesarea

statistico-probabilistic a unor viteze înregistrate) și vânt generat prin metodele Dinamicii Fluidelor (*Computational Fluid Dynamics-CFD*). Ambele ipostaze de considerare a vântului dinamic se focalizează pe modelarea fenomenului de turbulență produsă în mediul natural și în mediul construit. Analizele structurale sunt conduse în domeniul liniar-elastic cu ajutorul programului comercial SAP2000. Rezultatele numerice obținute se referă atât la componentele clasice ale răspunsului dinamic (deplasări absolute de nivel, forțe tăietoare de bază, accelerații de nivel) cât și la componentele energetice (energie indusă, energie disipată). Rezultatele sunt prezentate grafic, comparativ și sunt însoțite de comentarii relevante. Comentariile asociate rezultatelor numerice se focalizează asupra eficienței protecției pasive prin amortizare adăugată, prin mase adăugate dar și prin tradiționala soluție de contravântuire. Autorul a considerat necesar calculul accelerațiilor de nivel în diferitele ipostaze de echipare a structurilor analizate având în vedere importanța acestui parametru cinematic pentru starea de confort a utilizatorilor structurilor.

1.2.6 Capitolul 7

Acest ultim capitol are o alcătuire tradițională: o primă parte care refamiliarizează cititorul cu obiectivele cercetării întreprinse și modul în care aceste obiective au fost îndeplinite în capitolele precedente. Autorul evidențiază și argumentează îndeplinirea obiectivelor propuse prin referiri la rezultatele obținute și prin prezentarea unor noi rezultate asociate obiectivelor.

O a doua parte a capitolului este dedicată direcțiilor de cercetare viitoare exprimate prin obiective care pot fi îndeplinite pornind de la rezolvările și concluziile conținute în teză. Obiectivele menționate ca direcții de cercetare viitoare sunt, de fapt, ne-îndepliniri ale rezolvărilor din teză: analiza unor structuri tridimensionale, considerarea interacțiunii fluid-structură prin metodele Dinamicii Fluidelor și generarea unor medii construite având diferite grade de rugozitate.

Conform tradiției, sunt prezentate rezultatele pe care autorul le consideră în mod onest și precizat contribuții originale la tematica abordată.

2. Abordarea statică a fenomenului dinamic, scurt studiu critic

Dezvoltarea Dinamicii structurilor de construcții evidențiază o anumită structură a răspunsului dinamic care este încă prezentă în prevederile normative de proiectare și care este adânc înrădăcinată în personalitatea științifică a inginerilor constructori. Această structură a răspunsului dinamic se poate exprima astfel:

$$\text{răspunsul dinamic} = \text{coeficient dinamic} \cdot \text{răspunsul static}$$

Prin calcularea răspunsului static la valori maxime ale acțiunii dinamice se pot obține valori ale stării mecanice ale structurii proiectate care să „acopere” efectul dinamic real al acțiunii.

Multe construcții care încă dăinuie au fost, probabil, proiectate într-o astfel de abordare a răspunsului lor la acțiuni dinamice. Într-adevăr, posibilitatea adecvării coeficientului dinamic și considerarea răspunsului static maxim pot conduce la dimensionări în secțiune ale elementelor structurale care să asigure starea de rezistență și stabilitate a construcției. Cu toate acestea, substituirea dinamicului prin static împiedică o viziune corectă în ceea ce privește concepția structurală de ansamblu. Amplificarea prin amplitudini tot mai mari ale vibrațiilor tablierului podului Takoma sub acțiunea vântului nu poate fi modelată static.

2.1. Acțiunea dinamică impune analiză dinamică

Istoria construcțiilor este periodic marcată atât de succese cât și de nereușite care, în acest domeniu, înseamnă prăbușiri ale construcțiilor. În lumea modernă, succesele din activitatea de construcții înseamnă – cel mai adesea – clădiri tot mai înalte și viaducte cu deschideri tot mai mari. În același timp, nereușitele înseamnă prăbușirea construcțiilor sub acțiunea unor solicitări generate de specificitatea seismică sau climatică a amplasamentului. Prăbușirea unor construcții datorată acțiunii cutremurului a devenit, de multă vreme, un loc comun în viața contemporană. Într-adevăr, colapsul unor clădiri solicitate seismic a depășit sfera interesului inginerilor civili și s-a extins în domeniile economic, social, politic și constituie un subiect cvasi-prezent în mass-media. Abstracție făcând de pierderile materiale și de dramele umane asociate colapsului clădirilor sub acțiunea cutremurului, interesul public pentru astfel de întâmplări este generat și de dinamica prăbușirii clădirilor. Imaginea unei clădiri în mișcare este pe cât de neobișnuită pe atât de neașteptată dar, în același timp, astfel de evenimente și imagini impun și justifică abordarea dinamică a răspunsului seismic. Proiectarea construcțiilor amplasate în zone seismice a cunoscut o dezvoltare largă din punct de vedere a posibilităților de abordare și profundă din punct de vedere a mijloacelor de protecție antiseismică. Abordarea dinamică atât a cutremurului însuși cât și a răspunsului seismic al construcției a traversat cu succes distanța de la teorie la practică.

Vântul este, la rândul său, un fenomen exclusiv dinamic, cu durată de acțiune și frecvență mult mai mari decât cele ale cutremurelor. Efectele acțiunii vântului asupra construcțiilor

pot fi nu numai spectaculoase prin cinematica indusă, dar și catastrofale prin efectele de colaps. Ingineria modernă utilizează inteligent și cu folos caracterul exclusiv dinamic al vântului prin transformarea energiei cinetice a maselor de aer puse în mișcare în energie electrică. Cu toate acestea, în ingineria civilă acțiunea vântului asupra construcțiilor este – cel puțin la nivelul normelor de proiectare – abordată ca o solicitare statică. O trecere sumară în revistă a prevederilor normative de proiectare a construcțiilor la acțiunea vântului evidențiază, mai degrabă, o preocupare de creștere a gradului de sofisticare în substituirea acțiunii dinamice cu o solicitare statică. Printr-un set, relativ larg, de parametri / coeficienți, asociați presiunii statice a vântului se substituie complexitatea acțiunii dinamice a acestuia printr-o valoare mai mare a presiunii statice. Valorile rezultate ale acțiunii statice a vântului pot conduce la dimensionări corespunzătoare în secțiune ale elementelor structurale dar, efectul dinamic al vântului nu poate fi propriu-zis substituit de nicio acțiune statică. Imposibilitatea impunerii egalității între efectul dinamic și valoarea - oricât de crescută - a acțiunii statice este creată de caracteristicile dinamice, altele decât viteza și, implicit, presiunea vântului. Acțiunea vântului asupra unei construcții depinde de viteza vântului, de caracterul de rafală al mișcării aerului dar, și de mediul natural și construit al amplasamentului construcției. Alitudinea amplasamentului, rugozitatea suprafeței, densitatea mediului construit, orografia terenului, forma construcției și dimensiunile construcției sunt factori care contribuie la generarea acțiunii vântului asupra construcțiilor. Dependența acțiunii dinamice a vântului asupra construcției de forma în plan și înălțimea acesteia este aspectul care particularizează cel mai mult efectul dinamic al vântului în raport cu toate celelalte acțiuni la care sunt supuse construcțiile. Interacțiunea vânt-structură este atât de profundă și importantă (în activitatea de proiectare a structurilor) încât echivalarea statică a acțiunii dinamice implică parametri asociați modurilor normale de vibrație ale structurii.

Familiarizarea inginerilor proiectanți de structuri cu modelarea statică (spectre seismice de proiectare) și, chiar dinamică (accelerograme înregistrate sau artificiale) constituie un avans-din punct de vedere științific - față de abordarea, exclusiv statică a acțiunii vântului. Caracterul dinamic al vântului, gradul ridicat de instruire a inginerilor structuriști în modelarea dinamică a acțiunii seismice dar și frecvența și intensitatea fenomenelor eoliene constituie argumente pentru abordarea dinamică a răspunsului structurilor la acțiunea vântului.

Tratarea dinamică a răspunsului structurilor la acțiunea vântului se impune cu atât mai mult cu cât structurile cele mai expuse acestei acțiuni sunt flexibile și chiar foarte flexibile (Fig. 2.1, Fig. 2.2).



Fig. 2.1. Colapsul cauzat de vânt al unei turbine eoliene [5]



Fig. 2.2. Structură metalică spațială prăbușită sub acțiunea vântului [6]



Fig. 2.3. Deformarea tablierului podului Takoma sub acțiunea vântului [7]

Cel mai popular și consistent exemplu îl constituie prăbușirea podului Takoma în anul 1940 (Fig. 2.3) sub acțiunea unui vânt cu viteza de 65 km/h. Caracterul cinematic al răspunsului suprastructurii podului Takoma este constituit atât din starea de vibrații indusă tablierului cât și de amplificarea acestor vibrații sub acțiunea vântului. Acest al doilea efect -amplificarea vibrațiilor în timpul acțiunii vântului -demonstrează legătura dintre acțiune și structură.

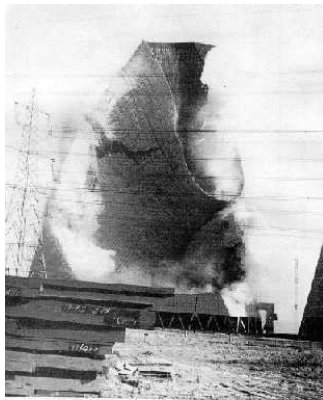


Fig. 2.4. Colapsul turnurilor de răcire, Ferrybridge, Anglia, 1965 [8]

Un alt exemplu de inter-dependență între acțiunea vântului și structură este colapsul a trei turnuri de răcire dintr-un grup de opt (120m înălțime, beton armat) din cadrul centralei electrice Ferrybridge din Anglia în 1965 (Fig. 2.4). Prăbușirea acestor turnuri s-a produs sub efectul siajului turbulent [9] caracteristic structurilor cu secțiune circulară dispuse în perechi sau grupat. Un exemplu foarte popular printre proiectanții de structuri și celebru pentru problemele cauzate de acțiunea vântului este clădirea John Hancock Tower din Boston. Deși construcția a fost terminată, propriu-zis, în 1971 au fost necesare lucrări de reducere a răspunsului (vibrații ale clădirii) la vânt constând în montarea pe acoperișul terasă a unei mase adiționale acordată din punct de vedere cantitativ (300 t) și al conexiunilor elastice și de amortizare ale masei cu structura clădirii.

Acestea sunt doar câteva exemple de inadecvare structurală la care analizele structurale ulterioare prăbușirii lor - au evidențiat specificitatea acțiunii dinamice a vântului și consecințele considerării acesteia, exclusiv, ca o acțiune cvasi-statică.

Vântul este, prin chiar natura sa, un fenomen dinamic specific fluidelor. Efectele acțiunii vântului - nu în mod necesar asupra construcțiilor - pot fi constatate, aproape exclusiv, ca mișcare indusă; spre deosebire de o altă acțiune dinamică, acțiunea vântului acoperă un domeniu mult mai larg: de la efecte dorite la care oamenii sunt plăcut afectați de acțiunea vântului până la efecte dezastruoase în care mediul-natural și construit - sunt grav afectate de această acțiune. Din punct de vedere al Ingineriei Civile, ambele aceste fenomene naturale ar trebui abordate ca acțiuni exclusiv dinamice. Istoria analizei și proiectării structurilor de construcții evidențiază o structură specifică, devenită tradițională, a abordării acțiunilor dinamice și a efectelor lor asupra construcțiilor. Astfel, răspunsul dinamic R_d al unei structuri supuse unei acțiuni dinamice se calculează prin multiplicarea (înțeleasă, de regulă, supraunitară) răspunsului static R_{st} cu un coeficient "dinamic" Ψ : $R_d = \Psi \cdot R_{st}$. O astfel de abordare statică poate, indiscutabil, conduce la o proiectare adecvată în secțiune a componentelor structurale și nestructurale ale unei construcții. Aceeași istorie a Ingineriei Civile probează atât faptul că abordarea statică a acțiunii vântului a condus la realizarea unor construcții adecvate din punct de vedere al stării lor mecanice și a siguranței în exploatare cât și la câteva eșecuri constând în colapsul unor structuri sub acțiunea vântului. Este evident și general acceptat faptul că în abordarea statică a oricărei acțiuni dinamice se pierd anumite aspecte care sunt asociate atât fenomenului dinamic în sine cât și interacțiunii fenomenului cu construcția însăși. Această pierdere a fost și, încă, este substituită printr-un set de coeficienți asociați acțiunii statice prin care, într-adevar, se obțin - în proiectarea structurilor - secțiuni adecvate siguranței structurale. Trebuie, totuși, spus că "adecvare structurală" înseamnă, de cele mai multe ori, o secțiune transversală mai "puternică". În cazul structurilor metalice multietajate, asigurarea unei stări adecvate la acțiunea vântului înseamnă echiparea structurii cu un set de contravântuiri. Oricare ar fi soluția adoptată (secțiuni transversale mari sau echipare cu contravântuiri), efectul este, de fapt, o creștere a rigidității laterale a structurii. O rigiditate laterală adecvată a structurilor multietajate acționate de un fenomen dinamic (cutremur, vânt) este adânc înrădăcinată în gândirea inginerilor proiectanți de structuri și constituie încă, de multe ori, singurul șanț de apărare a construcției împotriva acțiunii fenomenului dinamic. Considerarea rigidității

laterale ca un mijloc de reducere a răspunsului structurii la acțiunea dinamică s-a înrădăcinat în formarea profesională a inginerilor datorită, în principal, a două motive:

- o rigiditate laterală "mare" constituie, într-adevar, o soluție de reducere a răspunsului dinamic;

- răspunsul dinamic este, de cele mai multe ori, înțeles numai prin componenta sa cinematică - deplasările laterale induse de acțiunea dinamică, deși componentele (statice, cinematice) ale răspunsului dinamic formează un spectru mult mai larg.

Creșterea rigidității laterale a unei structuri metalice multietajate - ca mijloc de reducere a răspunsul dinamic al structurii - poate fi considerată o "reacție statică" la abordarea statică a acțiunii dinamice. Oricât de corectă / adecvată ar fi o structură concepută și dimensionată prin substituirea fenomenului dinamic cu o acțiune statică, o astfel de abordare statică înlătură, din start, posibilitatea reducerii răspunsului dinamic printr-o soluție (reacție) dinamică. Tehnologiile moderne de reducere a răspunsului dinamic constau, în cvasi-totalitatea lor, în echiparea structurii cu dispozitive mecanice de tip mecanisme. Adică, dispozitive care prin mișcarea lor reduc mișcarea dinamică a structurii indusă de fenomenul dinamic. Cele mai populare astfel de dispozitive sunt amortizorii (mai ales de tip vâscos) și masele adăugate. Atât echiparea cu amortizori cât și echiparea cu mase adăugate conferă structurii o amortizare suplimentară față de cea inerentă oricărei structuri. Amortizarea, la rândul său este un fenomen asociat exclusiv mișcării. Iată cum abordarea statică a unui fenomen dinamic conduce, exclusiv, la soluții statice de reducere a răspunsului dinamic și, în același timp, elimină posibilitatea reducerii acestui răspuns prin soluții moderne caracterizate prin faptul că adaugă structurii tradiționale componente specifice Ingineriei Mecanice. Posibilitatea reducerii prin tehnologii moderne simple și eficiente a răspunsului dinamic al structurilor metalice multietajate la acțiunea vântului este - în opinia autorului - principalul motiv care impune abordarea dinamică a acțiunii vântului și nu, cum s-ar putea crede, diferențele în valorile numerice ale parametrilor răspunsului (static / dinamic) obținute prin cele două tipuri de abordări. Abordarea statică a acțiunii vântului, exprimarea în parametri statici a răspunsului structurilor la acțiunea dinamică a vântului și procedeele statice de reducere a răspunsului structurilor la acțiunea vântului formează un adevărat pedestal al instruirii studenților facultăților de construcții. În acest proces de instruire profesională, dinamicitatea acțiunii vântului este rapid și simplu transformată în presiune statică și inclusă, astfel, în grupările de încărcări din normativele de proiectare. O importanță mult mai mare se acordă acțiunii cutremurului, deși, la nivel de acțiune, și acesta este abordat static prin arhicunoscutele spectre seismice. Simplitatea și rapiditatea pe care le oferă produsele software de analiză structurală permit o abordare facilă a analizelor seismice de tip *time-history* de către studenți în perioada de elaborare a lucrărilor de absolvire. Calculul răspunsului seismic prin analize de tip *time-history* dezvoltă rapid nu numai abilitățile necesare conducerii unei astfel de analize ci și înțelegerea mai extinsă a răspunsului dinamic al structurilor. Într-adevăr, analizele seismice de tip *time-history* necesită - dar și facilitează - înțelegerea și însușirea unor concepte precum model dinamic, grade de libertate dinamice, caracteristici inerțiale, analiză modală, răspuns modal etc. Normativul P100 care guvernează de peste 50 de ani proiectarea structurilor

amplasate în zone seismice din România permite, în ultima sa variantă P100-1/2013, înlocuirea analizei seismice prin spectre cu analize seismice de tip *time-history*, fără a furniza însă, modul de interpretare a componentelor (variabile în timp) ale răspunsului seismic. În nicio fază a instruirii studenților facultății de construcții acțiunea vântului nu este abordată dinamic lăsând, astfel, impresia că presiunea statică poate substitui dinamicitatea vântului. Mai mult, tratarea statică a acțiunii vântului și identificarea răspunsului la vânt prin deplasările laterale de nivel și prin suplimentarea stării de eforturi, induce studenților și inginerilor proiectanți ideea că reducerea răspunsului constă, exclusiv, în manipularea rigidității laterale. În acest fel, substituirea acțiunii dinamice a vântului prin presiunea statică împiedică modernizarea nu numai a analizelor structurale ci și a tehnologiilor de reducere a răspunsului dinamic la vânt. Este, prin urmare, necesar ca vântul să beneficieze de același tratament pe care îl are cutremurul. Abordarea statică a acțiunii vântului înseamnă mai mult decât modelarea acestei acțiuni. Desele și numeroasele up-gradări ale prevederilor normative reflectă un anumit grad de insatisfacție a legiuitorului față de această abordare. Într-adevar, în ultimii 25 de ani normativele care guvernează analiza și proiectarea structurilor supuse acțiunii vântului au fost modificate de patru ori în România [1],[2],[10],[11]. Cu toate modificările operate, toate aceste normative au un element comun: acțiunea statică a vântului asupra construcției.

2.2. Concepte și principii în echivalarea statică a acțiunii dinamice a vântului

Substituirea dinamicității acțiunii vântului printr-o presiune aplicată static necesită, totuși, un set de parametri – de forma unor coeficienți care depind atât de acțiunea vântului cât și de caracteristicile unui model dinamic virtual minim al structurii. În procesul de alcătuire a modelului de calcul al structurii efectul dinamic al acțiunii vântului implică și interacțiunea vânt–structură prin parametri de aerodinamicitate și de elasticitate (exprimată prin flexibilitate laterală sau prin rigiditate laterală) a construcției. Elasticitatea construcției poate determina o interacțiune mai mult sau mai puțin profundă a acțiunii vântului cu construcția însăși. Un alt nivel de interacțiune este cel care introduce rugozitatea amplasamentului construcției. În acest fel, calculul caracteristicilor aerodinamice și elastice ale construcției, rugozitatea amplasamentului, viteza și turbulența vântului contribuie la crearea unui model final de analiză statică. În continuare, sunt prezentate principalele noțiuni și concepte cu care operează un inginer proiectant în aplicarea prevederilor curente de proiectare și care constituie osatura normativelor referitoare la acțiunea vântului [1], [2].

2.3. De la dinamic la static în normele actuale de proiectare

Viteza vântului constituie conceptul de bază al modelului de calcul la vânt a construcțiilor. Acțiunea vântului este cuantificată prin valori ale vitezei sale măsurate și/sau procesate. Se obține, astfel, un set întreg de valori ale vitezei vântului care permit trecerea de la acțiunea dinamică la încărcarea statică din vânt.

Valoarea instantanee a vitezei vântului și implicit a presiunii dinamice a vântului conține o componentă medie și o componentă fluctuantă față de medie (Fig. 2.5).

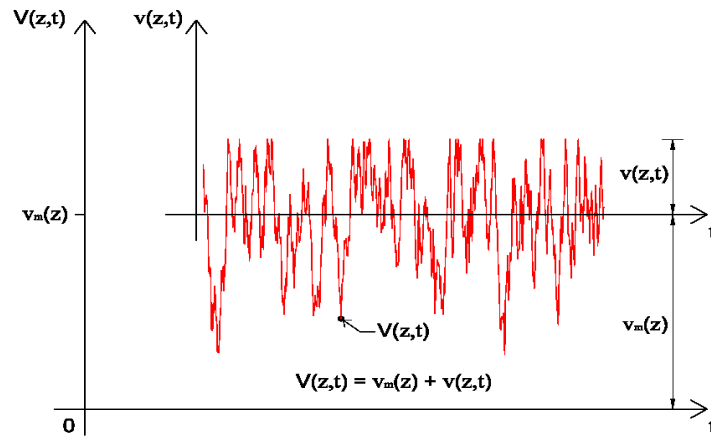


Fig. 2.5. Procesul stochastic al vitezei vântului

Valoarea medie a vitezei și presiunii dinamice a vântului este un produs de factori ce țin seama de valoarea de referință a vitezei și presiunii și de rugozitatea și orografia terenului. Componenta fluctuantă este înlocuită în analiza statică de intensitatea turbulenței, factor ce conduce la valorile de vârf ale vitezei și presiunii vântului.

2.3.1. Valoarea de referință a vitezei și presiunii vântului

Viteza de referință a vântului v_b , este viteza caracteristică amplasamentului în care se află structura, măsurată la înălțimea de 10,0 m, în câmp deschis independent de direcția vântului. Valorile măsurate în stații meteorologice sunt mediate pe o durată de 10,0 minute. Aceste valori au o probabilitate de depășire de 0,02 într-un an cea ce corespunde unui interval mediu de recurență de 50 de ani. Presiunea de referință a vântului q_b derivă din viteza de referință a vântului v_b :

$$q_b = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \quad (2.1)$$

unde ρ este densitatea aerului cu valoarea $\rho = 1.25 \frac{kg}{m^3}$ pentru aerul standard.

2.3.2. Rugozitatea terenului

Viteza vântului este influențată de mărimea și densitatea obstacolelor pe care le întâlnește în cale. Aceste obstacole (clădiri, vegetație etc.) definesc rugozitatea terenului. În evaluarea acțiunii vântului sunt folosite patru categorii de teren ce modelează, prin lungimea de rugozitate z_0 măsurată în metri, diferite tipuri de amplasament (zone costiere expuse vânturilor...zone urbane dens construite). Lungimea de rugozitate poate lua valori de la 0.003 m (categoria de teren 0) până la 1.0 m (categoria de teren IV).

2.3.3. Valoarea medie a vitezei și a presiunii vântului

Variația vitezei vântului cu înălțimea z deasupra terenului, este modelată de factorul de rugozitate $c_r(z)$. Pentru diferite categorii de teren (caracterizate de lungimea de rugozitate z_0) se definește viteza medie a vântului $v_m(z)$ a cărei variație cu înălțimea este reprezentată de un profil logaritmic

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot v_b \quad (2.2)$$

$$c_r(z) = k_r(z_0) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.3)$$

unde $k_r(z_0)$ este factorul de teren dat de relația

$$k_r(z_0) = 0.189 \cdot \left(\frac{z_0}{0.05}\right)^{0.07} \quad (2.4)$$

Utilizarea profilului logaritmic al vitezei este valabil pe toată înălțimea stratului limită atmosferic dar utilizarea sa este recomandată pe primii 200 m de la suprafața terenului (Fig. 2.6).

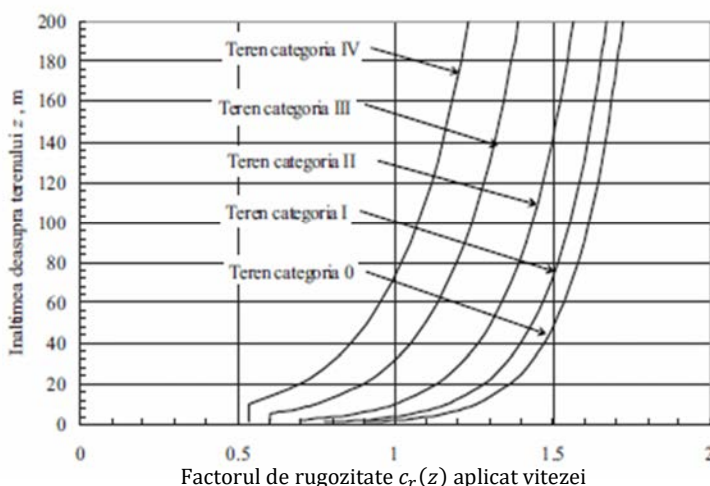


Fig. 2.6. Profilul logaritmic al factorului de rugozitate [2]

Valoarea vitezei medii a vântului poate fi influențată de relieful amplasamentului. Când structura este amplasată pe dealuri izolate sau creste, viteza vântului se modifică în funcție de panta versantului. Dacă efectul orografiei terenului nu poate fi neglijat, viteza medie a vântului devine

$$v_m(z) = c_o \cdot c_r(z) \cdot v_b \quad (2.5)$$

unde c_o este factorul orografic.

Abordarea statică a acțiunii vântului presupune evaluarea forțelor produse de mișcarea maselor de aer. Se definește astfel valoarea medie a presiunii vântului

$$q_m(z) = c_o^2 \cdot c_r^2(z) \cdot q_b \quad (2.6)$$

Variația presiunii medii a vântului cu înălțimea z deasupra terenului păstrează același profil logaritmic, ca și în cazul vitezei medii $v_m(z)$, profil modelat de factorul de rugozitate pentru presiunea dinamică a vântului $c_r^2(z)$.

$$c_r^2(z) = k_r^2(z_0) \cdot \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]^2 \quad (2.7)$$

2.3.4. Turbulența vântului

Curgerea turbulentă a vântului este cu precădere produsă de frecarea maselor de aer, în mișcare, cu suprafața pamântului. Altitudinea până la care mișcarea maselor de aer poate fi influențată de frecarea cu suprafața terenului poate ajunge până la 1,0 km [14]. Turbulența se manifestă prin fluctuații ale vitezei vântului față de medie și este modelată, în evaluarea acțiunii vântului asupra structurilor, prin intensitatea turbulenței $I_v(z)$. Intensitatea turbulenței la înălțimea z este definită ca raportul dintre abaterea standard σ_v a fluctuațiilor vitezei instantanee a vântului $V(z, t)$ și viteza medie a vântului $V_m(z)$,

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{V_m(z)} \quad (2.8)$$

și este normată în [2] sub forma

$$I_v(z) = \frac{\sqrt{\beta}}{2,5 \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \quad (2.9)$$

Vântul este un proces aleator caracterizat de variații haotice ale vitezei acestuia. În practica de proiectare este de interes valoarea de vârf a presiunii produse de rafalele vântului. În acest sens se definesc factorul de rafală $c_{pq}(z)$ pentru presiunea medie a vântului la înălțimea z deasupra terenului și factorul de rafală pentru viteza medie a vântului $c_{pv}(z)$

$$c_{pq}(z) = 1 + 2 \cdot g \cdot I_v(z) = 1 + 7I_v(z) \quad (2.10)$$

$$c_{pv}(z) = 1 + g \cdot I_v(z) = 1 + 3,5I_v(z) \quad (2.11)$$

unde g este factorul de vârf a cărui valoare depinde de durata de mediere a valorilor vitezei vântului (ex. 1s, 3s, 0.2 s) și de intervalul de referință (ex. 600s, 3600s) [12].

2.3.5. Valoarea de vârf a presiunii vântului

Prin combinarea efectelor orografiei terenului „ c_0^2 ”, al rugozității amplasamentului „ $c_r^2(z)$ ” și al turbulenței vântului „ $c_{pq}(z)$ ”, se definește factorul de expunere $c_e(z)$.

$$c_e(z) = c_0^2 \cdot c_r^2(z) \cdot c_{pq}(z) \quad (2.12)$$

Valorile de varf ale vitezei $v_p(z)$ și presiunii $q_p(z)$ vântului la o înălțime z deasupra terenului sunt exprimate în continuare prin amendarea valorilor de baza ale vitezei,

respectiv presiunii vântului, cu coeficienți ce țin seama de orografia și rugozitatea amplasamentului structurii

$$v_p(z) = c_{pv}(z) \cdot v_m(z) \quad (2.13)$$

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (2.14)$$

2.3.6. Presiune versus construcție

Acțiunea vântului asupra construcțiilor este modelată ca presiune/sucțiune aplicată pe suprafețele rigide ale clădirilor și structurilor. Standardele internaționale acceptă ipoteza “cvasi-staționară” conform căreia, fluctuațiile presiunii pe suprafețele expuse vântului urmaresc fluctuațiile vitezei vântului [12, 13]. Structura poziționată în calea curgerii maselor de aer va amplifica sau va diminua presiunea de vârf a vântului $q_p(z)$, prin forma sa în plan și în elevație. Valoarea presiunii de calcul w_e , va lua valori în funcție de coeficienții de presiune/sucțiune c_{pe} , ce depind de forma în plan și elevație a construcției, de dimensiunile suprafeței încărcate și de poziția suprafeței în anvelopa clădirii [14]:

$$w_e = c_{pe} \cdot q_p(z) \quad (2.15)$$

2.3.7. De la viteze la forțe statice

Reproducerea variației în timp a vitezei vântului natural a fost și este o preocupare continuă a cercetătorilor. De-a lungul timpului au fost propuse o serie de modele matematice care să reproducă componentele cinematice și statice ale vântului turbulent considerând fenomenul ca fiind un proces stocastic ce variază aleator în spațiu și timp [15-17]. Modelarea numerică a seturilor de valori obținute prin observații / măsurători directe ale vitezei vântului implică procesarea acestor valori prin tehnici specifice teoriei probabilităților și a statisticii (metoda Monte Carlo, simulări numerice, etc.) [18-21]. Rezultatele obținute astfel constituie atât baze de date pentru procesarea unor parametri specifici cât și date primare pentru transformări de tip Fourier a funcțiilor de timp în funcții de putere și în reprezentarea spectrală în domeniul 2D și chiar 3D a acestor funcții. Procesarea matematică profundă și extinsă a parametrilor măsurati a permis descompunerea acțiunii vântului în „moduri” (componente simple - funcții aproape periodice) ale acțiunii integrale. Normele de proiectare [1, 2] surprind variația vitezei vântului în jurul valorii de bază v_b , valoare asociată amplasamentului, prin considerarea intensității turbulenței $I_v(z)$ la evaluarea presiunii generate de vânt. Vitezogramele generate artificial [15-17], adoptate în teză, sunt caracterizate de o intensitate a turbulenței I_v proprie fiecărei variații și sunt denumite în continuare vânt V1, V2, V3. Toate cele trei vitezograme prezintă oscilații ale vitezei în jurul valorii medii de 27 m/s (Fig. 2.7). Fără a lua în considerare o formă structurală oarecare, pentru un amplasament asimilat cu un câmp deschis cu obstacole izolate, se poate compara presiunea generată de vântul normat [2], caracterizat de $I_v(z) = 0.156$ la $z = 30$ m, cu presiunea statică produsă de variația vântului artificial cu o intensitate a turbulenței I_v proprie. Valorile

$I_v(z)$ asociate celor trei vitezograme artificiale V1, V2 și V3 sunt prezentate în Fig. 2.8 alături de valoarea $I_v(z)$ calculată conform [2] pentru vântul normat.

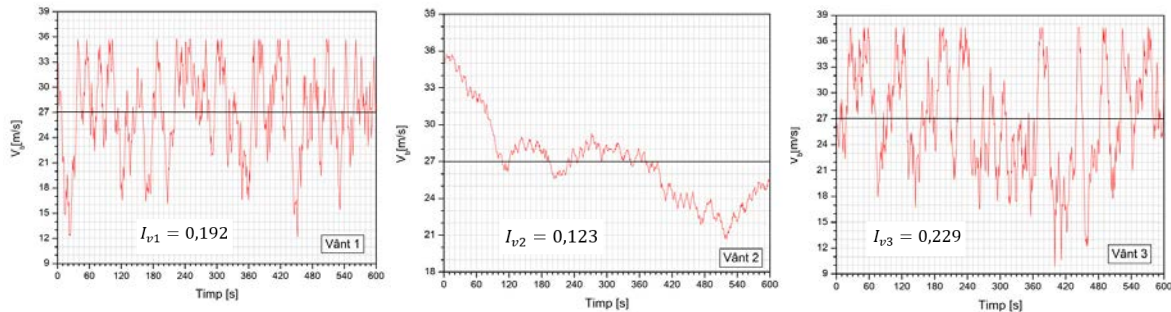


Fig. 2.7. Variația vitezei de referință a vântului V1, V2, V3

Se constată că valorile presiunilor w calculate considerând cele trei intensități ale turbulenței, la înălțimea $z = 30 \text{ m}$ deasupra terenului, sunt comparabile cu presiunea de calcul normată conform [2] (Fig. 2.8).

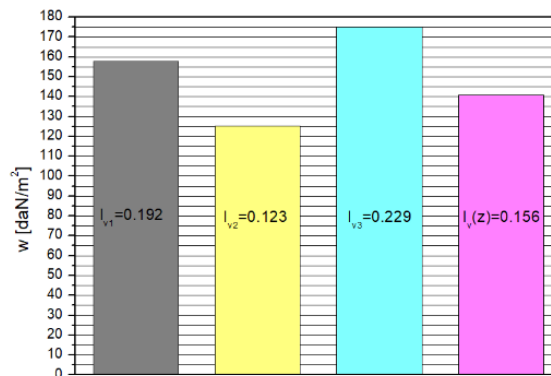


Fig. 2.8. Presiunea vântului la $z = 30 \text{ m}$

Diferențele între valorile presiunilor calculate pe baza datelor standardizate și, respectiv pe baza vitezogramelor generate artificial sunt, într-adevăr mici și chiar conservatoare, ceea ce recomandă astfel de procesări pentru studiul acțiunii dinamice a vântului.

2.3.8. Interacțiunea vânt - structură

Fluctuațiile vitezei vântului pot produce un răspuns cvasi-rezonant, mai ales în cazul structurilor flexibile. Flexibilitatea pronunțată a structurii influențează modul și intensitatea de acțiune a vântului printr-o interacțiune generată de posibilitatea de rezonană a acțiunii cu structura. Într-un astfel de caz, acțiunea vântului asupra construcției se modelează ca o forță globală F_w aplicată static într-un punct al construcției definit de înălțimea de referință z_s și care ține seama, prin coeficientul c_d , de această interacțiune dinamică:

$$F_w = \gamma_{Iw} \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (2.16)$$

În relația (2.16):

$q_p(z_e)$ este valoarea de vârf a presiunii dinamice a vântului evaluată la înălțimea z_e ;

c_d este coeficientul de răspuns dinamic al construcției;

c_f este coeficientul aerodinamic de forță pentru clădire/structură sau element structural, ce include și efectele frecării;

A_{ref} este aria de referință, orientată perpendicular pe direcția vântului;

γ_{Iw} este factorul de importanță – expunere.

Mai mult despre coeficientul de răspuns dinamic c_d .

Coeficientul de răspuns dinamic,

$$c_d = \frac{1+2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2+R^2}}{1+7 \cdot I_v(z_s)} \quad (2.17)$$

se aplică forțelor globale F_w statice (calculate, la rândul lor din presiunea $q_p(z_e)$) și este definit ca raportul dintre valoarea de vârf X_p a răspunsului în deplasări laterale din acțiunea statică, calculat ținând cont inclusiv de efectul acțiunii vântului în rezonanță cu modul fundamental de vibrație al structurii prin factorul de răspuns rezonant R^2 și de faptul că fluctuațiile vitezei vântului nu se produc simultan pe toată suprafața expusă acțiunii vântului prin factorul de răspuns nerezonant (cvasi-static) B^2 , și valoarea de vârf X_m a răspunsului în deplasări laterale obținut fără a considera aceste efecte. Parametrul k_p numit factorul de vârf al răspunsului dinamic [14, 22] a cărui valoare depinde de durata de mediere a valorilor vitezei vântului T și de frecvența proprie de vibrație ν a structurii în modul fundamental, evidențiază valoarea maximă așteptată a răspunsului. În cazul structurilor cu o flexibilitate relevantă și în lipsa echipării acestora cu amortizare adăugată, efectul de rafală al vântului poate genera o componentă cvasi-rezonantă a răspunsului dinamic total (Fig. 2.9).

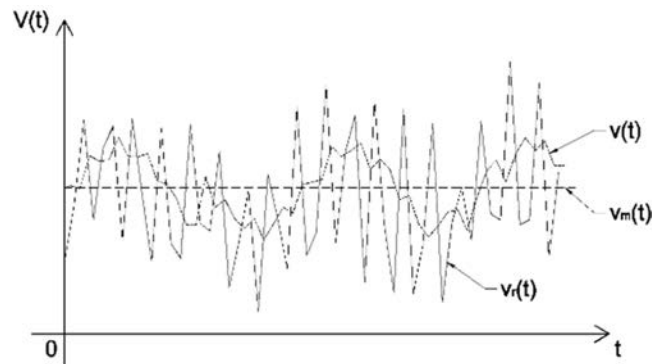


Fig. 2.9. Cele trei componente ale acțiunii vântului: $V_m(t)$ -componenta medie sau statică,

$V(t)$ -componenta fluctuantă față de medie, $V_r(t)$ -componenta cvasi-rezonantă

Practica proiectării curente impune calculul separat al acestei componente cvasi-rezonante și adăugarea sa la celelalte două componente (medie și fluctuantă) ale răspunsului la vânt. Componenta cvasi-rezonantă – neglijată în cazul acțiunilor caracterizate prin fluctuații joase ale vitezei – poate deveni predominantă în cazul

structurilor flexibile și ne-echipate cu amortizare adăugată. Această situație a impus o aprofundare a calculului coeficientului de răspuns dinamic c_d și o dezvoltare a metodelor de calcul a acestuia. Aprofundarea calculului coeficientului c_d constă în implicarea unor concepte matematice specifice analizei fenomenelor care pot fi reprezentate prin spectre de acțiune. În cazul vântului, componenta cvasi-rezonantă implică două astfel de concepte care țin de aspectul de turbulență a vântului: lungimea scării integrale a turbulenței și, respectiv densitatea spectrală de putere a vitezei fluctuante a vântului [23], [24]. Scara integrală a turbulenței reprezintă o măsură a dimensiunilor (a lungimii) medii ale vârtejurilor turbulente ale curgerii aerului. Lungimea scării integrale a turbulenței în direcție longitudinală (pe direcția vântului) este determinată cu relații care implică atât parametri specifici matematicii (analizelor spectrale) cât și parametri rezultați din măsurători în situ sau expertimental [25, 26].

Densitatea spectrală de putere a vitezei fluctuante a vântului este un concept specific fenomenelor fluctuante /aleatoare modelate stocastic și analizate statistic. Introducerea coeficientului dinamic în evaluarea acțiunii statice a vântului asigură corelarea acțiunii cu răspunsul care, în acest fel, se constituie într-un raspuns static mai rafinat – de multe ori considerat ca fiind raspuns dinamic [27] al structurii. În general, corelarea acțiunii vântului cu răspunsul static presupune identificarea comportării dinamice a structurii cu răspunsul modal fundamental [24, 27].

Structura unei analize statice la acțiunea vântului care include dinamicitatea acestuia prin coeficientul dinamic c_d și corelarea acțiunii cu modul de vibrație fundamental poate fi reprezentată diagramatic astfel (Fig. 2.10):

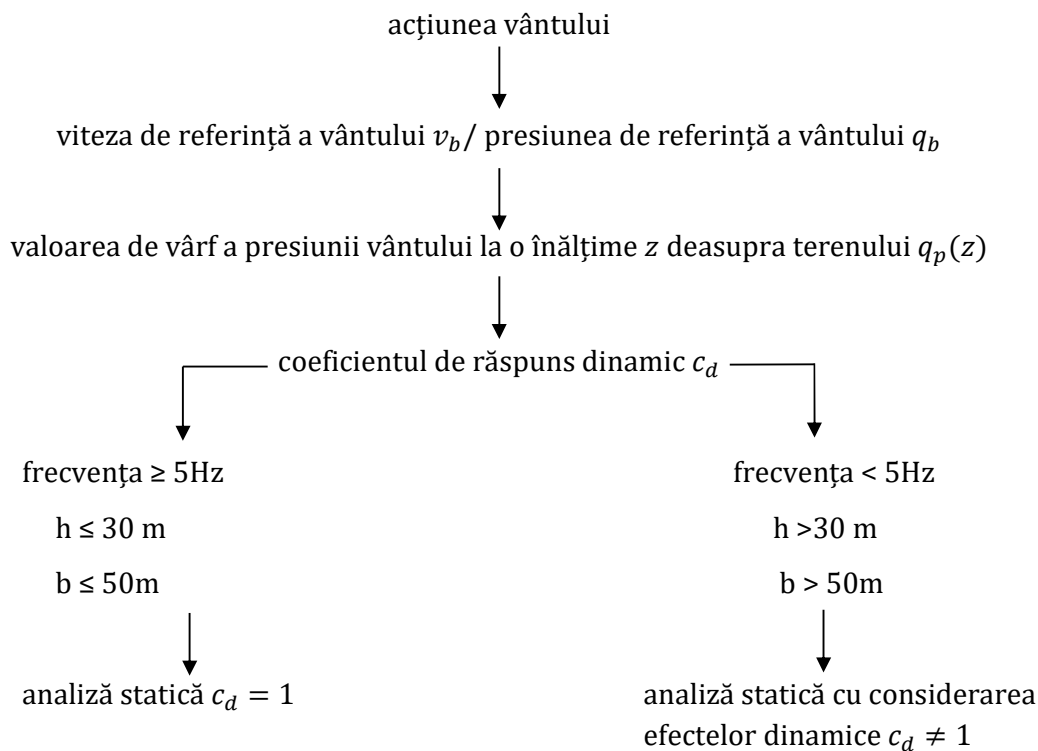


Fig. 2.10. Structura analizei statice la acțiunea vântului

Așa cum rezultă și din diagrama de mai sus (Fig. 2.10) considerarea interacțiunii vânt-structură prin coeficientul de răspuns dinamic c_d aduce modelarea statică la cel mai apropiat nivel de dinamicitatea vântului. Rafinarea – în continuare – a modelării dinamicității vântului și a interacțiunii vântului cu structura impun dezvoltarea și considerarea unui model dinamic al acestor fenomene care să includă atât interacțiunile vânt - structură și vânt - teren cât și specificul dinamic al acțiunii.

3. Ingineria vântului prin dinamica fluidelor

Analiza structurilor la acțiunea vântului a înregistrat o dezvoltare continuă începând cu anii 1930 [28]. Materialele de construcție moderne (oțelul, betonul armat) au înlocuit cărămida și piatra. Structurile au devenit mai ușoare, mai înalte și, implicit mai flexibile. Forma secțiunii transversale a structurilor înalte este - în mare măsură - rezultatul luptei cu turbulențele produse de vânt [29]. Istoria conceperii / proiectării construcțiilor înalte a cunoscut etape distincte din punct de vedere al obiectivului luptei cu fenomenele naturale cum sunt: gravitația, vântul, apa, cutremurul, temperatura, radiațiile, tsunami. Până nu demult, forma și dimensiunile structurilor erau rezultatul luptei cu gravitația și, mai apoi, cu cutremurul. Azi, lupta cu vântul a devenit o prioritate și o prezență constantă în activitatea de concepere și de proiectare a structurilor înalte. Creșterea flexibilității structurilor, privită ca sensibilitate la deplasări laterale, a deschis calea spre studiul dinamicității vântului. Vibrațiile structurilor cauzate de vânt au devenit perceptibile odată cu creșterea flexibilității structurilor, provocând disconfort ocazional ocupanților acestora. Un prim răspuns la acest efect al vântului a fost creșterea rigidității laterale prin echiparea structurilor cu sisteme de contrvântuire. Echipării cu sisteme de contrvântuire i-au fost dedicate numeroase activități de cercetare și aplicare practică [30].

Ca în cazul celorlalte fenomene naturale, și în cazul acțiunii vântului, un pas important l-a constituit trecerea de la fenomenul propriu zis la un model analitic care, apoi, să poată fi abordat matematic prin mijloacele analizei structurale. Astfel, în cazul cutremurului parametrul care permite trecerea de la fenomen la acțiune structurală este accelerația terenului din zona amplasamentului structurii (a_g). Modelarea acțiunii vântului s-a bazat atât pe viteza vântului în zona amplasamentului [1], cât și, mai nou, pe presiunea dinamică generată de viteza vântului [2]. Parametrii cinematici primari - cei care se măsoară direct în timpul producerii fenomenului - sunt, și aceștia, diferiți: accelerația terenului - în cazul acțiunii cutremurului și viteza vântului - în cazul acestei acțiuni. Procesarea valorilor măsurate ale vitezei vântului - în scopul obținerii unui parametru asociat analizelor structurale - necesită aplicarea specificităților statisticii și teoriei probabilităților. Așa cum s-a arătat în Capitolul 2, analiza cvasi-statică a structurilor acționate de vânt necesită acest parametru sub formă de viteză medie (Fig. 2.5). Procesul analitic este relativ complex și se finalizează prin transformarea acțiunii dinamice a vântului în forțe aplicate static asupra structurii. Practica proiectării structurilor a evidențiat necesitatea considerării unui mecanism complex al acestui fenomen care să includă atât fenomenul în sine cât și obstacolul constituit din construcțiile de pe amplasament. S-a ajuns, astfel, la conceptul interacțiunii vânt-structură care constituie, încă, un obiectiv al cercetării moderne [31-33]. Studiile interacțiunii vânt-structură evidențiază complexitatea analitică a acestei interacțiuni prin necesitatea considerării unui spectru larg de parametri asociați construcției și amplasamentului acesteia: geometria generală a structurii, proprietățile elastice ale structurii (rigiditatea laterală), vecinătățile de pe amplasament, relieful amplasamentului.

3.1. Reproducerea / modelarea analitică a vântului natural

Viteza vântului este parametrul cel mai important în evaluarea acțiunii acestuia asupra construcțiilor. Acest lucru este pe cât de normal pe atât de așteptat: viteza este cea care generează presiunea și, deci, acțiunea de tip forță asupra construcțiilor. De aceea evaluarea vitezei pornind de la câțiva parametri mășurați a devenit un obiectiv principal al studiilor teoretice și practice de modelare a acțiunii vântului [34-36]. Rezultatele cercetărilor evidențiază dependența vitezei vântului și dependența interacțiunii vânt-structură atât de fenomenul vânt propriu-zis cât și de obstacolele pe care acesta le întâlnește. Obstacolele, la rândul lor, generează schimbări ale vitezei și direcției vântului numite turbulențe care pot avea efecte pe cât de neașteptate pe atât de dezastruoase [37]. Turbulențele, ca fenomen, sunt luate în considerare în normele curente de proiectare prin parametri (intensitatea turbulenței) care conduc la valori mai mari ale presiunii exercitate pe construcție decât valorile presiunii de bază. O problemă matematică esențială a procesării parametrilor primari / mășurați este predicția vitezei și turbulenței vântului în zone în afara celei în care au loc mășurătorile. Un istoric detaliat al studiilor teoretice și practice a implementării rezultatelor în activitatea de proiectare este prezentat în [38-40].

Era modernă în ingineria vântului începe odată cu acceptarea faptului că frecarea cu obstacole naturale sau artificiale influențează turbulența. Zona influențată de frecarea cu terenul este denumită "strat limită atmosferic". Variația vitezei vântului pe înălțimea stratului limită atmosferic este descrisă prin două legi de variație: legea logaritmică (3.1) și legea exponențială (3.2) [12]:

$$\bar{V}(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3.1)$$

Unde k este constanta *von Karman*, aproximată experimental la valoarea de 0,4, z_0 lungimea de rugozitate. Viteza de frecare u_* este proporțională cu densitatea aerului ρ și efortul unitar τ_0 , efort care se manifestă la frecarea maselor de aer cu terenul [41].

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3.2)$$

O modalitate mai accesibilă de exprimare a variației vitezei cu înălțimea este legea exponențială,

$$\bar{V}(z) = V_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (3.3)$$

Relația (3.3) face legătura între viteza de referință mășurată la 10 m (V_{10}), viteză proprie unui amplasament, și viteza la o înălțime oarecare z . Exponentul α ține cont de rugozitatea terenului și a fost determinat empiric de Davenport [42] și alții. Variația vitezei vântului după legea exponențială, pentru diferite zone de rugozitate, este ilustrată grafic în Fig. 3.1.

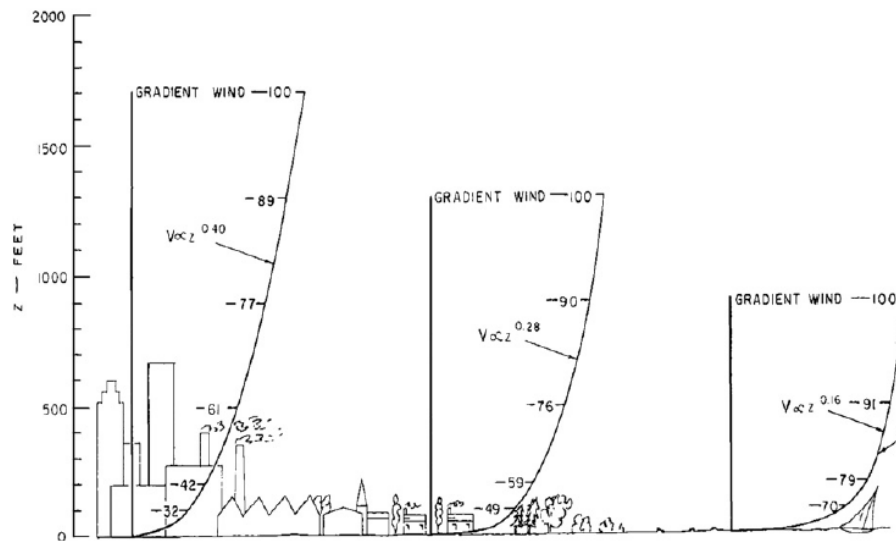


Fig. 3.1. Variația vitezei vântului cu înălțimea pentru diferite zone de rugozitate [39]

Studiul - din perioada anilor 1970 - forțelor și efectelor generate de vânt și-a găsit o largă aplicare nu numai în Ingineria Civilă, dar și în meteorologie și în aeronautică. Reproducerea stratului limită atmosferic în tunele de vânt și clasificarea capacității mediului înconjurător de a influența variația vitezei vântului, prin înălțimea de rugozitate z_0 , își au originea tot în această perioadă [22, 39].

Progresul tehnologic în tehnica de măsurare a presiunii și dezvoltarea tunelelor de vânt au permis studiul variației presiunii vântului pe diferite forme structurale. Coeficienții de presiune C_p , prezenți astăzi în normele de proiectare au la bază studii în tunele de vânt [43-45].

Complexitatea studiilor teoretice și experimentale prin tuneluri de vânt a condus cercetarea înspre abordarea experimentală virtuală a acțiunii vântului și chiar a tunelurilor de vânt [46-48]. Mai mult, așa cum plecând de la informații primare sunt astăzi generate accelerograme artificiale ale unor cutremure virtuale, în studiul acțiunii vântului pornind de la viteze măsurate se ajunge - prin precesări matematice de tip funcții Weirstrass - la vitezograme artificiale [15-17]

Acțiunea vântului asupra structurii implică - mai mult decât în cazul celorlalte acțiuni climatice - interacțiunea dintre vânt și structură. Vântul, prin parametrii săi cinematici, și structura prin caracteristicile sale elastice formează un sistem care implică interacțiunea dintre cele două componente. Mișcarea structurii indusă de acțiunea vântului influențează / modifică însăși acțiunea. Considerarea în analiza structurală a influenței elasticității structurii asupra acțiunii dinamice a vântului este semnificativă pentru structuri flexibile. Decuplarea, în analiza structurală, a celor două componente ale sistemului interactiv vânt-structură conduce la rezultate acceptabile doar în cazul structurilor rigide. Având în vedere specificitatea mișcărilor vântului, pe de o parte și, respectiv a structurii pe de altă parte, modelarea interacțiunii vânt-structură se bazează pe descompunerea acțiunii vântului în fluctuații cu perioade distincte și pe descompunerea mișcării structurii în moduri normale de vibrație. Complexitatea analizei structurale care include interacțiunea vânt-structură a condus atât la studii teoretice [32, 49, 50] cât și la studii experimentale folosind tuneluri de vânt [51, 52]. Abordarea virtuală

a interacțiunii vânt-structură se bazează pe modelarea numerică a acțiunii vântului și pe considerarea structurii ca un sistem cu număr finit de grade de libertate în care modurile normale de vibrații - inclusiv cel de torsiune generală - sunt considerate ponderat - modurilor superioare acordându-li-se o pondere mai mare în interacțiunea cu vântul [31]. În timp ce modelarea dinamicii structurii acționate de vânt este, deja, un loc comun în analiza structurală, modelarea acțiunii vântului cu obiectivul de includere a interacțiunii vânt-structură implică o incursiune în dinamica fluidelor.

3.2. Simularea numerică a vântului turbulent

Curgerea laminară a vântului devine curgere turbulentă sub influența rugozității mediului înconjurător cu care masele de aer vin în contact. Rugozitatea poate fi generată de relief, obstacole naturale (păduri, vegetație) sau obstacole artificiale (construcții cu diferite înălțimi și forme în plan).

3.2.1. Modelarea turbulenței vântului

Modelarea matematică a mișcării (curgerii) fluidelor incompresibile are rădăcinile în secolul XVIII, perioadă în care Bernoulli și, mai apoi, Leonhard Euler descriu curgerea unui fluid inviscid, fluid a cărui vâscozitate este considerată zero, sub forma ecuației [53] :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} \quad (3.4)$$

unde \mathbf{u} este vectorul vitezei fluidului, P este presiunea fluidului, ρ densitatea fluidului iar ∇ este operatorul vectorial ce exprimă variația vitezei și a presiunii fluidului în spațiu. În anii 1821-1843 inginerul francez Claude-Louis Navier și matematicianul George Gabriel Stokes introduc vâscozitatea în ecuația de mișcare a fluidelor

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3.5)$$

unde ν este vâscozitatea cinematică a fluidului iar ∇^2 este operatorul Laplace. Osborne Reynolds, fizician englez, completează ecuațiile Navier-Stokes propunând descompunerea curgerii într-o componentă medie și una fluctuantă

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \hat{\mathbf{u}} \quad (3.6)$$

ceea ce va conduce la cunoscuta ecuație a curgerii turbulente denumită *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) [54, 55]. Ecuația mai sus amintită introduce în legea curgerii fluidelor conceptul de efort Reynolds (*Reynolds stress*)

$$\tau_{ij} = \rho \overline{\hat{u}_i \hat{u}_j} \quad (3.7)$$

efort unitar ce ia naștere la suprafața particulelor de fluid în mișcare.

Introducerea termenului neliniar τ_{ij} în ecuație a necesitat introducerea de termeni noi pentru rezolvarea acesteia, fapt ce a condus la dezvoltarea mai multor modele matematice de modelare a curgerii turbulente [56] folosite astăzi în programele de analiză a dinamicii fluidelor (*Computational Fluid Dynamics-CFD*). Dintre acestea, cele mai des folosite în ingineria vântului și dovedite a fi fiabile în diferite aplicații de inginerie a vântului pot fi amintite:

Modelul $k - \epsilon$ a fost propus de Launder și Spalding [57] și are la bază ecuații de transport ale energiei cinetice a turbulențelor (k) și a ratei / vitezei lor de disipare (ϵ). Acest model este conceput pentru o turbulență plană - fenomenul real fiind tri-dimensional. De asemenea, acest model nu ia în considerare forfecarea dintre două straturi vecine. Prin aceste simplificări, modelul poate fi aplicat cunoscând doar condițiile inițiale și / sau cele de contur ale fluidului. Modelul $k - \epsilon$ prezintă unele dezavantaje cum ar fi supraevaluarea energiei cinetice a turbulențelor în zone fără curgere [58] - în care energia cinetică este nulă. Modelul Launder - Spalding pentru relația $k - \epsilon$ simplifică fenomenul real prin neglijarea unor parametri printre care și cei care exprimă anizotropia fenomenului. Astfel, modelul presupune că rata / viteza deformațiilor fluidului este aceeași în toate direcțiile. Simplificarea fenomenului prin astfel de ipoteze are avantajul unei exprimări simple a relației dintre energia cinetică k a fenomenului și viteza de disipare a acestei energii în raport cu timpul.

Modelul $k - \omega$ este un model ce introduce două ecuații de transport [59] cu variabilele energia cinetică a turbulențelor k și rata de transformare a energiei cinetice în energie termică. Din punct de vedere matematic, această rata ω se exprimă ca derivata energiei în raport cu distanța. Adăugarea variației energiei cu distanța îmbogățește cuprinderea fenomenului turbulenței care, în acest fel, nu mai este considerat un fenomen izotrop.

Modelul $k - \omega$ SST a fost propus de Menter în anul 1994 [60] și este cunoscut ca *Menter Shear Stress Transport turbulence model*. Modelul combină modelele $k - \omega$ și $k - \epsilon$ și adaugă o *funcție de amestecare* [61] cu scopul de a activa modelul $k - \omega$ în apropierea obstacolelor și modelul $k - \epsilon$ în zonele îndepărtate de suprafețe. Luarea în considerare a prezenței obstacolelor în dezvoltarea turbulențelor este un pas înspre considerarea interacțiunii vânt - structură și a curgerii ne-laminare a acestui fluid. O variație a vitezei vântului versus distanța dintre obstacole, generată în tunelul virtual de vânt folosind modelul $k - \omega$ SST este prezentată în Fig. 3.2.

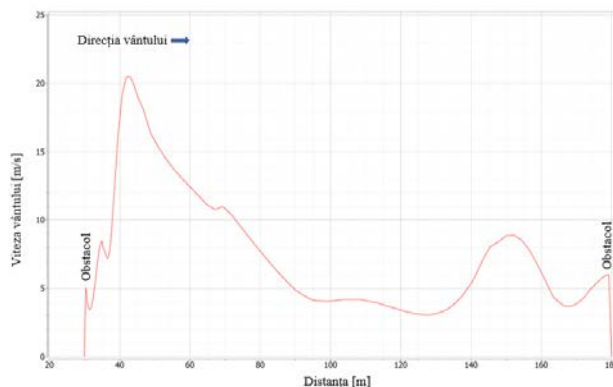


Fig. 3.2. Variația vitezei vântului între obstacole, modelul $k - \omega SST$

3.2.2. Definirea domeniului de calcul

Generarea unei variații realiste a vitezei vântului folosind programe de analiză a dinamicii fluidelor implică modelarea unui tunel virtual de vânt care să imite cât mai fidel stratul limită atmosferic, zona de la suprafața terenului pe înălțimea căreia curgerea aerului este afectată de frecarea cu terenul. Domeniul de calcul este asociat structurii care urmează a fi modelată în vederea analizei numerice folosind tunelul virtual. În cele ce urmează, referirile sunt făcute la cele trei structuri (numite S1, S2, S3) analizate numeric din punct de vedere al stării lor statice, cinemice, energetice. Cele trei structuri sunt prezentate din punct de vedere al geometriei lor generale, al geometriei secționale, al stării lor de amortizare în Capitolul 6 (Fig. 6.1÷6.4).

3.2.3. Dimensiunile domeniului de calcul

Dimensiunile tunelului virtual, domeniul de calcul, trebuie să ia valori în funcție de dimensiunile blocajului, dimensiunile structurilor supuse acțiunii vântului. Literatura de specialitate [62-64] recomandă ca distanța de la structură la limitele laterale, limita superioară, respectiv la suprafața definită ca zonă de intrare a aerului, să fie egală cu $5H$, unde H este înălțimea maximă a structurilor studiate. De la structură la suprafața de ieșire a aerului din tunelul virtual se recomandă o distanță de $15H$. Volumul structurilor incluse în domeniul de calcul nu trebuie să depășească 3% din volumul tunelului virtual. În lucrarea de față au fost studiate trei structuri cu formă pătrată în plan, $30,0 \text{ m} \times 30,0 \text{ m}$ și înălțimi diferite: structura 1 - $43,6 \text{ m}$, structura 2 - $58,0 \text{ m}$, structura 3 - $76,0 \text{ m}$. Pentru cele trei structuri au fost generate tuneluri de vânt virtuale (Fig. 3.3) cu scopul de a obține viteze și implicit presiuni variabile în timp pe suprafețele expuse vântului. Generarea turbulențelor se bazează, în principal, pe dispunerea în față unui grup de trei structuri de aceeași înălțime, a unui blocaj cu dimensiunile în plan $50,0 \text{ m} \times 50,0 \text{ m}$ și înălțimea egală cu a structurii studiate.

3.2.4. Definirea limitelor domeniului de calcul

Programele de analiză a dinamicii fluidelor imită proprietățile mediului natural. Puterea de calcul limitată impune restrângerea mediului natural la forma domeniului de calcul. Pentru a modela cât mai fidel curgerea maselor de aer se definesc proprietăți (conținători) ale limitelor domeniului de calcul. Suprafețele ce mărginesc domeniul de calcul sunt denumite în continuare: intrare, ieșire, bază, margine laterală, margine superioară. O viteză constantă a vântului de 35 m/s a fost atribuită suprafeței de intrare. Baza domeniului este definită ca o suprafață rugoasă caracterizată de înălțimea de rugozitate K_s și de constanta de rugozitate C_s . În practica de proiectare rugozitatea amplasamentului este clasificată în categorii de teren funcție de lungimea de rugozitate Z_0 . Analizele efectuate urmăresc modelarea vântului turbulent pe un amplasament de Categoria III - terenuri suburbane, amplasament caracterizat de lungimea de rugozitate $Z_0 = 0,3$ m. Trecerea de la lungimea de rugozitate Z_0 , la înălțimea de rugozitate K_s , este recomandată în literatura de specialitate [65, 66]

$$K_s \cdot C_s = 9,793 \cdot Z_0 \quad (3.8)$$

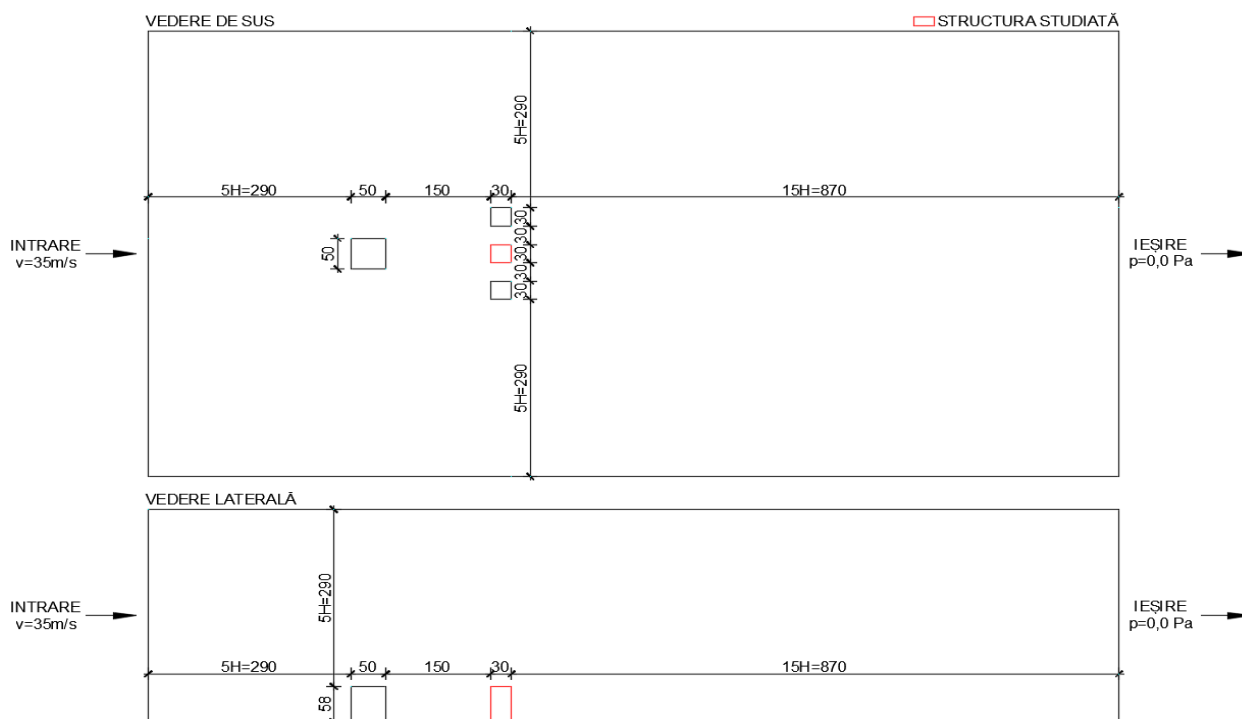


Fig. 3.3. Dimensiunile domeniului de calcul pentru structura S2

Pentru a genera variația vitezei vântului pe înălțime (Fig. 3.4), bazei domeniului de calcul i-a fost atribuită înălțimea de rugozitate $K_s=5,87$ m și constanta de rugozitate $C_s = 0,5$, constantă ce indică o distribuție uniformă a rugozității.

Marginilor laterale și marginii superioare le-au fost atribuite proprietăți de *simetrie* [67], proprietate ce permite curgerea liberă a vântului în afara zonei de interes.

Limita posterioară a domeniului de calcul, ieșirea, se definește ca o suprafață de presiune zero.

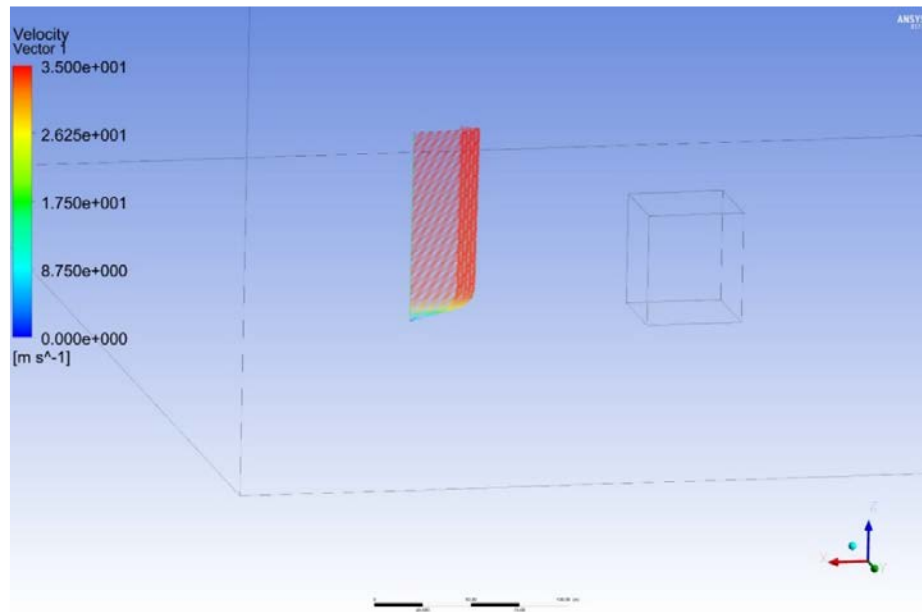


Fig. 3.4. Variația vitezei cu înălțimea

3.2.5. Definirea rețelei de de elemente finite

Tunelul de vânt virtual este discretizat în elemente finite spațiale, de tip hexaedru (Fig. 3.5). Forma regulată a domeniului de calcul și a structurilor analizate recomandă [62] discretizarea în elemente finite de tip hexaedru. Dimensiunea elementelor finite variază în funcție de poziția acestora în volumul domeniului de calcul. Scopul analizei este de a genera curgerea turbulentă a vântului și de a capta variația vitezei acestuia în proximitatea structurilor studiate odată cu studiul variației presiunii generate de vânt pe suprafața structurilor. În acest sens discretizarea/rafinarea domeniului de calcul în elemente finite urmărește ca în zonele de interes discretizarea în elemente finite să fie cât mai fină (Fig. 3.6).

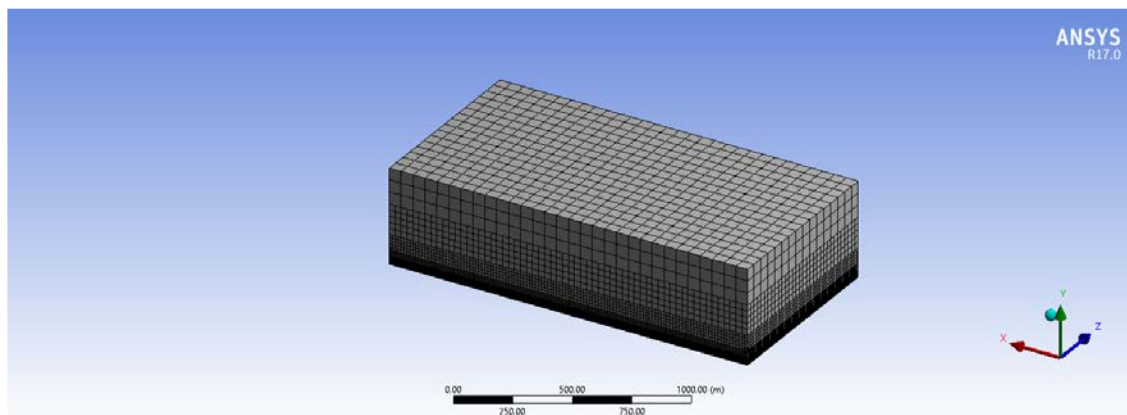


Fig. 3.5. Domeniul de calcul- structura S1-discretizarea în elemente finite

Pentru structura S1 și structura S2 baza domeniului de calcul a fost discretizată în elemente finite cu dimensiunea de 3,0 m (Discretizarea 2) iar baza domeniului de calcul al structurii S3 în elemente finite cu dimensiunea de 5,0 m (Discretizarea 2). Suprafețele structurilor studiate au fost discretizate în elemente finite cu dimensiunea de 0,5 m în toate cele trei cazuri.

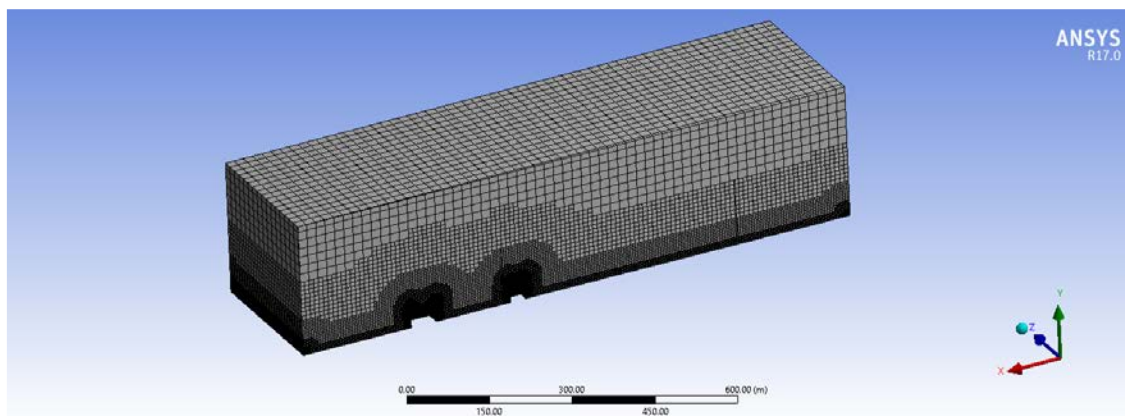


Fig. 3.6. Secțiune prin domeniul de calcul-structura S1

3.2.6. Analiza sensibilității la variația rezoluției rețelei de elemente finite

Pentru structurile analizate, domeniul de calcul a fost discretizat în trei trepte de densitate a elementelor finite spațiale conform Tab. 3.1. Rezoluția rețelei se diferențiază prin numărul de elemente finite spațiale (E) și numărul de noduri ale rețelei (N). Variația intensității turbulenței I_v ($z = 32,8\text{m}$), constituie un parametru considerat la evaluarea comparativă a discretizării domeniului de calcul în elemente finite și este evidențiată în Tab. 3.1.

Structura	Discretizarea 1			Discretizarea 2			Discretizarea 3		
	E	N	$I_v(z)$	E	N	$I_v(z)$	E	N	$I_v(z)$
1	8.699.587	9.591.403	0,31	4.052.091	4.635.545	0,29	3.397.184	3.912.420	0,41
2	5.539.009	6.104.109	0,57	1.455.879	1.704.942	0,59	665.917	801.170	0,65
3	5.198.871	5.849.703	0,65	4.634.897	5.290.108	0,50	4.190.167	4.780.251	0,56

Tab. 3.1. Discretizarea în elemente finite

Cele trei trepte de discretizare sunt comparate și prin spectrul de putere al vitezei vântului la înălțimea de 32,8 m Fig. 3.7, Fig. 3.8, Fig. 3.9.

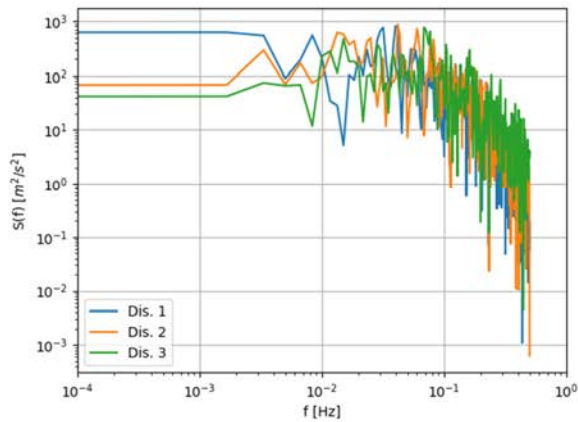


Fig. 3.7. Spectrul de putere al vitezei vântului
Z=32,8 m – structura S1

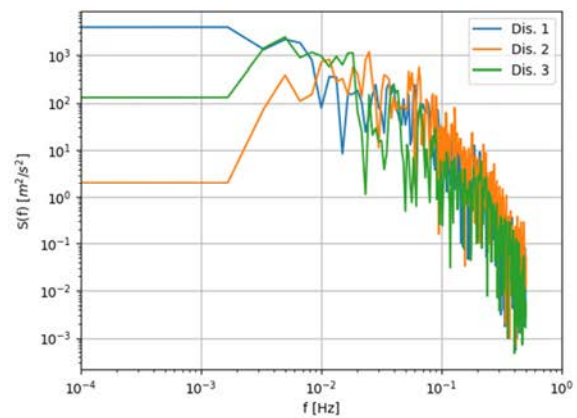


Fig. 3.8. Spectrul de putere al vitezei vântului
Z=32,8 m – structura S2

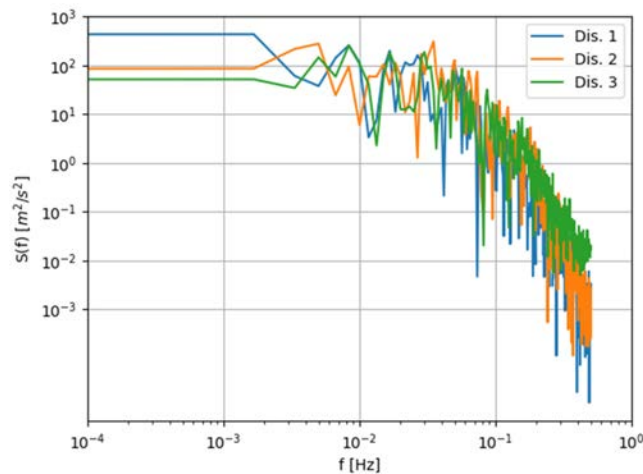


Fig. 3.9. Spectrul de putere al vitezei vântului, Z=32,8 m-structura S3

Între cele trei discretizări se pot observa diferențe ale intensității turbulenței de 8% în cazul structurii S1, 4% în cazul structurii S2, 10% în cazul structurii S3. Suprapunerea spectrelor de putere indică diferențe acceptabile între Dis. 1 și Dis. 2 în cazul structurilor S1 și S2, și între Dis. 2 și Dis. 3 în cazul structurii S3.

Scopul lucrării, acela de a studia comportarea structurilor metalice la acțiunea dinamică a vântului, îngăduie autorului să considere acceptabile diferențele de valori ale parametrilor expuși, $I_v(z)$, $S(f)$ și să utilizeze în modelare Discretizarea 2.

3.2.7. Alegerea modelului de turbulență

În ingineria vântului, cele mai utilizate modele de analiză a curgerii turbulente sunt cele cuprinse în familia RANS. Modelul $k - \omega SST$ este considerat a fi eficient într-o mare varietate de aplicații de dinamica fluidelor, inclusiv în ingineria vântului și mai ales în cazul curgerii în jurul ostacolelor cu margini ascuțite [68-70]. Analizele curgerii vântului în jurul celor trei structuri amintite mai sus au fost conduse în Programul comercial *ANSYS R17.0-FLUENT* cu modelul de generare a turbulențelor $k - \omega SST$.

3.2.8. Rezultatele analizei curgerii vântului

Analizele efectuate relevă faptul că o viteză constantă a vântului de 35 m/s, o dispunere a clădirilor ca în Fig. 3.3. și o rugozitate echivalentă cu a unui amplasament de categoria III, produc o curgere turbulentă. Turbulența vântului este ilustrată grafic în Fig. 3.10 și Fig. 3.11.

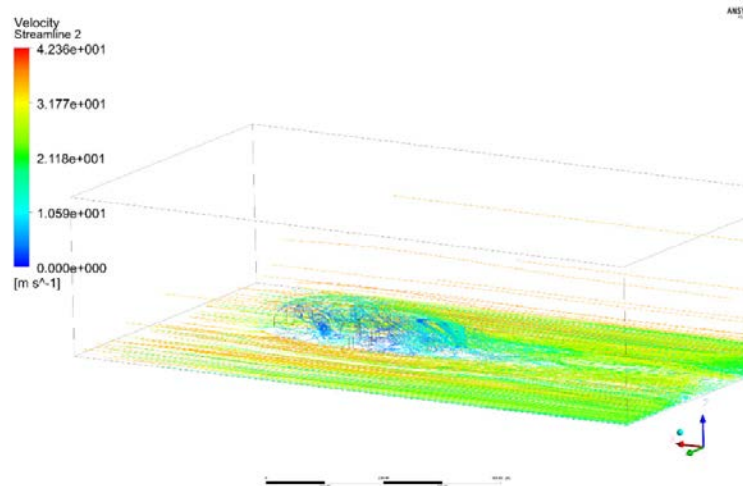


Fig. 3.10. Vedere tridimensională a vitezei curenților de aer-structura S1

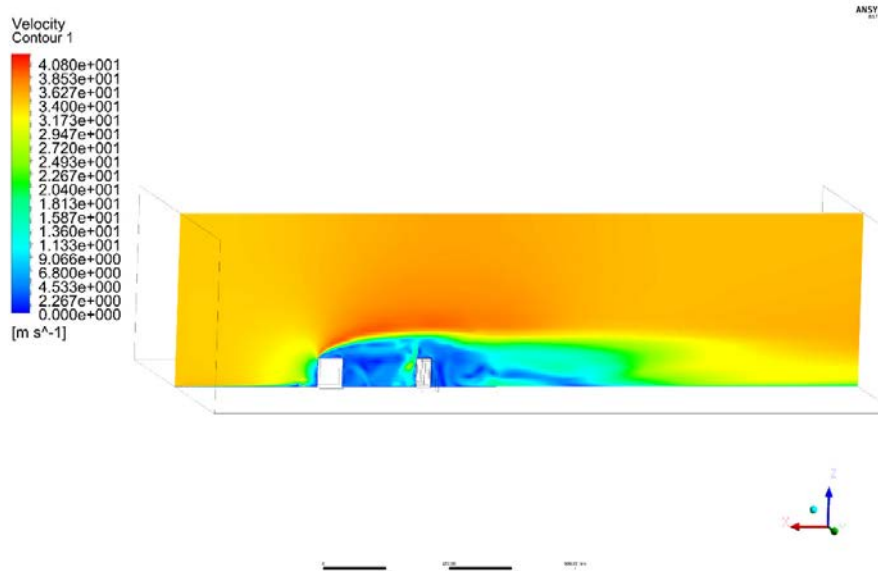


Fig. 3.11. Variația vitezei vântului în jurul obstacolelor-structura S1

O dovadă a creării turbulențelor în proximitatea structurilor studiate este prezentată în Fig. 3.12, Fig. 3.13 și Fig. 3.14 sub forma variației vitezei vântului. Viteza este înregistrată într-un punct situat la 1,0 m în fața structurii și înălțimea de 22 m.

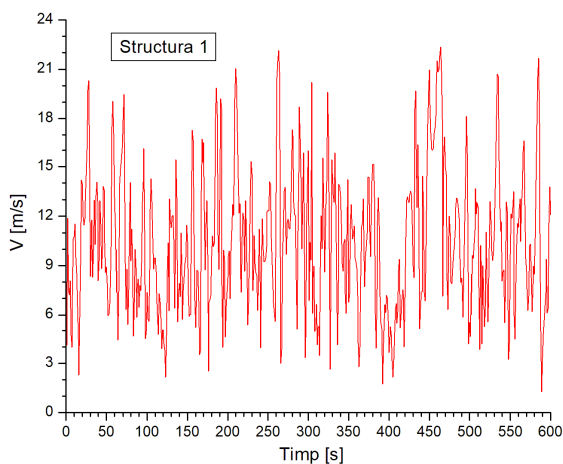


Fig. 3.12. Variația vitezei vântului,
Z=22m-structura S1

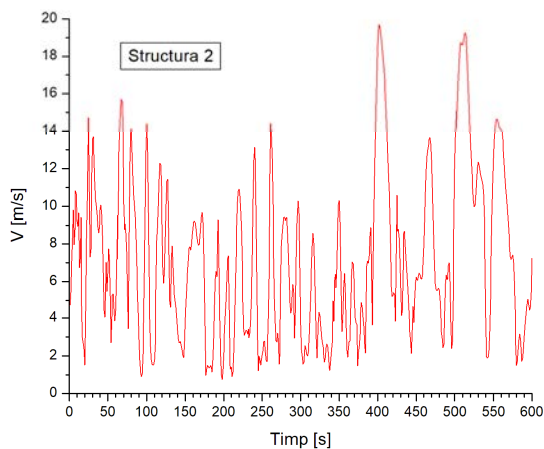


Fig. 3.13. Variația vitezei vântului,
Z=22m-structura S2

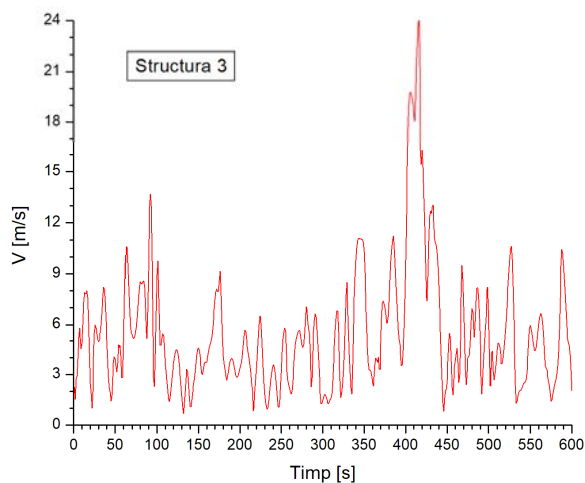


Fig. 3.14. Variația vitezei vântului, Z=22m-structura S3

Viteza vântului este prezentată în valoare absolută, cu valori ce exprimă mărimea vectorului viteză \vec{V} .

$$\vec{V} = V_x \vec{i} + V_y \vec{j} + V_z \vec{k} \quad (3.9)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (3.10)$$

Variația presiunii pe suprafețele expuse vântului este prezentată în Fig. 3.15, Fig. 3.16 și Fig. 3.17. Se poate observa că acțiunea vântului turbulent produce atât presiune cât și sucțiune pe fețele expuse.

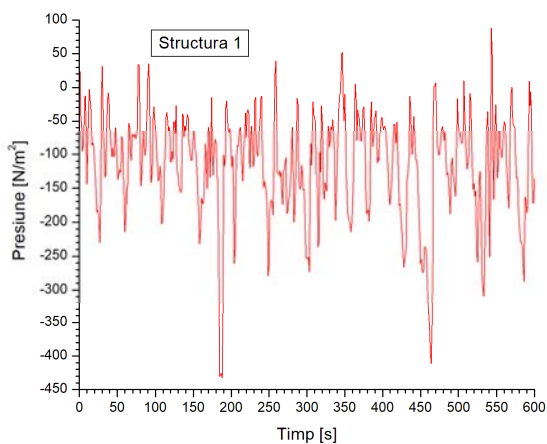


Fig. 3.15. Variația presiunii pe fața expusă, Z=22m-structura S1

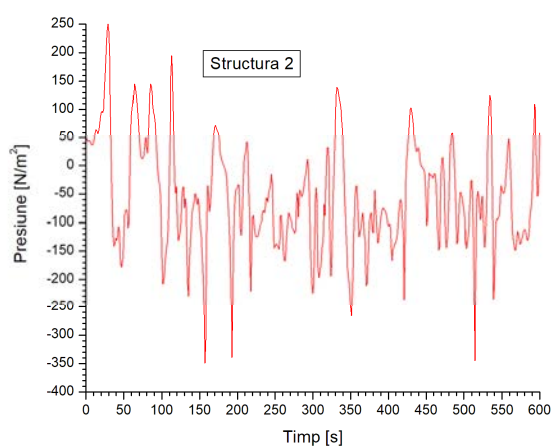


Fig. 3.16. Variația presiunii pe fața expusă, Z=22m-structura S2

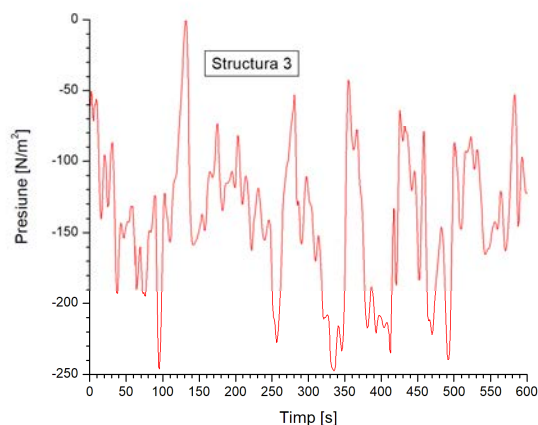


Fig. 3.17. Variația presiunii pe fața expusă, Z=22m-structura S3

Valorile vitezei prezentate în Fig. 3.12-Fig. 3.14 nu surprind schimbarea sensului de acțiune a vântului. În Fig. 3.18 este prezentată componenta scalară V_x , a vectorului viteză \bar{V} , ce surprinde și variația sensului de curgere a maselor de aer în direcția longitudinală a domeniului de calcul.

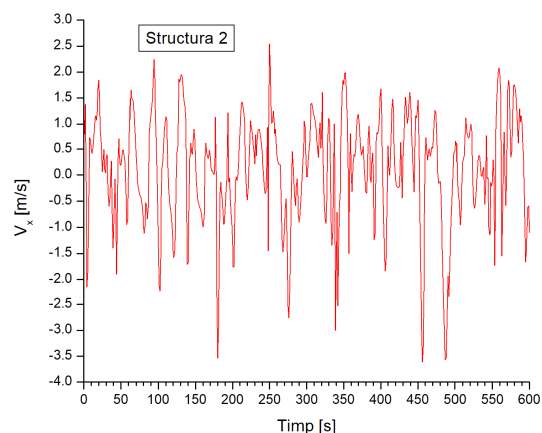


Fig. 3.18. Variația componentei V_x , Z=22m-structura S2

Suprafețele neexpuse direcției de acțiune a vântului sunt supuse exclusiv sucțiunii Fig. 3.19, Fig. 3.20, Fig. 3.21.

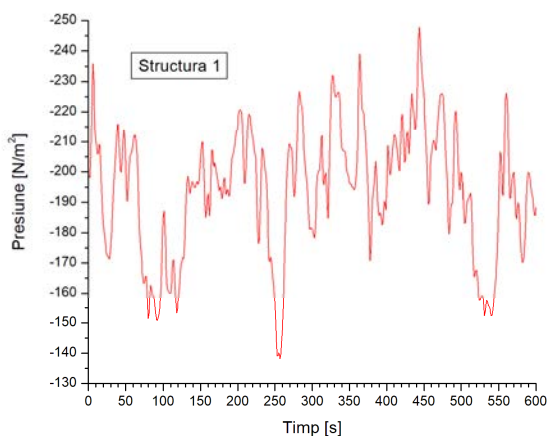


Fig. 3.19. Variația presiunii pe fața neexpusă, Z=22m-structura S1

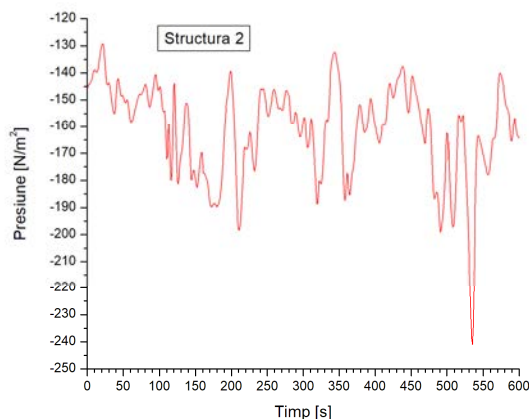


Fig. 3.20. Variația presiunii pe fața neexpusă, Z=22m-structura S2

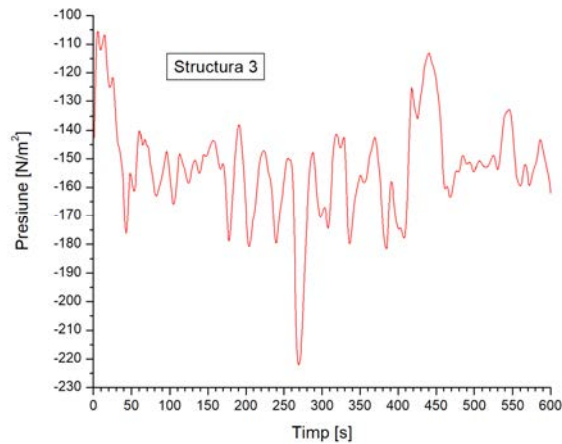


Fig. 3.21. Variația presiunii pe fața neexpusă, Z=22m-structura S3

Frecvența cu care viteza vântului variază în timp, puterea variației, este redată cu ajutorul densității spectrale. În ingineria vântului, densitatea spectrală de putere a turbulențelor este descrisă matematic sub mai multe forme, de către mai mulți autori [71-73] și modelează variația vântului natural la diferite înălțimi deasupra terenului și în diferite zone de rugozitate. Spectrul de putere [74] al vitezei vântului generat în proximitatea Structurii 1 este prezentat în Fig. 3.22, în comparație cu spectrul vântului natural propus de Kaimal [75]. Spectrul teoretic este adaptat la condițiile modelate în domeniul de calcul: $z = 22$ m, înălțimea la care este înregistrată viteza; înălțimea de rugozitate $Z_0=3,0$ m - rugozitate asociată unei zone urbane [12].

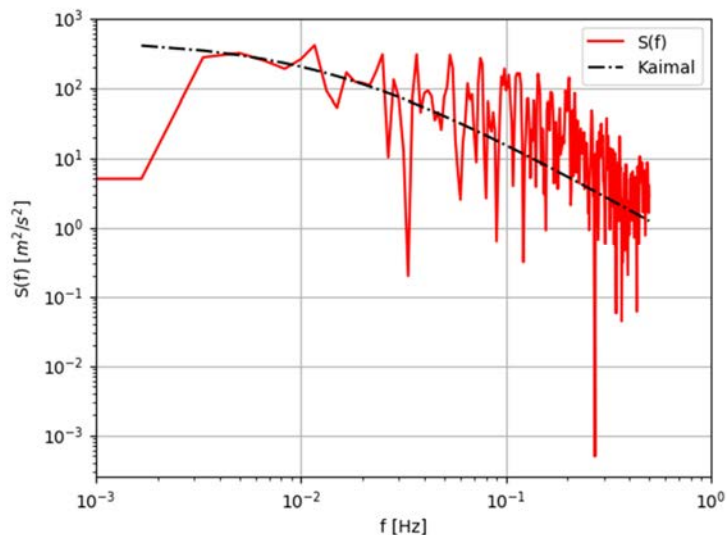


Fig. 3.22. Spectrul de putere al variației vitezei vântului, Z=22m-structura S1

Se poate observa o bună corelare între vântul generat și vântul natural pe palierul de frecvențe cuprins între 0,001 Hz și 1,0 Hz.

3.3. Validarea modelului matematic în tunelul de vânt

Reproducerea experimentală a turbulențelor în tunele de vânt implică reducerea la scară a mediului natural. Rugozitatea terenului, mediul construit în cazul Ingineriei Civile, este reprodusă la scări cuprinse între 1:200 și 1:3000 [76]. Dimensiunile geometrice ale modelelor testate sunt condiționate de dimensiunea secțiunii transversale a tunelului de vânt. Pentru a evita distorsionarea curgerii maselor de aer, închise între pereții tunelului de vânt, este recomandat în literatura de specialitate [77, 78] ca raportul dintre proiecția suprafețelor modelului testat și suprafața secțiunii transversale a tunelului de vânt să nu depășească 10%.

3.3.1 Descrierea testelor efectuate

Reproducerea experimentală a stratului limită atmosferic modelat matematic în tunelul virtual de vânt s-a realizat pentru structura S1. Scopul testelor efectuate pe o machetă scara 1:857, este de a confirma generarea turbulențelor pe configurația plană și spațială a structurii S1. Testele au fost realizate în tunelul de vânt deschis *Gunt HM 170* (Fig. 3.23) pe o machetă realizată din material plastic prin imprimare 3D (Fig. 3.24). Dimensiunile interioare ale tunelului de vânt și ale machetei sunt prezentate în Fig. 3.25.



(1) Intrare aer, (2) Ieșire aer, (3) Macheta,
(4) Anemometru și barometru digital, (5) Afișaj
Fig. 3.23. Tunelul de vânt deschis *Gunt HM 170*

Piesele componente ale machetei, structura studiată și celelalte forme prismatice au rolul de a simula rugozitatea mediului înconjurător.

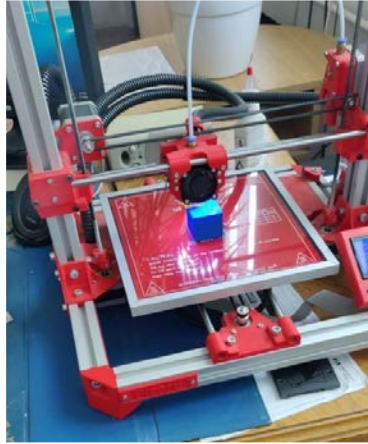


Fig. 3.24. Procesul de imprimare a machetei

Raportul procentual dintre proiecția suprafețelor modelului testat și suprafața secțiunii transversale a tunelului de vânt (292 mm x 292 mm) este de 6.8%. Variabilele măsurate sunt viteza vântului și presiunea diferențială generată de vânt. Presiunea a fost măsurată pe fața expusă vântului, la jumătatea înălțimii structurii studiate. Variația vitezei a fost preluată în aceeași poziție cu presiunea dar la un decalaj de 3 mm față de latura expusă vântului. Transmiterea vitezei și a presiunii la instrumentele digitale de măsură încorporate în (5) se realizează cu ajutorul unor tuburi flexibile cu diametrul de 3 mm (Fig. 3.26).

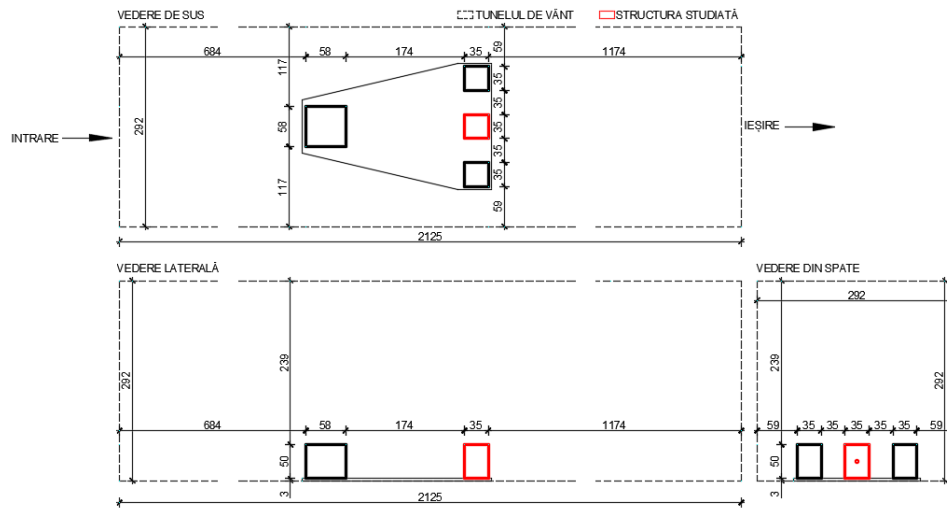


Fig. 3.25. Schema geometrică a tunelului de vânt și a machetei

Instrumentele de măsură cu care este dotat tunelul de vânt sunt capabile să afișeze variabilele măsurate dar nu au capacitatea de a le salva. Pentru salvarea datelor afișate s-a folosit o cameră de filmare/fotografiere capabilă să înregistreze până la 70 de imagini/secundă (Fig. 3.27).

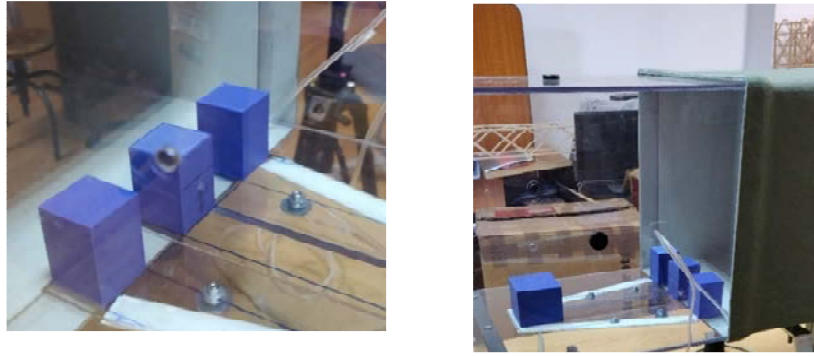
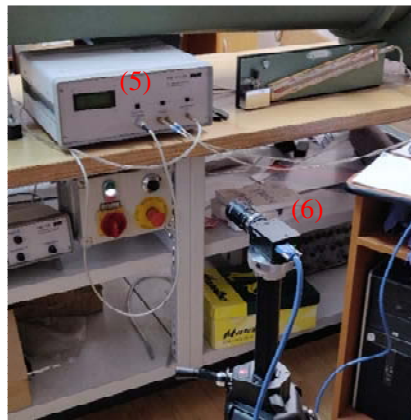


Fig. 3.26. Transmiterea vitezei vântului și a presiunii

Variația vitezei și a presiunii a fost înregistrată la o frecvență de o variație/secundă (1Hz) prin fotografierea afișajului digital (5). O parte a variațiilor surprinse sunt prezentate în Fig. 3.28, Fig. 3.29.



(5) Afișaj
(6) Cameră foto

Fig. 3.27. Preluarea variației vitezei și a presiunii

Înregistrarea datelor (viteză și presiune diferențială) a fost efectuată pe o durată de 600 s la o intensitate de 10 m/s a vitezei de intrare. Pentru a surprinde cât mai aproape de realitate variația presiunii, barometrul digital a fost configurat astfel încât să măsoare diferența dintre presiunea din afara zonei de influență a machetei, punctul A și presiunea de stagnare din punctul B, situat pe fața expusă a structurii studiate (Fig. 3.30).



Fig. 3.28. Variația presiunii. a) sec. 23, b) sec. 24, c) sec. 25



a)

b)

c)

Fig. 3.29. Variația vitezei. a) sec. 09, b) sec. 10, c) sec. 11

În punctul A a fost setată presiunea de referință iar în punctul B a fost măsurată variația presiunii diferențiale.

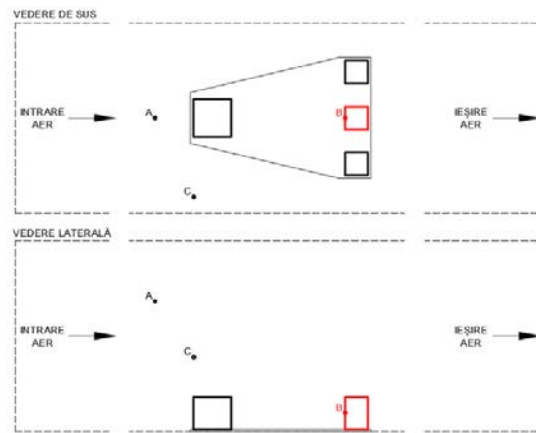


Fig. 3.30. Poziția punctelor de măsurare a presiunii

3.3.2. Rezultatele testelor efectuate

Parametrul care dictează curgerea turbulentă sau laminară, numărul Reynolds

$$R_e = \frac{v \cdot D}{\vartheta} \quad (3.11)$$

este imposibil de reprodus în tunelele de vânt. Dacă, în modelul matematic, pentru viteza de intrare de $v = 35 \text{ m/s}$, dimensiunea blocajului $D = 50 \text{ m}$ și vâscozitatea cinematică a aerului $\vartheta = 1.48 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ rezultă $R_e = 1.182 \cdot 10^8$, pentru a recrea același R_e în tunelul de vânt ar fi nevoie de o viteză de intrare $v = 3 \cdot 10^4 \text{ m/s}$, imposibil de realizat. Dimensiunile relativ reduse ale tunelului de vânt au impus efectuarea determinărilor la o viteză de intrare de 10 m/s astfel încât să nu se producă accelerarea artificială a vântului. Configurația structurilor, prezentată în Fig. 3.25., supusă acțiunii vântului cu viteza de 10 m/s , este capabilă să producă o viteză variabilă (Fig. 3.31) în proximitatea structurii studiate și, implicit, o presiune variabilă (Fig. 3.32) pe fața expusă vântului.

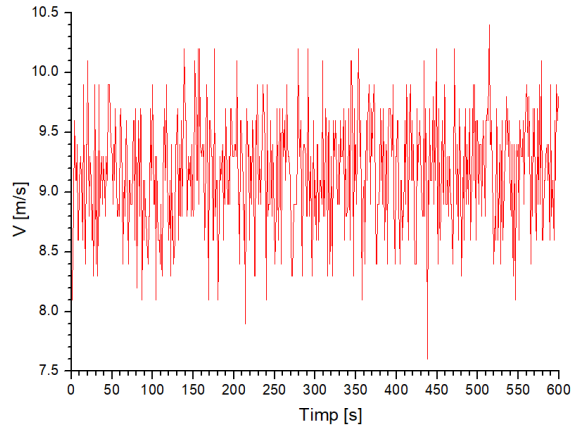


Fig. 3.31. Viteza vântului măsurată în proximitatea punctului B

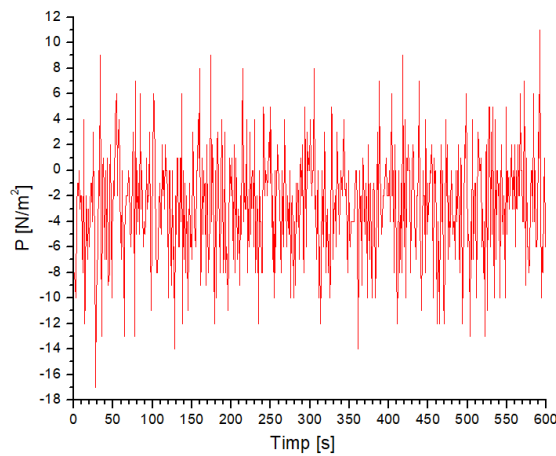


Fig. 3.32. Presiunea măsurată în punctul B

Parametrii care definesc turbulența vântului, intensitatea turbulenței și puterea variației, nu pot fi comparați între modelul matematic și modelul experimental, deoarece acești parametri nu pot fi reprodusi la scara modelului, scară impusă de dimensiunile tunelului de vânt. Având în vedere dificultatea modelării turbulenței și a intensității acesteia în tuneluri cu dimensiuni reduse, autorul a optat pentru determinarea și compararea valorilor coeficientului de presiune maxim pozitiv. Presiunea măsurată, în centrul feței expuse vântului, atât pe modelul matematic cât și pe modelul experimental, a fost transformată în coeficient de presiune C_p . Coeficientul de presiune este evaluat ca raport între presiunea diferențială măsurată și presiunea dinamică generată de viteza vântului în afara zonei de influență a structurilor [79],

$$C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2} \quad (3.12)$$

unde P_{max} reprezintă valoarea maxim pozitivă a presiunii diferențiale, V este viteza de curgere liberă a maselor de aer iar $\rho = 1,25 \frac{kg}{m^3}$ este densitatea aerului standard. În tunelul de vânt, presiunea maxim pozitivă P_{maxT} a fost măsurată în punctul B, iar presiunea dinamică a fost calculată cu viteza V_T preluată în punctul C (Fig. 3.30). În

modelul matematic, pozițiile de evaluare a presiunii maxim pozitive P_{maxM} , respectiv a vitezei de curgere liberă a vântului V_M , sunt marcate în Fig. 3.33.

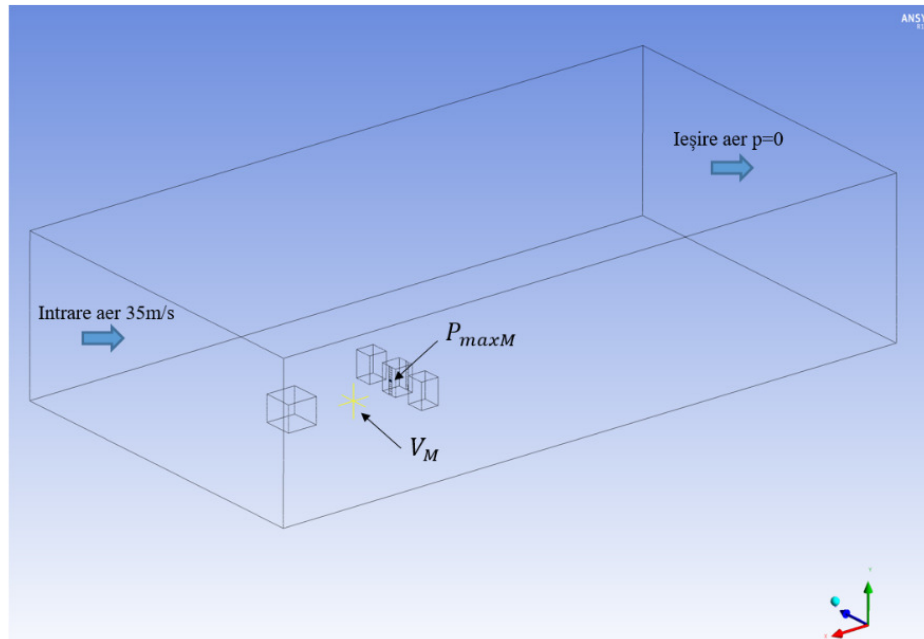


Fig. 3.33. Poziția de preluare P_{maxM} , V_M

Coeficienții de presiune, evaluați cu datele obținute în tunelul de vânt, respectiv, în modelul matematic, sunt prezentați în Tab. 3.2.

Tunel de vânt			Model matematic		
P_{maxT}	V_T	ρ	P_{maxM}	V_M	ρ
88,14 N/m ²	35,80 m/s	1,25 kg/m ³	11,00 N/m ²	13,00 m/s	1,25 kg/m ³
$C_{pT} = 0,110$			$C_{pM} = 0,107$		

Tab. 3.2. Evaluarea coeficienților de presiune

Se constată o diferență de circa 2.7% între valorile măsurate și cele calculate.

4. Amortizare inerentă și amortizare adăugată în răspunsul la vânt

Considerarea efectului dinamic al acțiunii vântului este implicit conectată cu luarea în considerare a fenomenului dual al mișcării - amortizarea acestuia. Într-adevăr, acele fenomene duale (mișcarea ca fenomen opus repausului) și amortizarea (ca fenomen opus mișcării) trebuie să fie implicate simultan în analizele structurale pentru o modelare cât mai fidelă atât a cauzei cât și a efectului. Mișcarea și amortizarea sunt fenomene legate indisolubil și Mecanica - abordată ca știință a mișcării - nu poate face abstracție de componenta amortizare. Mai mult, dacă mișcarea este „evitabilă” (prin lipsa, de exemplu, a cauzelor care o generează), amortizarea - fenomenul dual al mișcării - este inevitabilă. O mișcare fără amortizare ar fi perpetuă și legile mișcării nu ar fi valide. Amortizarea - prin faptul că „însoțește” mișcarea, conduce la evitarea haosului generat de mișcări perpetue. Legile mișcării (și nu doar cele ale Mecanicii clasice - Newtoniene) care guvernează mișcarea mecanică sunt - de multe ori - prezentate / aplicate în absența amortizării din motive de studiu („de la simplu la complicat”), de abordare simplistă. Într-o analiză a răspunsului dinamic, se impune introducerea amortizării atât în modelul mecanic cât și în cel matematic alături de „cauzele” mișcării (forțe - în general). Dar, inevitabilitatea fenomenului de amortizare - privit ca fenomen opus mișcării - este doar un aspect al acestui fenomen. Un alt aspect al fenomenului de amortizare este ireversibilitatea. Ireversibilitatea este caracteristică fenomenului de amortizare care ajută trecerea - aproape pe neobservate - de la fenomenul amortizării la conceptul de disipare a energiei mecanice care se dezvoltă în timpul mișcării mecanice. Aspectul de ireversibilitate nu cuprinde, în acest moment al studiului și al tratării amortizării în analize structurale, diferitele procedee și tehnici de „recuperare” a energiei mecanice pierdute prin frânare etc. și de reintroducere a acestei energii în sistemul mecanic. Dar, asocierea mișcării cu energia este - de asemenea - un pas înspre asocierea amortizării cu energia. Dacă generarea energiei prin mișcarea mecanică (și prin deformarea structurală - în cazul Ingineriei Civile) este un fapt pe cât de popular pe atât de studiat, asocierea amortizării cu energia este un proces mai puțin aprofundat dar necesar în înțelegerea bilanțului energetic al unei structuri în mișcare (de vibrație, de exemplu) și, mai general, în modelarea matematică a stării energetice a unei structuri acționată dinamic.

Studiul răspunsului dinamic al structurilor specifice Ingineriei Civile ținând seama de fenomenul de amortizare al vibrațiilor generate evidențiază faptul că amortizarea este un dar al naturii făcut ingineriei. Astfel că abordarea amortizării în modelarea și analiza structurală este o îndatorire a profesiei și nu doar un cost suplimentar plătit pentru o analiză mai rafinată. Considerarea simultană a celor două aspecte (de mișcare și de amortizare) ale comportării unei structuri acționate dinamic poate fi abordată fie la nivelul stării mecanice clasice (înțeleasă ca fiind formată din starea statică - de echilibru și, respectiv starea cinematică - de compatibilitate), fie la nivelul stării mecanice augmentate cu starea energetică (ecuația de bilanț energetic) asociată. Extinderea conceptului de stare mecanică prin includerea stării energetice conduce la un instrument de modelare analitică a răspunsului dinamic al structurilor acționate de vânt mai complet

și mai eficient prin includerea atât a cauzelor mișcării cât și a cauzelor încetării stării de mișcare.

4.1. Mecanismele amortizării structurilor

Mecanismele unui sistem dinamic care generează amortizarea vibrațiilor, deci disiparea energiei induse de acțiunea dinamică în structură sunt complexe și chiar necunoscute într-o anumită măsură. Referitor la amortizarea inerentă prezentă în structura, materialul și proprietățile sale la nivel molecular precum și frecarea în legăturile dintre elementele componente (structurale și nestructurale) sunt parametrii responsabili pentru generarea amortizării. Aceleași cauze a amortizării sunt responsabile și pentru existența mai multor tipuri de amortizare. Dacă existența și cauzele amortizării sunt fenomene simple de explicat și de admis, includerea amortizării în analiza dinamică a structurii este un proces dificil prin necesitatea modelării analitice și prin rezolvarea numerică a modelelor analitice asociate amortizării. În cazul structurilor de tip multietajat din oțel, un anumit tip de amortizare este, de obicei, predominant, ceea ce face posibilă abordarea analizei structurale într-un mod simplu și cu rezultate acceptabile din punctul de vedere al gradului de acuratețe.

Mecanismele interne dintr-o structură care generează amortizare sunt următoarele:

- Materialul component al structurii. Acest factor generează *amortizarea internă* (sau *materială*). Amortizarea materială (generată la nivelul structurii atomice / moleculare a materialului (oțel, lemn, beton, etc.) se datorează efectului termic și frecării intermoleculare care este asociat solicitărilor ciclice de deformare a unui element structural sau nestructural. Micro-defectele structurale (cum sunt impuritățile în structura materialului sau distribuțiile neuniforme de eforturi și / sau deformații) generează acest tip de amortizare.
- Zonele de conectare ale elementelor (structurale și nestructurale) prin frecările dintre elementele îmbinate și dintre elemente și organele de conectare (șuruburi).
- Degradările elementelor componente ale unei construcții, dar și în zona de interfață a unei microfisuri (prin frecarea care însoțește mișcările repetate de deschidere și închidere a acestora). Degradările („articulațiile plastice”, de exemplu) elementelor componente (structurale și nestructurale) contribuie masiv la generarea acestui tip de amortizare.

Amortizarea generată prin aceste mecanisme este *amortizarea structurală*.

O altă sursă de amortizare prezentă în mișcarea indusă a structurii este *amortizarea fluidă*. Amortizarea de tip fluid generată de interacțiunea (mai ales prin frecare) dintre sistemul material și mediul în care acesta se mișcă / vibrează (interacțiunea teren – structură, interacțiunea structurii cu alte structuri).

În următorul rând, o altă sursă de amortizare este cea suplimentară generată prin dispozitive mecanice, magnetice, electrice exterioare sistemului structural cărui i se aplică. Acestea creează o *amortizare suplimentară sau adăugată* cu scopul reducerii răspunsului dinamic al structurii.

Cele trei tipuri de amortizare (amortizarea materială, amortizarea structurală și amortizarea fluidă generată de interacțiunea teren – structură) sunt fenomene naturale inerente oricărui sistem mecanic în mișcare vibratorie și, implicit, structurilor de construcții.

Amortizarea de tip fluid poate fi naturală sau suplimentară (artificială). Amortizarea suplimentară (sau adăugată) este întotdeauna o amortizare artificială.

În general, tipurile de amortizare de mai sus pot fi prezente în mod singular sau pot fi asociate în aceeași structură. Amortizarea internă - totalmente naturală - poate fi însoțită de cea fluidă (care poate fi „naturală” sau suplimentară / adăugată în timp ce, amortizarea suplimentară este asociată cu unul sau cu mai multe tipuri de amortizare naturală.

4.2. Modelarea mecanică și analitică a amortizării inerente

În analizele structurale se întâlnesc mai multe aspecte asociate comportării structurii și care trebuie modelate analitic: starea elastică a structurii (exprimată fie prin starea de rigiditate fie prin cea de flexibilitate), starea de inerție a structurii, starea de solicitare. Referitor la amortizare, și această stare necesită o modelare analitică adecvată aparatului matematic prin care sunt abordate celelalte stări. Modelarea amortizării este un proces conceptual (asociat substituirii fenomenului cu unul din parametri existenți prin care au fost substituite celelalte stări - de exemplu, cu forțe) dificilă și complexă din punct de vedere matematic (prin necesitatea exprimării fenomenului ca o funcție care include și parametri constanți). Dificultatea modelării amortizării – spre deosebire, de exemplu, de modelarea inerției sau a flexibilității / rigidității unei structuri (a unui model mecanic structural) – este conferită de faptul că *amortizarea este un fenomen* în timp ce proprietățile inerțiale sau elastice ale unei structuri sunt conferite de geometria (generală și secțională), de material, de conexiuni, de încărcări. Complexitatea modelării amortizării se datorează și cauzelor / mecanismelor care generează amortizarea. Mecanismele care generează amortizarea conduc la complicații în modelarea fenomenului (natura acestor mecanisme se întinde de la o simplă teorie a frecării uscate la complexe teorii moleculare). În schimb, echivalarea fenomenului de amortizare cu efectele sale (reducerea valorilor parametrilor cinematici ai mișcării de vibrație și a duratei mișcării) permite folosirea echivalenței dintre amortizarea ca fenomen și fenomenul de disipare a energiei care generează (energie de input) sau care însoțesc mișcarea de vibrație (energia de deformație, energia cinetică). Și amortizarea și disiparea energiei de input au, în fond, același efect mecanic de reducere a mișcării de vibrație. Această identitate a fenomenelor de amortizare a mișcării de vibrație și de disipare a energiei mecanice care generează vibrația simplifică modelarea mecanică și analitică a fenomenului de amortizare. Într-adevăr, înlocuirea conceptului de amortizare cu cel de disipare a energiei permite utilizarea conceptelor Mecanicii clasice (timp, mase, forțe, deplasări, viteze, accelerații, eforturi, deformații), aceleași ca în cazul definirii și calculării energiei (concept al Mecanicii), în modelarea amortizării. Mai mult, trecerea de la fenomenul de amortizare la conceptul de energie permite folosirea mărimilor / parametrilor scalari foarte adecvați operației de cumulare în timp a energiei.

Prin asocierea naturii (tipului) amortizării cu procesul de disipare a energiei (de input care generează vibrația) se ajunge la modele mecanice și matematice existente și general acceptate în teoria comportării dinamice a structurilor / construcțiilor solicitate dinamic. Mișcarea de vibrație amortizată a fost pe larg studiată atât experimental cât și teoretic și, ca urmare, o serie de parametri și de „reguli” trebuie luate în considerare. Printre acești parametri și printre aceste reguli, următoarele trebuie asociate mișcării amortizate [80-82]:

- Amortizarea generează o reducere a mișcării (a amplitudinilor și a duratei acesteia) deci, trebuie să i se atribuie caracterul de forță opusă mișcării. Acestea sunt „forțele de amortizare”.
- S-a constatat că mișcarea amortizată generată de forțe armonice este o mișcare pseudo - armonică - cel puțin în faza de mișcare în regim stabilizat. Rezultă că forțele care se opun mișcării – forțele de amortizare - au, și ele, o natură (pseudo-armonică).
- O altă constatare este că mecanismele generatoare de amortizare sunt profund neliniare. Forțele de amortizare trebuie să reflecte în expresiile lor această natură neliniară a fenomenului de amortizare.
- Un ultim considerent, pur teoretic, care nu rezultă din studiul experimental al mișcării amortizate dar care are multă aplicabilitate practică este cel legat de forma matematică a „forțelor de amortizare”. Aceste forțe trebuie să aibă o formă care să se încadreze în ecuația (diferențială, în acest caz) a mișcării de vibrație sau, în general, în modelul matematic al mișcării de vibrație.

4.2.1. Amortizarea liniar - vâscoasă

În acest tip de amortizare, forța de amortizare este proporțională cu viteza mișcării vibratorii și depinde de materialul (beton, oțel, lemn etc.) din care este confecționată structura.

Rezultă, următoarele reprezentări analitice ale amortizării liniar vâscoase:

Cazul sistemelor cu un grad de libertate

Forța de amortizare are expresia:

$$F_a = c \cdot \dot{u}(t) \quad (4.1)$$

Cazul amortizării liniar vâscoase a sistemelor dinamice cu un singur grad de libertate este cel mai simplu și cel mai tratat caz în literatura de specialitate. Modelarea liniară simplă de mai sus a amortizării vâscoase permite introducerea parametrilor și a noțiunilor fundamentale asociate amortizării vâscoase [83-86]:

- Constanta de amortizare sau de proporționalitate c
- Constanta de amortizare critică

$$c_{cr} = 2 \cdot m \cdot \omega \quad (4.2)$$

- Coeficientul de amortizare

$$\beta = \frac{c}{2 \cdot m} \quad (4.3)$$

- Frațiunea de amortizare critică

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{\beta}{\omega} \quad (4.4)$$

Aici, viteza unghiulară sau frecvența circulară a mișcării (de vibrație liberă ne-amortizată) are expresia

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.5)$$

Valoarea critică c_{cr} a amortizării liniar - vâscoase este o limită: pentru $c < c_{cr}$, mișcarea masei păstrează caracterul vibratoriu, iar pentru $c > c_{cr}$, mișcarea nu mai este vibratorie. În termeni de coeficient de amortizare β , caracterul pseudoarmonic al vibrațiilor se conservă pentru valori mici ($\beta < \omega$) ale coeficientului de amortizare. Valorile mari ale parametrului β ($\beta > \omega$) schimbă radical variația în timp a mișcării, care devine nearmonică. Valoarea β_{cr} critică a parametrului β asociată amortizării liniar vâscoase corespunde situației $\beta = \omega$ și „desparte” vibrațiile pseudo- armonice de cele total nearmonice.

O viitoare și necesară comparație a rezultatelor analitice și numerice asociate răspunsului dinamic din vânt în cazul diferitelor niveluri de amortizare (adăugată), implică introducerea unei prezentări a calculului răspunsului dinamic al unui sistem dinamic cu un grad de libertate cu amortizare liniar vâscoasă (Fig. 4.1).

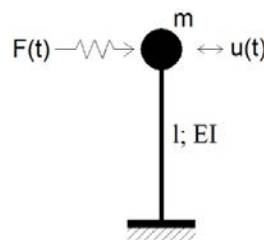


Fig. 4.1 – Sistem dinamic cu un grad de libertate

Analiza evidențiază rolul amortizării liniar vâscoase în răspunsul dinamic al sistemelor cu un grad de libertate, considerând exemplul simplu (Fig. 4.1) în două situații: vibrații neamortizate și vibrații amortizate $\zeta = 5\%$.

Modelul dinamic: $l=3,00$ m; $EI = 7.755 \cdot 10^3$ kNm²; $m = 3,67$ kNs²/m; $F_0 = 10,0$ kN; $F(t) = F_0 \cdot \sin \Omega t$; $\Omega = 10,47$ s⁻¹. Rezultatele sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Frecvența circulară proprie	$\omega = 14,7623$ s ⁻¹	$\omega^* = 14,7438$ s ⁻¹
Perioada proprie	$T = 0,4256$ s	$T^* = 0,4261$ s
Amplitudinea u_{\max}	$u_{\max} = 4,36$ cm	$u^*_{\max} = 3,50$ cm

Tabel 4.1. Răspunsul dinamic al sistemului cu un grad de libertate

Se constată o diferență între frecvența proprie a sistemului neamortizat (ω) și cea a sistemului amortizat (ω^*) de numai 0,125% și o diferență de 0,117% între perioadele proprii T și, respectiv T^* . În schimb, amplitudinile u_{\max} și u^*_{\max} diferă între ele dramatic $u_{\max} = 4,36$ cm, iar $u^*_{\max} = 3,50$ cm ceea ce reprezintă o diferență de 24,57%.

Conservarea frecvenței și a perioadei proprii de vibrație în cazul vibrațiilor libere, cu și fără amortizare liniar vâscoasă, justifică neglijarea amortizării în calculul parametrilor modali, în timp ce în calculul răspunsului dinamic este necesară considerarea amortizării. Aceste specificități aduse de amortizarea liniar vâscoasă vor avea consecințe relevante în calculul răspunsului dinamic la acțiunea vântului.

Fracțiunea de amortizare critică ζ este un alt parametru relevant adus de amortizarea liniar vâscoasă în analiza dinamică a structurilor. În majoritatea analizelor dinamice efectuate asupra structurilor în cadre multietajate din oțel, se consideră valoarea $\zeta = 5\%$. Valorile fracțiunii de amortizare critică nu pot fi riguros determinate. Proprietățile de amortizare depind de aspecte precum tipul de îmbinare a elementelor, frecarea din îmbinări, apariția fisurilor, plastificarea unor zone etc. și pot fi doar approximate. În cazul structurilor multietajate din oțel, literatura de specialitate recomandă valori ale fracțiunii de amortizare critică cuprinse între 2% (pentru îmbinări sudate) și 15% (pentru îmbinări cu șuruburi) [87, 88]. În practică, la proiectarea structurilor din oțel se folosesc valori de la 0,5% până la 7% ale fracțiunii de amortizare critică ζ conform Tab. 4.2 [89].

Țara / codul de proiectare	Solicitarea / starea limită	Tipul structural / modul de îmbinare a elementelor structurale componente	Valoarea fracțiunii de amortizare critică ζ %
Australia AS1170.2	SLS	-	0,5 ÷ 1,0
	SLU	Îmbinări cu buloane	5,0
		Îmbinări prin sudură	2,0
China GB50191-93	-	Turnuri, antene	2,0
Franța	Gruparea fundamentală	Îmbinări cu buloane	0,8
		Îmbinări prin sudură	0,5
	Gruparea seismică	Îmbinări cu buloane	4,0
		Îmbinări cu sudură	2,0
Italia EUROCODE 1	-	-	5,0
Japonia	Gruparea fundamentală	-	1,0
	Gruparea seismică	-	2,0
Singapore	-	-	1,0
Suedia	-	-	0,9
SUA Centrale nucleare	Cutremure care permit funcționarea centralei	Îmbinări prin sudură	2,0
		Îmbinări cu buloane	4,0
	Cutremure care necesită închiderea centralei	Îmbinări prin sudură	4,0
		Îmbinări cu buloane	7,0

Tabel 4.2. Câteva valori normate ale fracțiunii de amortizare critică ζ [89]

Aceste diferențe în valorile fracțiunii de amortizare critică, conduc la rezultate care influențează răspunsul dinamic în deplasări, eforturi, accelerații. Variațiile valorilor fracțiunii de amortizare critică nu conduc la diferențe relevante ale parametrilor cinematici, perioade / frecvențe de vibrație.

4.3. Amortizare adăugată

Amortizarea adăugată este cea mai adecvată soluție de asigurare a comportării structurii în domeniul elastic sub acțiunea încărcărilor dinamice. Sistemul de „adăugare” a amortizării se substituie secțiunilor structurale care, altfel, ar fi supuse solicitării în domeniul post-elastic. Este important de evidențiat că noțiunea de *articulație plastică* - sursa relevantă de disipare a energiei induse în structură de o acțiune dinamică - constituie o formă statică de apărare a structurii și, în același timp, o formă de cedare atât structurală cât și a proiectantului în fața acțiunii dinamice. Nici starea statică creată de formarea articulațiilor plastice și nici necesitatea reabilitării structurale (cunoscută, mai ales, ca *activitate post-seism*) în urma unor astfel de degradări structurale, nu sunt adecvate pentru disiparea energiei induse de o acțiune dinamică - vântul în acest caz. Amortizarea suplimentară / adăugată este, în schimb, în măsură să rezolve atât inconsecvența static (referitoare la răspunsul structural) - dinamic (referitoare la acțiune) cât și evitarea degradărilor structurale generate de formarea zonelor plastice. Echipamentele de introducere a unor cantități *a priori* determinate de amortizare sunt cele în care se formează zonele de plastificare - fără urmări negative asupra structurii propriu - zise.

4.3.1. Cazul creșterii fracțiunii de amortizare critică

Efectul amortizării adăugate se exprimă analitic prin creșterea valorilor fracțiunii de amortizare critică ζ peste cele clasice recomandate în activitatea de proiectare (Tab. 4.2). Echipamentele - devenite tradiționale - de încorporare a amortizării suplimentare într-o structură de tip cadre multi-etajate sunt amortizorii vâscosi (Fig. 4.3). O astfel de echipare este adecvată în protecția anti-seismică a structurilor înalte.

În cazul structurilor mai puțin înalte, soluția de protecție cu „izolatori seismici” este, în general considerată amortizare adăugată având în vedere reducerea răspunsului elastic al structurii la solicitarea seismică. Izolatorii seismici transformă deformarea elastică în mișcare de corp rigid cu consecințele favorabile ale acestui efect.

O altă modalitate de disipare a energiei induse de acțiunea dinamică este cea prin care se introduc în structură mase suplimentare / adăugate conectate adecvat de structură.

Efectul amortizării adăugate este relevant în două aspecte asociate mișcării de vibrație: reducerea amplitudinilor parametrilor cinematici (Fig. 4.2) și reducerea intervalului de timp în care aceștia se manifestă (Fig. 4.5-Fig. 4.7). Structurile la care se face referire (numite S1, S2, S3) sunt prezentate din punct de vedere al dimensiunilor geometrice, al stării mecanice și de amortizare în Cap. 6 (Fig. 6.1÷6.4).

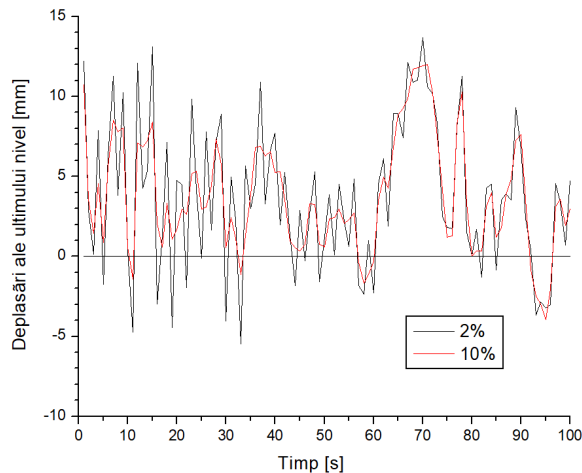


Fig. 4.2. Deplasări laterale, structura S1, vânt CFD

În cazul structurilor de construcții, amortizarea poate fi constatată și cuantificată doar prin analize dinamice care necesită, implicit, acțiuni dinamice. Amortizarea structurală reduce valorile parametrilor răspunsului dinamic (amplitudini, durate) și este prezentă în mod inerent în orice structură. Amortizarea inerentă a structurilor metalice de tip cadre rigide în execuție sudată se datorează atât materialului (oțel, în acest caz) în sine și are o valoare mai mică a fracțiunii de amortizare critică (în medie 2%) decât în cazul aceluiași structuri în execuție "cu buloane" la care amortizarea inerentă este generată atât de material cât și de frecarea din îmbinări în timpul vibrațiilor generate de acțiunea dinamică (valoarea fracțiunii de amortizare critică este, în medie, în acest caz de 5%). Echiparea cu contravântuiri a structurilor multi-etajate din oțel în scopul reducerii răspunsului la vânt, este – de fapt - o *tehnologie statică*, atât prin natura ei cât și prin abordarea tradițională, statică, a calcului răspunsului la vânt (prin metoda forțelor statice echivalente). Perpetuarea, pâna în prezent chiar, a determinării răspunsului la vânt prin analize statice (prin prevederi normative de proiectare în vigoare) este, într-un fel, în consonanță cu tehnologia statică de echipare cu contravântuiri în vederea reducerii răspunsului. Deși valorile fracțiunii de amortizare critică (2% pentru execuție sudată, 5% pentru execuție bulonată) sunt relativ mici, calculul static al răspunsului dinamic este totalmente *damping-proof*.

Amortizarea adăugată utilizată în construcții pentru reducerea răspunsului acestora la cutremur și/sau la vânt poate fi considerată prin vechimea sa o tehnologie deja clasică atât prin vechimea sa cât și prin numărul mare de aplicații la construcții devenite celebre chiar datorită echipării cu masă adăugată [90-92]. Forma secțiunii transversale este, recent, un mijloc de reducere a răspunsului la vânt a turnurilor [93]. În pofida clasicității tehnologiei de reducere a răspunsului la vânt prin amortizare adăugată, se poate spune că analiza structurală (prin valabilitatea încă actuală a metodologiei forțelor static echivalente) este mai puțin prezentă în practica de proiectare conformă cu normativele în vigoare. Așa cum s-a precizat, din punct de vedere tehnologic, reducerea răspunsului

la vânt se poate face prin echiparea cu amortizori vâscoși (Fig. 4.3) sau prin echiparea cu masă adăugată (Fig. 4.4).



Fig. 4.3. Echipare cu amortizori vâscoși [94]



Fig. 4.4. Echipare cu masă adăugată [95]

Cele două tehnologii sunt cvasi-cunoscute ca echipări pentru reducerea răspunsului seismic al structurilor prin protecție pasivă. Multe locații ale construcțiilor înalte necesită cu precădere protecție la vânt. În activitatea de proiectare a structurilor de construcții, cele două acțiuni dinamice (seismul, vântul) nu sunt luate în considerare simultan [96]. Astfel că echiparea structurii cu protecție pasivă trebuie să fie specifică acțiunii dinamice considerată predominantă. Reducerea răspunsului la vânt este, cel mai adesea, referită prin reducerea deplasărilor laterale de nivel. În cazul structurii S1 cu 12 niveluri, echipată cu amortizare adăugată sau cu masă adăugată TMD (echivalentă cu 10% din masa modală $m_1 = \Phi_1^T \cdot M \cdot \Phi_1$ asociată modului normal fundamental de vibrație al structurii [97]), acționată dinamic de vântul generat prin analize de dinamică a fluidelor (CFD), deplasarea laterală a ultimului nivel este prezentată în Fig. 4.5-Fig. 4.7. Se observă dublul efect al protecției în reducerea atât a valorilor de vârf (amplitudinilor) deplasării cât și - mai ales - în reducerea duratei stării vibratorii. Referitor la cele două efecte ale amortizării prin masă adăugată, trebuie evidențiat faptul că amplitudinile deplasărilor laterale sunt reglementate (în sensul limitării valorilor lor maxime [3]), în timp ce durata mișcării vibratorii induse nu este reglementată. În acest context efectul de reducere a duratei acestei mișcări este un aspect important atât pentru răspunsul structurii însăși cât și pentru utilizatorii acesteia.

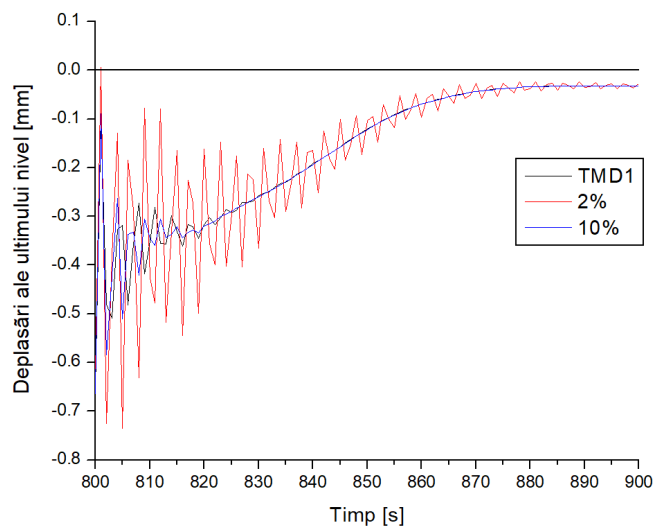


Fig. 4.5. Deplasări laterale, structura S1, vânt CFD

În ceea ce privește efectul amortizării adăugate prin cele două procedee tehnice (amortizare suplimentară sau prin masă adăugată), se constată efectul semnificativ și aproximativ similar de reducere a răspunsului la vânt exprimat atât în scăderea amplitudinilor cât și în scăderea intervalului mișcării vibratorii.

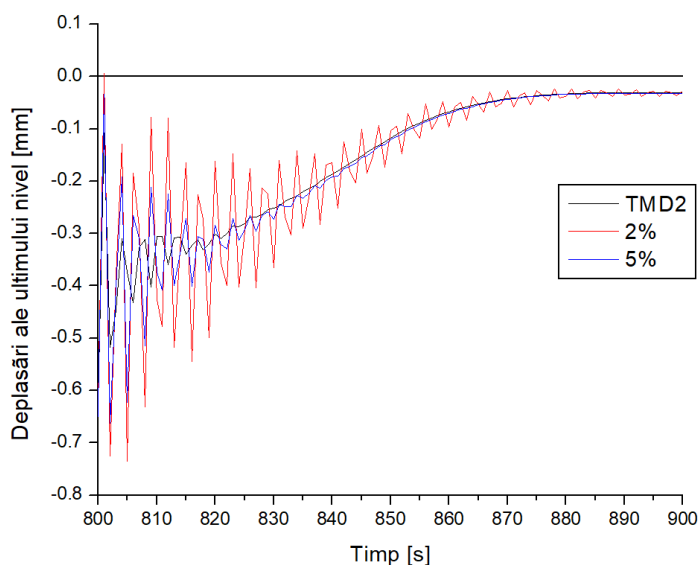


Fig. 4.6. Deplasări laterale, structura S1, vânt CFD

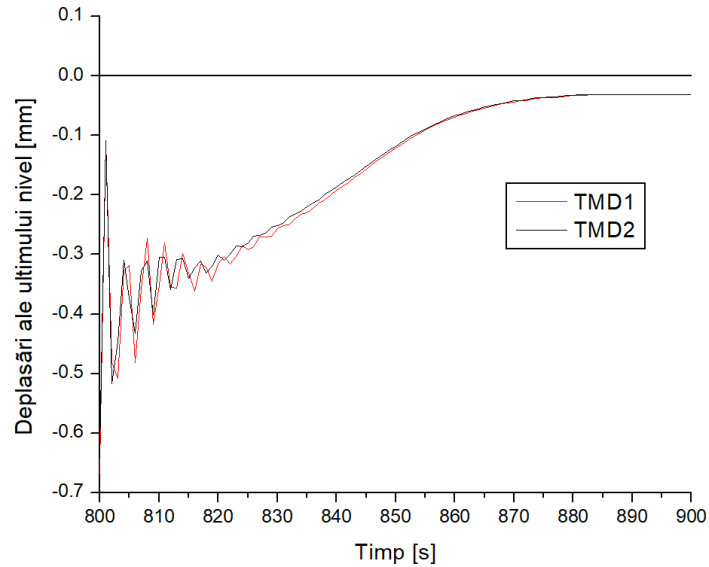


Fig. 4.7. Deplasări laterale, structura S1, vânt CFD

Percepția, nu numai cea populară ci chiar și în rândul comunităților profesionale, efectului acțiunilor dinamice asupra construcțiilor este asociată cu generarea stării cinemate exprimată prin deplasări cu preponderență laterale ale construcției. Într-adevăr, deplasările - laterale în cazul acțiunii seismice și a acțiunii vântului - sunt relevante în ceea ce privește răspunsul structural la aceste acțiuni. Celorlalți parametrii cinematici, în speță vitezelor și accelerațiilor li se acordă o atenție și o relevanță mult diminuată față de cea acordată deplasărilor laterale. Acest “tratament” diferențiat aplicat stării cinemate se datorează, în primul rând, asocierii strânse între starea statică (eforturi unitare, eforturi secționale) și componenta în deplasări a stării cinemate. Nici la nivelul instruirii viitorilor ingineri structuriști, nici la nivelul activității profesionale a acestor ingineri, starea cinematică nu este evidențiată prin componentele ei, viteză și accelerație asociate deplasărilor laterale. Dacă, într-adevăr, vitezele mișcării oscilatorii laterale induse de acțiunile de tip cutremur sau vânt nu sunt relevante pentru răspunsul structural, accelerațiile “de nivel” constituie un parametru important și chiar mai cuprinzător decât parametrul deplasări și a devenit un obiectiv în sine al analizelor structurale la acțiunea vântului [98-100].

Cuprinderea stării de accelerații include nu numai efectul acestora asupra structurii ci și efectul lor asupra oamenilor și asupra instalațiilor / utilajelor tehnice adăpostite în construcție. La om, percepția mișcării, poate fi evidențiată mai complet prin evaluarea accelerațiilor structurii în dauna deplasărilor de nivel. S-a constatat [101-103] că accelerațiile mișcării vibratorii induse au efecte “negative” atât asupra structurilor cât și asupra ocupanților (echipamente, oameni) acestora dacă valorile lor se situează în anumite domenii [101]. Normativele de proiectare în vigoare a structurilor la acțiunea vântului [1, 2] care, deși legisfează substituirea acțiunii dinamice cu acțiuni / forțe statice, includ referiri la valorile maxime ale accelerațiilor laterale de nivel în vederea limitării percepției umane la acțiunea vântului.

În acest fel, reducerea răspunsului structurii la acțiuni dinamice include și reducerea valorilor accelerațiilor. Acest obiectiv (reducerea accelerațiilor) nu poate avea o soluție în sine, distinctă de soluția adecvată răspunsului în deplasări sau în eforturi. Astfel, protecția pasivă trebuie să aibă rezultate în reducerea valorilor răspunsului structural în toate componentele sale.

Studiul întreprins și analizele elaborate în prezenta teză includ referiri și la răspunsul în accelerații al structurilor de referință analizate și a acestor structuri echipate cu protecție pasivă.

Rezultatele numerice ale analizelor evidențiază un efect semnificativ al reducerii valorilor accelerațiilor laterale atât prin amortizare adăugată cât și prin mase adăugate (Fig. 4.8-Fig. 4.10). Reducerea valorilor amplitudinilor este însoțită de reducerea - tot atât de importantă - a duratei mișcării vibratorii cu valori semnificative ale mișcării.

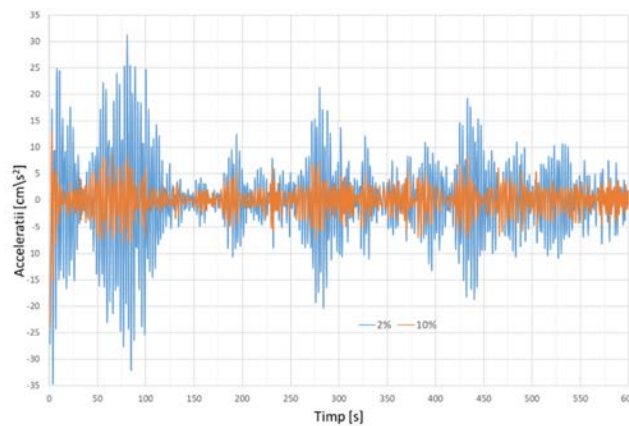


Fig. 4.8. Accelerații ale ultimului nivel, structura S1, vânt V1

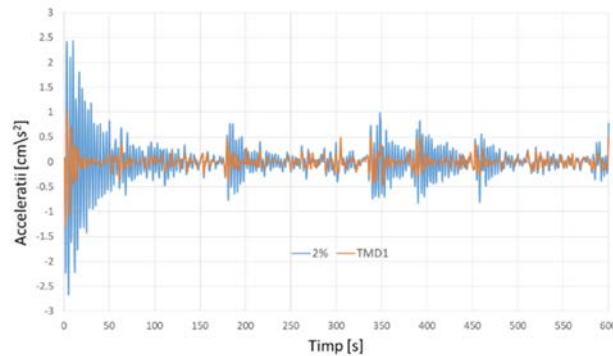


Fig. 4.9. Accelerații ale ultimului nivel, structura S2, vânt CFD

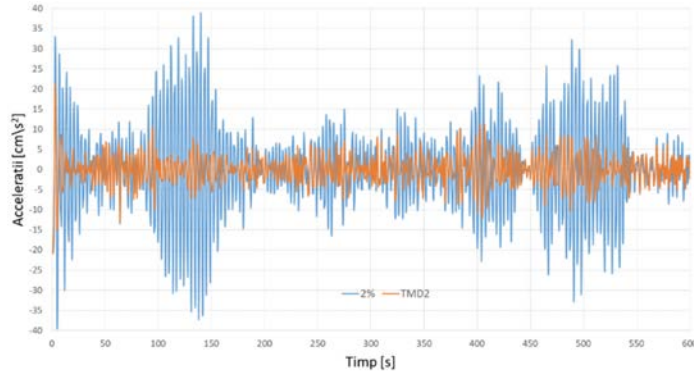


Fig. 4.10. Acelerații ale ultimului nivel, structura S3, vânt V1

4.4. Formularea analitică a dinamicii sistemelor structurale cu amortizare adăugată

4.4.1. Cazul creșterii fracțiunii de amortizare critică

Metodologia de analiză dinamică a structurilor multi-etajate poate fi redusă la sistemul dinamic cu mase concentrate de nivel și număr finit de grade de libertate (Fig 5.2).

Vectorul $\mathbf{u}(t)$ al celor n grade de libertate colectează deplasările laterale de nivel iar matricea \mathbf{M} cuprinde masele concentrate de nivel.

Ecuatia diferențială matriceală a mișcării vibratorii are expresia [104]:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{R} \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (4.6)$$

unde $\dot{\mathbf{u}}(t)$ este vectorul viteză, $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ este vectorul accelerațiilor, \mathbf{M} este matricea inerțială, diagonală de dimensiuni $n \times n$, \mathbf{C} este matricea de amortizare de tip Rayleigh iar \mathbf{R} este matricea de rigiditate. Vectorii deplasări \mathbf{u} și forțe \mathbf{F} sunt asociați. Referitor la matricea de amortizare \mathbf{C} , se consideră un nivel de 2% al amortizării (liniar vâscoase) critice. Rezolvarea ecuației matriceale diferențiale (4.6) se face prin metoda clasică a analizei modale [104-106], folosind transformarea de coordonate:

$$\mathbf{u}(t) = \boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (4.7)$$

unde $\boldsymbol{\Phi}$ este matricea $n \times n$ modală:

$$\boldsymbol{\Phi} = [\boldsymbol{\Phi}_1 \quad \boldsymbol{\Phi}_2 \quad \dots \quad \boldsymbol{\Phi}_j \quad \dots \quad \boldsymbol{\Phi}_n]$$

iar vectorul $\mathbf{x}(t)$ de ordinul n colectează coordonatele modale $x_j(t)$ ($j = \overline{1, n}$). Rezultă:

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \boldsymbol{\Phi} \cdot \dot{\mathbf{x}}(t) \quad (4.8)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \boldsymbol{\Phi} \cdot \ddot{\mathbf{x}}(t) \quad (4.9)$$

Înlocuind (4.7), (4.8), (4.9) în (4.6), și pre-înmulțind cu $\boldsymbol{\Phi}_j^T$, ecuația (4.6) devine:

$$\mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\Phi} \cdot \ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\Phi} \cdot \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) | \boldsymbol{\Phi}_j^T \cdot$$

$$\boldsymbol{\Phi}_j^T \cdot \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\Phi} \cdot \ddot{\mathbf{x}}(t) + \boldsymbol{\Phi}_j^T \cdot \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\Phi} \cdot \dot{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\Phi}_j^T \cdot \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\Phi} \cdot \mathbf{x}(t) = \boldsymbol{\Phi}_j^T \cdot \mathbf{F}(t)$$

Condițiile de ortogonalitate a vectorilor proprii în raport cu matricea maselor \mathbf{M} și cu matricea de rigiditate \mathbf{R} au formele:

$$\boldsymbol{\phi}_j^T \cdot \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\phi}_k = 0 \quad (j, k = \overline{1, n}; j \neq k)$$

$$\boldsymbol{\phi}_j^T \cdot \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\phi}_k = 0 \quad (j, k = \overline{1, n}; j \neq k)$$

Se impune ortogonalitatea vectorilor proprii și în raport cu matricea de amortizare (de tip Rayleigh) [105]:

$$\boldsymbol{\phi}_j^T \cdot \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\phi}_k = 0 \quad (j, k = \overline{1, n}; j \neq k)$$

În final, ecuația matriceală (4.6) se transformă într-un set de n ecuații diferențiale scalare:

$$M_j \cdot \ddot{x}_j(t) + C_j \cdot \dot{x}_j(t) + R_j \cdot x_j(t) = F_j(t) \quad (4.10)$$

Unde masa modală M_j , coeficientul modal de amortizare C_j , rigiditatea modală R_j și forțele modale F_j sunt date de:

$$M_j = \boldsymbol{\phi}_j^T \cdot \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\phi}_j$$

$$C_j = \boldsymbol{\phi}_j^T \cdot \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\phi}_j$$

$$R_j = \boldsymbol{\phi}_j^T \cdot \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\phi}_j$$

$$F_j = \boldsymbol{\phi}_j^T \cdot \mathbf{F} \cdot \boldsymbol{\phi}_j$$

Integrarea ecuațiilor diferențiale (4.10) conduce la soluțiile în $x_j(t)$ via integrala lui Duhamel:

$$x_j(t) = \frac{F_j}{M_j \cdot \omega_j^2} \cdot \omega_j \cdot \int_0^t f(\tau) \cdot \sin \omega_j \cdot (t - \tau) \cdot d\tau$$

Integrarea formei omogene / vibrații libere (4.6) conduce la parametrii asociați problemelor de valori proprii: vectorii proprii $\boldsymbol{\phi}_j$ și valorile proprii (frecvențele circulare) ω_j . Re-înlocuind în (4.7) se obțin soluțiile în $\mathbf{u}(t)$ exprimate prin parametrii structurali și forțele dinamice $\mathbf{F}_j(t)$. Răspunsul structural la vânt este exprimat în deplasări laterale de nivel $u_i(t)$, forța tăietoare de bază $F_b(t)$, energia cinetică indusă E_i , energia de amortizare modală E_d .

4.4.2. Cazul structurilor cu mase adăugate

Modelarea analitică a mișcării structurii echipate cu masă adăugată m_d (conectată la nivelul masei m_n) urmează calea clasică a sistemelor dinamice cu mase concentrate în

care masa adăugată m_d este inclusă împreună cu gradul său de libertate x în modelul structurii. În Fig. 4.11. este prezentat un astfel de sistem dinamic.

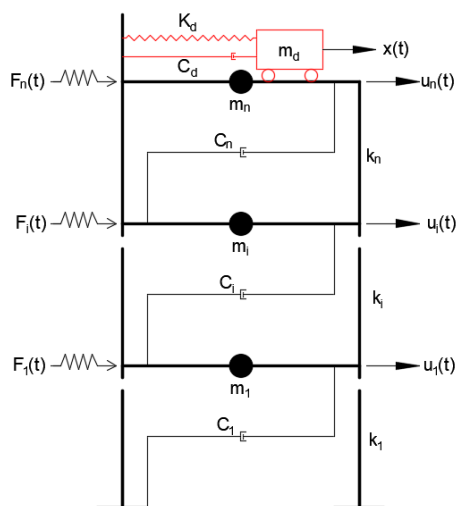


Fig. 4.11. Sistemul dinamic cu n GDL echipat cu masă adăugată

Sistemului dinamic de mai sus îi corespunde schema forțelor din Figura 4.12 conform Principiului lui d' Alembert.

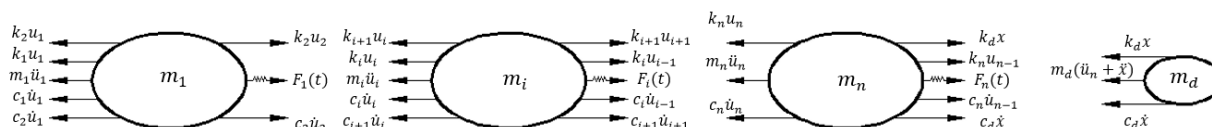


Fig. 4.12. Schema forțelor sistemului echipat cu masă adăugată la ultimul nivel

Rezultă ecuațiile de echilibru dinamic ale maselor sub forma:

Masa m_1 :

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 - c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k_1 u_1 - k_2(u_2 - u_1) = F_1(t) \quad (4.11)$$

Masa m_i :

$$m_i \ddot{u}_i + c_i(\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) - c_{i+1}(\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i) + k_i(u_i - u_{i-1}) - k_{i+1}(u_{i+1} - u_i) = F_i(t) \quad (4.12)$$

Masa m_n :

$$m_n \ddot{u}_n + c_n(\dot{u}_n - \dot{u}_{n-1}) + k_n(u_n - u_{n-1}) - c_d \dot{x} - k_d x = F_n(t) \quad (4.13)$$

Noul parametru cinematic $x(t)$ este deplasarea relativă a masei adăugate în raport cu masa m_n .

Masa adăugată m_d :

$$m_d(\ddot{u}_n + \ddot{x}) + c_d \cdot \dot{x} + k_d \cdot x = 0 \quad (4.14)$$

în care \ddot{x} este accelerația relativă a masei adăugate în raport cu masa m_n .

Forma matriceală condensată a sistemului de ecuații diferențiale asociată sistemului cu masă adăugată devine:

$$\mathbf{M}^+ \cdot \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}^+ \cdot \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}^+ \cdot \mathbf{y}(t) = \mathbf{F}^+(t) \quad (4.15)$$

unde:

$$\mathbf{M}^+ = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_d & m_d \end{bmatrix} \text{este matricea inerțială care include masa adăugată } m_d$$

$$\mathbf{C}^+ = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -c_n & c_n & -c_d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & c_d \end{bmatrix} \text{este matricea de amortizare a sistemului}$$

echipat cu masă adăugată unde c_d este coeficientul amortizării liniar vâscoase a conectorului structură - masă adăugată.

Similar, matricea de rigiditate corespunzătoare sistemului echipat cu masă adăugată este:

$$\mathbf{K}^+ = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 0 & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_n & k_n & -k_d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & k_d \end{bmatrix}$$

unde k_d este coeficientul de rigiditate al conexiunii structură- masă adăugată.

Vectorul forțelor $F_i(t)$ dinamice aplicate (masei $m_1 \div m_n$) și, respectiv masei adăugate are forma:

$$\mathbf{F}^+ = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ \vdots \\ F_n(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

La fel, ceilalți vectori devin adecvați sistemului modificat prin adăugarea masei:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_n(t) \\ x(t) \end{bmatrix} \text{este vectorul deplasărilor generalizate}$$

$$\dot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{u}_n(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} \quad \text{este vectorul vitezelor generalizate ale sistemului echipat cu } m_n$$

$$\ddot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \\ \vdots \\ \ddot{u}_n(t) \\ \ddot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} \quad \text{este vectorul accelerațiilor generalizate ale sistemului echipat cu } m_n.$$

Rezolvarea ecuației diferențiale matriceale (4.15) este, deja, un loc comun în analiza dinamică a structurilor. Prin folosirea programului comercial SAP2000, ecuația 4.15 este rezolvată printr-o analiză modală combinată cu tehnica *time-history* [106]. Rezultatele numerice obținute pentru cazurile celor trei structuri (Fig. 6.1 ÷ Fig. 6.4) acționate de forțe din vânt generate prin abordarea cvasi-staționară și prin abordarea CFD, sunt prezentate în Cap. 6.

5. Starea energetică a structurilor acționate dinamic

Exprimarea răspunsului unei structuri la solicitările inerente este, de multă vreme, un loc comun nu numai în domeniul ingineriei structurale dar chiar și în domeniul instruirii - la nivel studentesc - în acest domeniu. Într-adevăr, calculul „diagramelor M, T, N” este privit ca o încununare a acumulării cunoștințelor în ingineria structurală. În general, obiectivul instruirii și chiar al activității este mai larg incluzând starea mecanică a structurii generată de solicitările asociate. Starea mecanică, la rândul său, este formată din starea statică exprimată prin valorile eforturilor secționale M, T, N și ale eforturilor unitare σ și τ și, respectiv starea cinematică exprimată prin deplasări și rotații în secțiuni prestabilite și prin deformații specifice. Trebuie remarcat faptul că toți parametrii (statici / cinematici) prin care se exprimă starea mecanică tradițională sunt mărimi vectoriale asociate prin relații de echilibru, de compatibilitate și, respectiv relații constitutive / materiale. Această stare mecanică tradițională formată din starea statică și starea cinematică domină încă obiectivele și abordările în domeniul ingineriei structurale. Oricât de complexă ar deveni această stare mecanică tradițională prin incursiuni în domeniul marilor deplasări, în domeniul post-elastic, aceasta este puternic amprentată de faptul că este asociată cu starea de echilibru a structurii.

Starea de echilibru a unei structuri impregnează ingineria structurală atât de puternic încât chiar și acțiunile dinamice (cutremurul, vântul, etc.) sunt transformate în acțiuni statice - afectate adecvat pentru a include cumva efectul dinamic. Oricât de ingenioasă ar fi abordarea statică a comportării structurale, mișcarea indusă de acțiunile dinamice nu poate fi substituită prin efecte statice. Mișcarea indusă unei structuri de o acțiune dinamică este însoțită inerent de fenomenul de amortizare - forma de disipare a energiei induse în structură de acțiunea dinamică. Conceptele moderne de protecție a construcțiilor supuse acțiunilor dinamice au, în principal, rolul de a crește cantitatea și viteza de amortizare a energiei induse. Prin structura sa matematică, energia include toate aspectele unei structuri acționate dinamic: starea statică de eforturi, starea cinematică de deplasări și deformații, starea inerțială (mase și distribuția acestora), starea de rigiditate și starea / capacitatea de amortizare. Energia nu doar include toate aceste aspecte ci le și asociază prin relații matematice care permit „urmărirea” în timp și spațiu a dezvoltării și evoluției stării mecanice a structurii.

Prin natura sa scalară (fie componenta indusă E_i , fie componenta amortizată E_d), energia este un parametru cumulativ care este astfel capabil să exprime nu numai prezentul (pe care-l exprimă și starea mecanică tradițională) ci și trecutul acestei stări. Starea energetică a unei structuri acționate de vânt nu este un concept întru totul nou. Conceptul de stare energetică ca o nouă componentă a stării mecanice tradiționale a fost asociat de câteva decenii cu solicitarea seismică a structurilor [107, 108]. În cazul solicitării seismice, componentele energetice (energie indusă E_i , energie cinetică E_k , energie de deformație elastică E_s , energie disipată prin amortizare E_d) sunt bine definite și sunt asociate atât specificității mișcării compuse (translație de corp rigid + deformație elastică) a unei structuri acționate seismic [109-111], cât și specificității comportării în

domeniul post-elastic al structurii [112]. Includerea în analizele structurale, permise de abordarea energetică, a maselor puse în mișcare de acțiunea dinamică a vântului, a vitezelor și accelerațiilor acestor mase, lărgeste benefic cadrul de analiză și, în același timp, permite o evaluare directă a răspunsului dinamic ne-afectat de coeficienți substitutivi / corectivi ai acestuia.

5.1. Bilanțul energetic al unei structuri acționate de vânt

Bilanțul energetic al unei structuri acționate dinamic exprimă - în același timp - atât starea de echilibru și compatibilitate a structurii cât și distribuția în spațiu / structură și în timp a componentelor energetice. Prin componenta energie disipată E_d , bilanțul energetic exprimă chiar și cantitatea de energie $E_i - E_d$ necesară amortizării stării de mișcare induse. Nici o altă relație de natură matematică asociate stării mecanice a unei structuri sollicitate dinamic nu este atât de cuprinzătoare și atât de puternică în exprimarea acestei stări. Cuprinderea în starea energetică a proprietăților elastice (de flexibilitate/ rigiditate), a proprietăților inerțiale (masa și distribuția acestora) și a proprietăților de amortizare este argumentul care stă la baza acestei afirmații.

Expresia matematică a bilanțului energetic stabilită pentru starea cinematică indusă seismic [109, 111] se exprimă prin ecuația:

$$E_k + E_d + E_s = E_i \quad (5.1)$$

În cazul comportării în domeniul post-elastic, componenta E_d a energiei disipate include atât energia disipată prin amortizarea inerentă a structurii cât și energia disipată prin deformațiile plastice. În cazul structurilor echipate cu sisteme de disipare a energiei, această energie este de asemenea inclusă în E_d . În cele ce urmează, se consideră exclusiv în domeniul elastic al structurilor acționate de vânt și, astfel, energia disipată E_d cuprinde, după caz, energia disipată prin amortizare inerentă și energia disipată prin amortizare adăugată.

5.1.1. Cazul sistemelor cu un grad de libertate

Modelul matematic (ecuația de echilibru dinamic via Principiul lui D'Alembert) al unui sistem dinamic cu un grad de libertate acționat de vânt (Fig. 5.1) se scrie:

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = F(t) \quad (5.2)$$

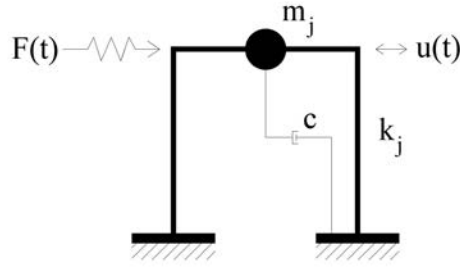


Fig. 5.1. Sistemul dinamic cu un grad de libertate

în care c este coeficientul de amortizare liniar vâscoasă iar k este coeficientul de rigiditate al sistemului dinamic. Se consideră deplasarea virtuală $du(t)$ compatibilă cu legăturile structurii și se obține ecuația de lucru mecanic elementar:

$$m \cdot \ddot{u}(t) \cdot du(t) + c \cdot \dot{u}(t) \cdot du(t) + k \cdot u(t) \cdot du(t) = F(t) \cdot du(t) \quad (5.3)$$

Prin integrare între limitele 0 și u se obține ecuația de bilanț energetic:

$$\int_0^u m \cdot \ddot{u}(t) \cdot du(t) + \int_0^u c \cdot \dot{u}(t) \cdot du(t) + \int_0^u k \cdot u(t) \cdot du(t) = \int_0^u F(t) \cdot du(t) \quad (5.4)$$

în care termenii reprezintă componentele energetice ale sistemului dinamic definite astfel:

- Energia cinetică $E_k = \int_0^u m \cdot \ddot{u}(t) \cdot du(t)$ (5.4.1)

- Energia disipată prin amortizare $E_d = \int_0^u c \cdot \dot{u}(t) \cdot du(t)$ (5.4.2)

- Energia de deformație elastică $E_s = \int_0^u k \cdot u(t) \cdot du(t)$ (5.4.3)

- Energia de input $E_i = \int_0^u F(t) \cdot du(t)$ (5.4.4)

Trecând de la variabila $u(t)$ la variabila t prin relația:

$$du(t) = \dot{u} \cdot dt \quad (5.5)$$

Se obține:

- Energia cinetică $E_k = \int_0^t m \cdot \ddot{u}(t) \cdot \dot{u}(t) \cdot dt$ (5.6.1)

- Energia disipată prin amortizare $E_d = \int_0^t c \cdot \dot{u}(t) \cdot \dot{u}(t) \cdot dt$ (5.6.2)

- Energia de deformație elastică $E_s = \int_0^t k \cdot u(t) \cdot \dot{u}(t) \cdot dt$ (5.6.3)

- Energia de input $E_i = \int_0^t F(t) \cdot \dot{u}(t) \cdot dt$ (5.6.4)

Expresiile 5.2-5.4 evidențiază - prin natura lor integrală și scalară - specificitatea abordării energetice: asociind o valoare numerică variabilei t , se obțin informații adecvate stării mecanice cumulate până în acel moment.

5.1.2. Cazul sistemelor cu număr finit de grade de libertate

Exprimarea / abordarea energetică a răspunsului dinamic al structurilor cu număr finit (n) de grade de libertate, utilizează formulările specifice metodei elementelor finite adaptate structurilor având elemente liniare (bare drepte). Analiza dinamică asociată formulării prin metoda elementelor finite (liniare / unidimensionale) apelează elementele tradiționale asociate proprietăților elastice, inerțiale, de amortizare (Fig. 5.2) ale sistemelor dinamice.

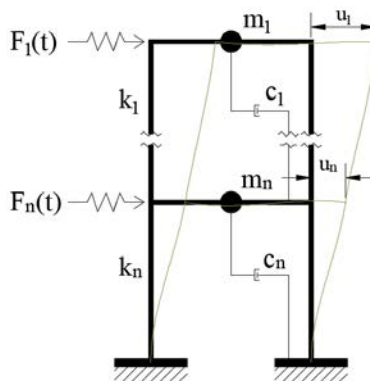


Fig. 5.2. Sistemul dinamic cu n grade de libertate

Parametrii asociați sunt:

- vectorul ($n \times 1$) $\mathbf{u}(t)$ al deplasărilor (al celor n grade de libertate);
- vectorul ($n \times 1$) vitezelor $\dot{\mathbf{u}}(t)$;
- vectorul ($n \times 1$) accelerațiilor $\ddot{\mathbf{u}}(t)$;
- vectorul ($n \times 1$) al acțiunilor dinamice $\mathbf{F}(t)$;
- matricea de rigiditate („condensată”) \mathbf{R}_u ($n \times n$) asociată gradelor de libertate $\mathbf{u}(t)$;
- matricea inerțială \mathbf{M} ($n \times n$) asociată vectorului $\mathbf{u}(t)$;
- matricea de amortizare liniar vâscoasă \mathbf{C} ($n \times n$) asociată vectorului $\dot{\mathbf{u}}(t)$.

Ecuția diferențială a vibrațiilor forțate cu amortizare liniar vâscoasă induse sistemului de acțiunile $\mathbf{F}(t)$ (ecuația de echilibru dinamic) se scrie:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{R}_u \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (5.7)$$

Abordarea energetică a răspunsului dinamic al sistemelor cu n grade de libertate necesită exprimarea echilibrului dinamic. Formularea matriceală presupune implicit proprietățile de simetrie și de calitatea de pozitiv - definite ale matricelor \mathbf{M} , \mathbf{R}_u , \mathbf{C} astfel că ecuația (5.7) devine prin transpunere:

$$\ddot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{M} + \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} + \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{R}_u = \mathbf{F}^T(t) \quad (5.8)$$

Înmulțind ecuația (5.8) la dreapta cu diferențiala $d\mathbf{u}$ se obține:

$$\ddot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{M} \cdot d\mathbf{u} + \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot d\mathbf{u} + \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{R}_u \cdot d\mathbf{u} = \mathbf{F}^T(t) \cdot d\mathbf{u} \quad (5.9)$$

Înlocuind $d\mathbf{u} = \dot{\mathbf{u}} \cdot dt$ în (5.9) rezultă:

$$\dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{R}_u \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt = \mathbf{F}^T(t) \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \quad (5.10)$$

Integrând (5.10) de la 0 la t se obține:

$$\int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt + \int_0^t \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{R}_u \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt = \int_0^t \mathbf{F}^T(t) \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \quad (5.11)$$

Se trece la conceptele asociate bilanțului energetic:

$$- \text{Energia de input} \quad E_i = \int_0^t \mathbf{F}^T(t) \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \quad (5.11.1)$$

$$- \text{Energia cinetică} \quad E_k = \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \quad (5.11.2)$$

$$- \text{Energia disipată prin amortizare vâscoasă} \quad E_d = \int_0^t \dot{\mathbf{u}}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \quad (5.11.3)$$

$$- \text{Energia de deformare elastică} \quad E_s = \int_0^t \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{R}_u \cdot \dot{\mathbf{u}} \cdot dt \quad (5.11.4)$$

5.1.3. Despre capacitatea de absorbție energetică a structurii

Abordarea energetică a răspunsului dinamic și chiar a proiectării structurii necesită respectarea - prin proiectare - a condiției / criteriului energetic fundamental:

$$E_{abs} \geq E_i$$

unde E_{abs} este capacitatea de absorbție a energiei induse de acțiunea dinamică. Într-o exprimare de tip efectiv - necesar, această condiție se scrie:

$$\begin{aligned} & \text{Capacitatea } E_{abs} \text{ de absorbție energetică a structurii proiectată} \\ & \geq \\ & \text{Cantitatea } E_i \text{ de energie de input} \end{aligned}$$

Sau:

$$E_{abs} \geq E_i \quad (5.12)$$

Respectarea condiției de mai sus este asigurată prin aportul tuturor celor trei stări fundamentale (STATICĂ - starea de rezistență; CINEMATICĂ - starea de deformare; ELASTICĂ - rigiditatea) ale structurii [111]. Cele trei stări trebuie satisfăcute simultan: starea statică - prin echilibrul dintre forțe aplicate și eforturi, starea cinematică - prin compatibilitatea deformațiilor cu deplasările și starea de rigiditate prin limitarea deplasărilor.

Un sistem dinamic are anumite "rezerve" necesare îndeplinirii acestei condiții. Reformularea ecuației de bilanț energetic evidențiază aceste rezerve:

$$E_i = E_s + E_k + E_d + E_{ad} \quad (5.13.1)$$

Unde E_{ad} este energia disipată prin dispozitive de protecție pasivă. Într-o alta formă, ecuația de bilanț energetic devine:

$$E_i - E_d = E_s + E_k + E_{ad} \quad (5.13.2)$$

Expresia de mai sus evidențiază termenii care produc deformații și cei care limitează aceste deformații asociate comportării structurii în domeniul elastic. Termenii care generează deformații sunt E_s și E_k în timp ce termenii care "apără" structura sunt E_d și E_{ad} .

Referitor la acești ultimi doi termeni aduși de amortizare, trebuie subliniat că structura are, în general, o capacitate de a disipa energie prin amortizare vâscoasă (E_d) mică (fracțiunea de amortizare critică este cuprinsă, în cazul structurilor din oțel, între 2% și 8%). De asemenea, valoarea energiei cinetice E_k , este în general mică și poate fi neglijată. În multe instanțe se consideră că o structură are o capacitate E_{abs} de absorbție a energiei induse dată (aproximativ) de relația:

$$E_{abs} = E_s \quad (5.14)$$

În această situație, structura va avea capacitatea de a absorbi energia indusă E_i dacă este satisfăcută relația:

$$E_{abs} = E_s \geq E_i - E_d - E_{ad} \quad (5.15)$$

Prin includerea termenului E_{ad} asociat echipamentelor care conferă amortizare adăugată, structura va avea capacitate necesară de a absorbi energia indusă E_i dacă:

$$E_{abs} = E_k + E_s + E_d + E_{ad} \geq E_i \quad (5.16)$$

Asigurarea capacității de absorbție energetică este o problemă de interes major mai ales în regiunile cu potențial seismic ridicat. Răspândirea folosirii acestei protecții atât la structurile nou proiectate cât și la cele existente se datorează - într-adevăr - utilizării sale "la cutremure". Totuși, protecția pasivă a structurilor acționate dinamic are un început în domeniul "protecției la vânt" [113, 114]. Calculul practic al valorilor componentelor energetice date de (5.11.1÷5.11.4) constă în rezolvarea numerică a integralelor. Studiile numerice prezentate în teză folosesc incrementul de timp $\Delta t = 1,0$ s și domeniul de timp de la 0 la 600 secunde. Structurile la care se face referire (numite S1, S2, S3) sunt prezentate din punct de vedere al stării lor geometrice, mecanice și de amortizare în Capitolul 6 (Fig. 6.1÷6.4). Reprezentarea grafică a componentelor energetice evidențiază atât variația în timp a acestora cât și o "calmare" a răspunsului structurii exprimat prin starea energetică datorate - evident - inerției structurii (Fig. 5.3, Fig. 5.4). Variația parametrilor energetici E_s , E_k și E_d în funcție de gradul de amortizare liniar vâscoasă (exprimat prin fracțiunea de amortizare critică) sunt prezentate, pentru exemplificare, grafic în Fig. 5.5, Fig. 5.6.

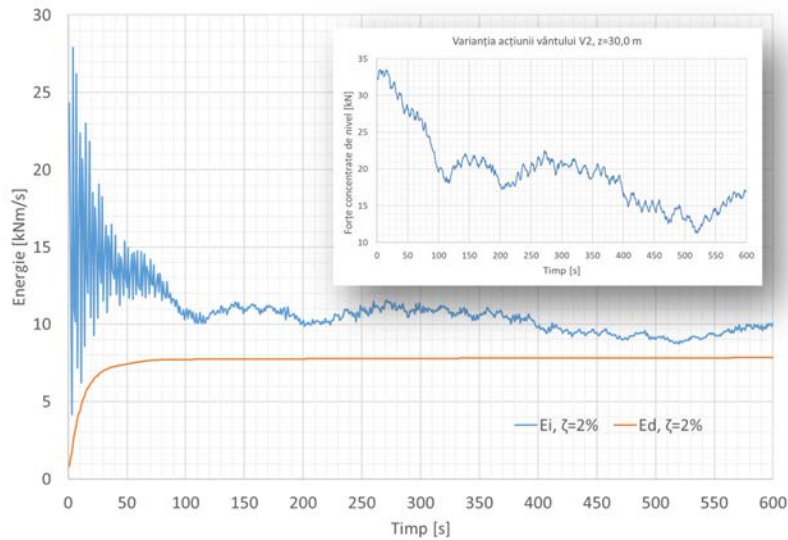


Fig. 5.3. Starea energetică a structurii de referință S1, vântul V2

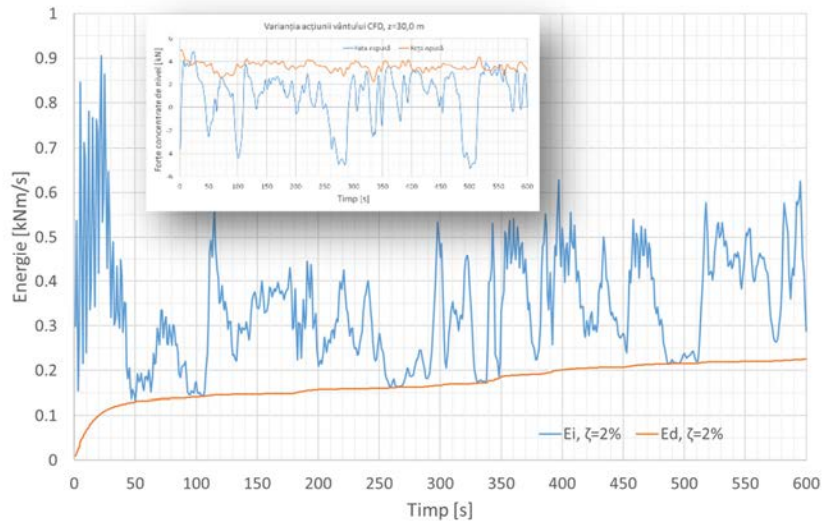


Fig. 5.4. Starea energetică a structurii S2 echipate cu amortizare, vântul CFD

Referitor la structurile multi-etajate din oțel, energia disipată prin amortizare inerentă este asigurată în totalitate de zonele de conectare de tip grindă-stâlp. Amortizarea adăugată conduce la conservarea comportării în domeniul elastic prin disiparea unei cantități de energie mai mari decât amortizarea inerentă. Necesitatea conservării comportării în domeniul elastic creează, astfel, conceptul de *capacitate de absorbție* a structurii. Această capacitate este exprimată prin parametrul E_d care reprezintă energia disipată prin amortizare și care împreună cu cantitatea de energie de input E_i definesc starea energetică a structurii. Starea energetică alături de celelele două componente tradiționale (starea statică și, respectiv, starea cinematică) completează starea mecanică și „conectează” cele două stări tradiționale prin introducerea conceptului de energie care, la rândul său, sintetizează parametrii statici (eforturi secționale, eforturi unitare) și parametri cinematici (deplasări, viteze). În același timp energia - ca parametru mecanic -

este domeniul cel mai adecvat de includere a fenomenului de amortizare asociat stării dinamice a structurilor acționate de vânt.

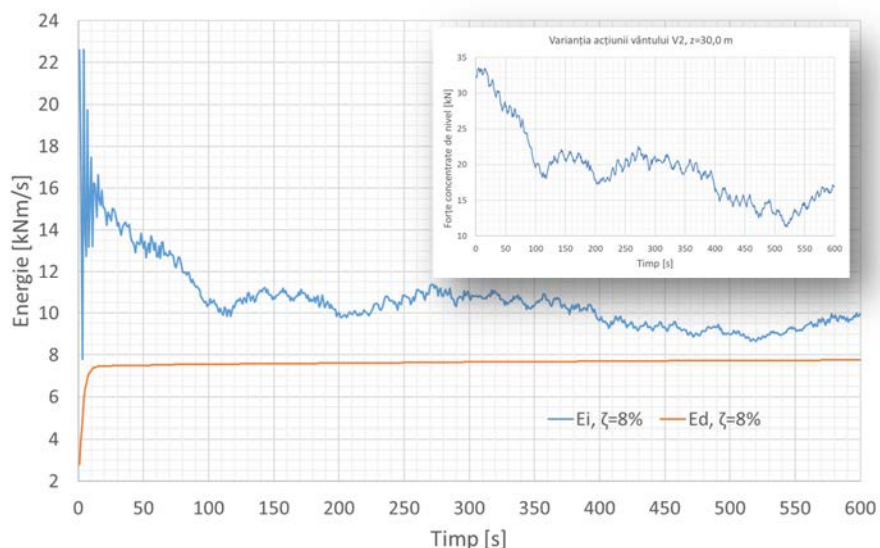


Fig. 5.5. Starea energetică a structurii S1 echipate cu amortizare, vântul V2

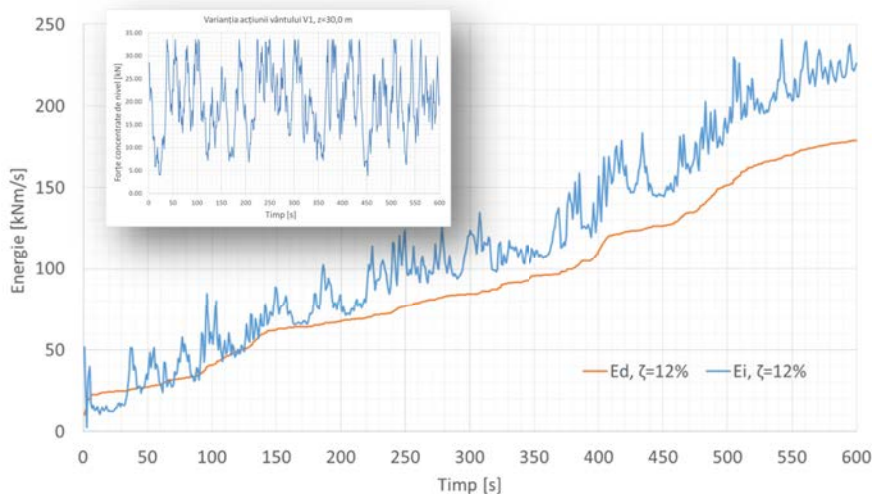


Fig. 5.6. Starea energetică a structurii S3 echipate cu amortizare, vântul V1

Cresterea capacității de absorbție E_d reflectă îndeaproape creșterea cantității de energie indusă în structură E_i de acțiunea vântului. În același timp, componentele E_i și E_d ale stării energetice evidențiază modificările inerțiale și de amortizare aduse de echiparea cu amortizare / mase adăugate în cantitatea de energie indusă (Fig. 5.7). În cazul echipării cu amortizare adăugată, ceea ce duce la variația energiei induse de vânt în structură este scăderea vitezelor maselor în mișcările lor vibratorii. Efectul favorabil al echipării structurii cu sisteme de protecție pasivă (amortizare adăugată peste nivelul inerent de 2%, mase adăugate) este vizibil în cazul tuturor celor trei structuri analizate și a solicitărilor din vânt aplicate.

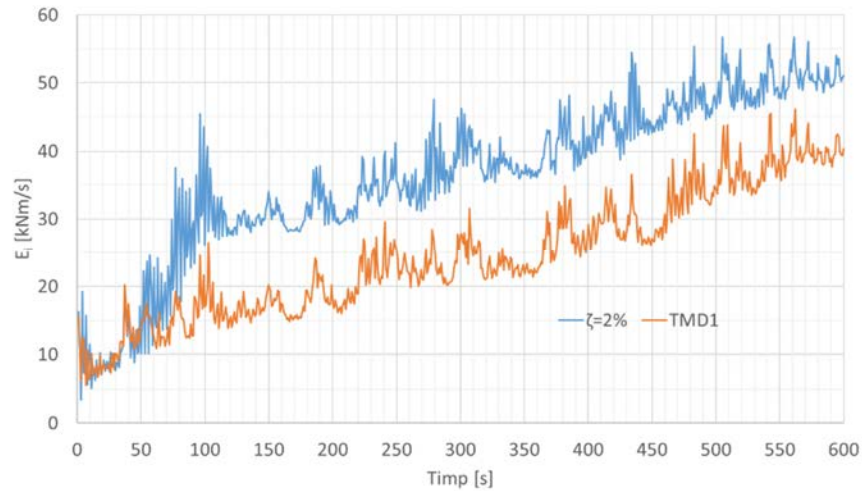


Fig. 5.7. Starea energetică a structurii S1 echipate cu masă adăugată, vântul V1

Starea energetică este - prin toate componentele sale - asociată stării cinematice de deplasări și viteze generate de acțiunea vântului. Așa cum se vede și din sarea de deplasări (Fig. 5.8) asociată, pentru exemplificare fracțiunii de amortizare critică $\zeta=2\%$, intervalului de timp de la $t=50$ s la $t=100$ s a vântului V1, deplasările sunt relativ mari fiind cuprinse în intervalul -20 mm ÷ $+120$ mm în timp ce tabloul vitezelor exprimă o variație mult mai limitată, de la -0.15 m/s la $+0.14$ m/s (Fig. 5.9).

În cazul stării de amortizare corespunzătoare fracțiunii de amortizare critică $\zeta=8\%$, atât starea de deplasări (Fig. 5.8) cât și cea de viteze (Fig. 5.9) sunt diminuate datorită creșterii nivelului de amortizare, dar intervalul de cuprindere a valorilor lor este la fel de diferit (mare-pentru deplasări și mic - pentru viteze).

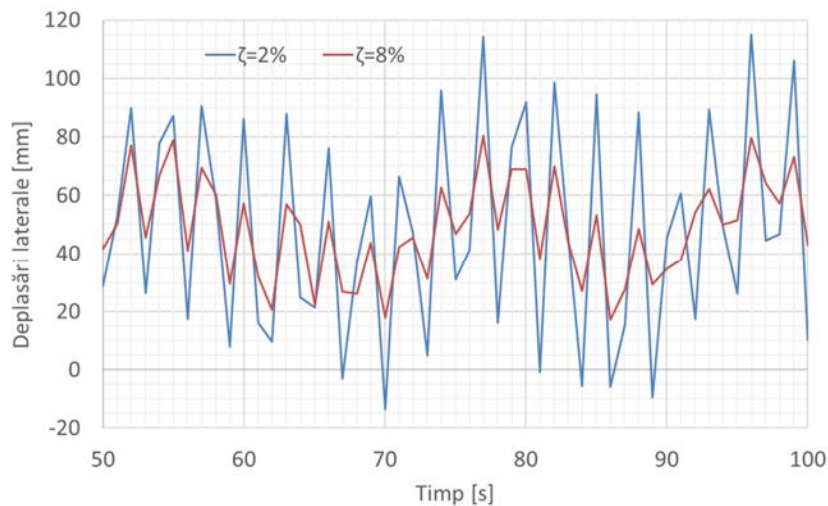


Fig. 5.8. Structura S1, vântul V1, deplasări laterale ale ultimului nivel

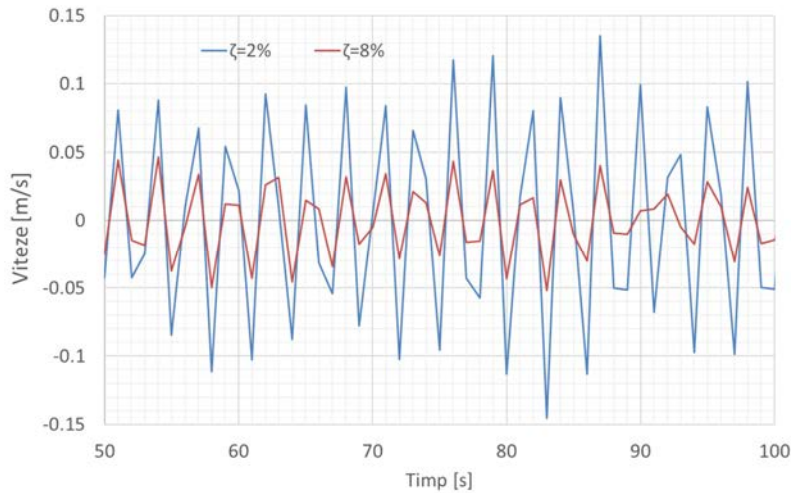


Fig. 5.9. Structura S1, vântul V1, viteze ale ultimului nivel

Acestea fiind specificitățile stării cinematice, se poate formula întrebarea dacă și cum sunt ele reflectate în starea energetică? Componentele energetice asociate deplasărilor și, respectiv vitezelor induse de vânt sunt energia cinetică E_k și energia de deformație E_s . Reprezentările grafice ale acestor componente evidențiază o asociere adecvată a stării cinematice cu starea energetică: o variație relativ extinsă a energiei de deformație E_s (Fig. 5.10) asociată variației deplasărilor și o variație redusă a energiei cinetice E_k asociată vitezelor (Fig. 5.11).

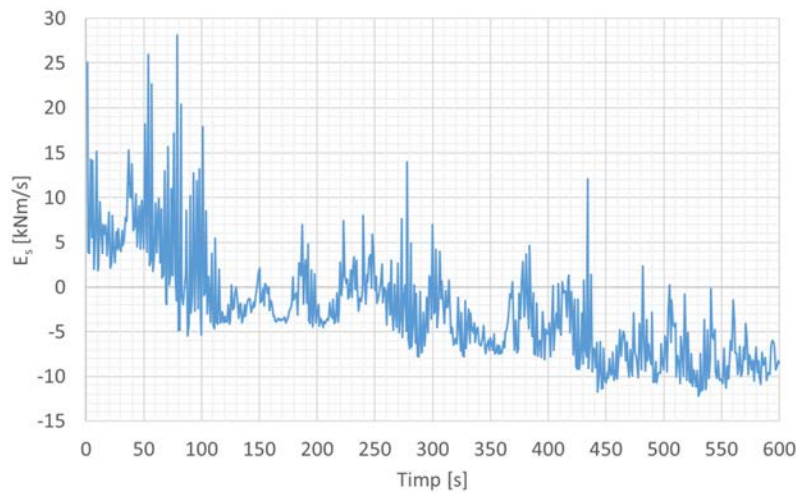


Fig. 5.10. Energia de deformație E_s a structurii de referință S1 acționată de vântul V1

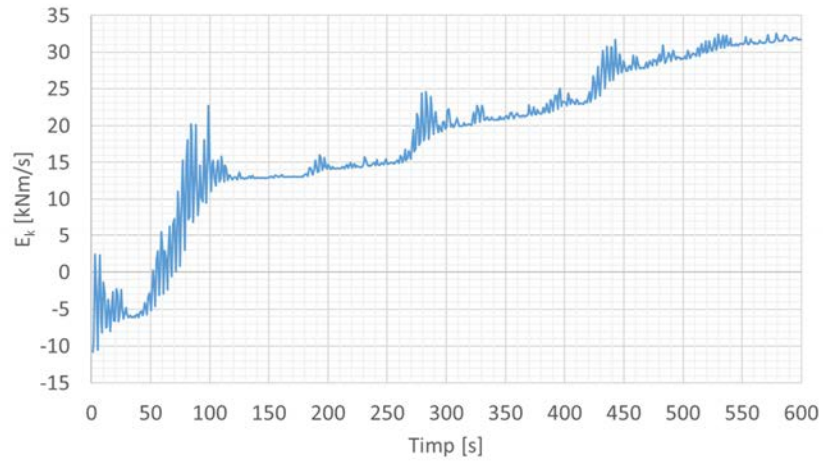


Fig. 5.11. Energia de cinetică E_k a structurii de referință S1 acționată de vântul V1

În cazul amortizării asociate fracțiunii de amortizare critică $\zeta=8\%$ se constată, și aici, afinitatea tabloului cinematic (Fig. 5.8, Fig. 5.9) cu tabloul energetic (Fig. 5.12, Fig. 5.13).

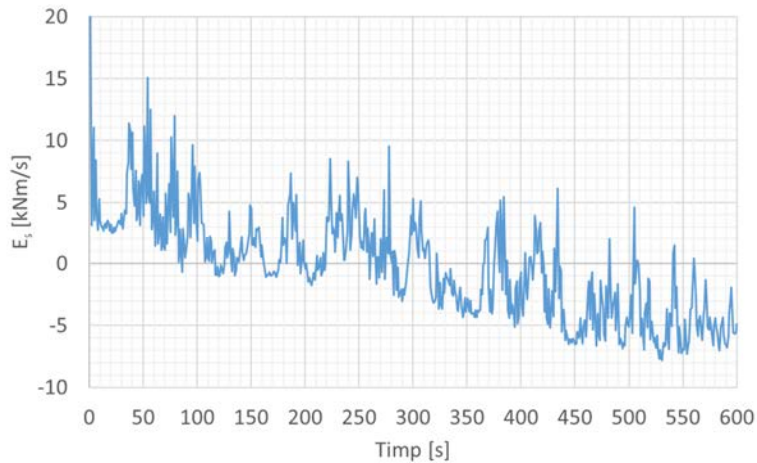


Fig. 5.12. Energia de deformație E_s a structurii S1 acționată de vântul V1, echipată cu amortizare adăugată $\zeta=8\%$

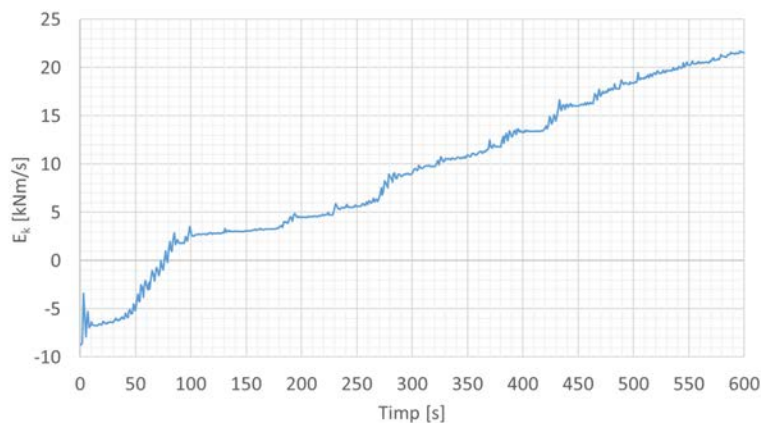


Fig. 5.13. Energia de cinetică E_k a structurii S1 acționată de vântul V1, echipată cu amortizare adăugată $\zeta=8\%$

Afinitatea variațiilor stării cinematice și a stării energetice confirmă necesitatea includerii stării energetice alături de tradiționalele stări statică și cinematică în tabloul stării mecanice a structurilor acționate dinamic.

Astfel, starea energetică propusă include cele două componente tradiționale (energia cinetică - E_k și energia de deformație elastică - E_s) și - în plus - componenta energie disipată - E_d . În Fig. 5.14 sunt prezentate cele două stări (tradițională, respectiv propusă) în cazul structurii S1 acționată de vântul V1 și echipată cu un sistem de protecție pasivă având fracțiunea de amortizare critică $\zeta=2\%$.

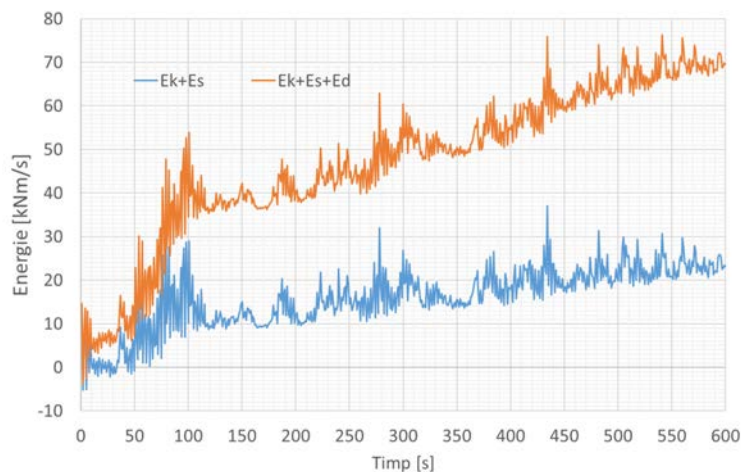


Fig. 5.14. Starea energetică clasică vs starea energetică propusă a structurii de referință S1 acționată de vântul V1

Din punct de vedere al stării cinematice, starea energetică a structurii echipată cu masă adăugată a evidențiat echivalența acestui sistem de protecție pasivă cu valoarea de cca. 8%-9% a fracțiunii de amortizare critică. Din punct de vedere al stării energetice propuse, amplasarea masei adăugate la ultimul nivel și, respectiv în treimea superioară a structurii nu aduce diferențe semnificative (Fig. 5.15).

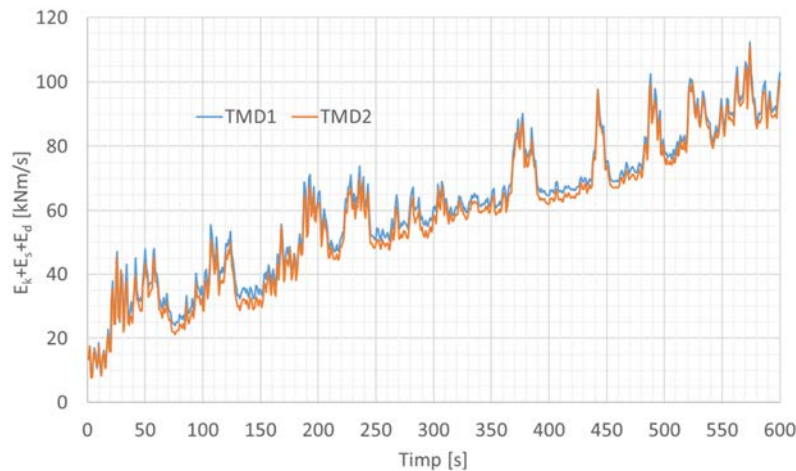


Fig. 5.15. Starea energetică propusă ($E_k+E_s+E_d$) în cazul structurii S2 acționată de vântul V3 echipată cu cele două sisteme de protecție pasivă TMD1, respectiv TMD2

În activitatea de proiectare a structurilor metalice multietajate domină, încă, tradiția adoptării unui nivel de rigiditate laterală care să asigure verificarea - de către structura proiectată - a condițiilor restrictive referitoare la deplasările laterale de nivel. Prevederea, în astfel de cazuri, a sistemelor de contravantuire este o cale simplă și eficientă din acest punct de vedere - al reducerii deplasărilor laterale de nivel. Asigurarea rigidității laterale prin contravantuirea structurii multietajate are, însă, consecințe multiple afectând nu numai starea cinematică (de deplasări laterale - în acest caz) ci și starea statică prin modificarea valorilor forței tăietoare de bază. Astfel, în cazul solicitărilor laterale de tip seismic, forța tăietoare de bază a structurii contravântuite crește [89, 115]. În cazul acțiunii vântului, echiparea structurilor cu contravântuiri este favorabilă și din punct de vedere al stării statice - așa cum se va arăta în Capitolul 6. În cele ce urmează, este analizată starea energetică a structurilor multietajate acționate de vânt, exprimată prin componentele E_i și E_d ale acestei stări. Rezultatele analizelor numerice arată că mărirea rigidității laterale prin echiparea cu contravântuiri conduce la o scădere a energiei induse de vânt (Fig 5.16).

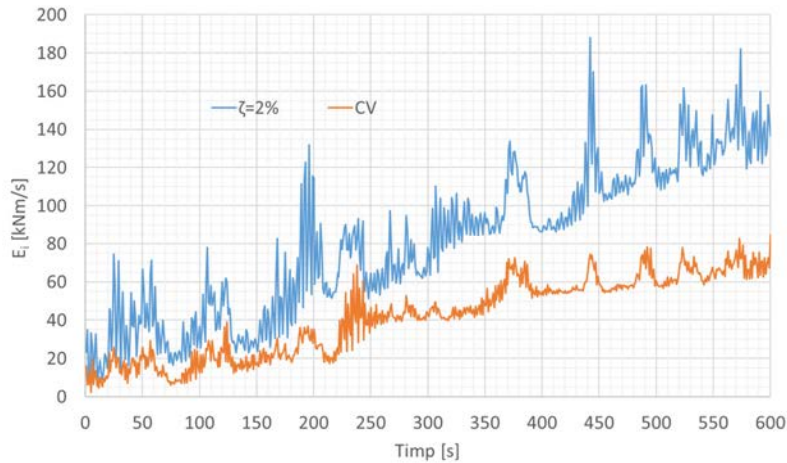


Fig. 5.16. Starea energetică propusă (E_i) în cazul structurii de referință S3 acționată de vântul V3 vs echipare cu contravântuiri

Echiparea cu sisteme de protecție pasivă sau cu sisteme de contravântuiri urmărește, în primul rând, reducerea stării cinematice exprimată prin deplasări, viteze și, respectiv accelerații laterale. În cea ce privește starea energetică, eficiența echipării cu astfel de sisteme este exprimată prin energia disipată. În cazul structurii S2 acționată de vântul V3 variația energiei disipate E_d este prezentată comparativ în Fig. 5.17. Se constată o reducere semnificativă a capacității de disipare energetice a structurii contravântuite.

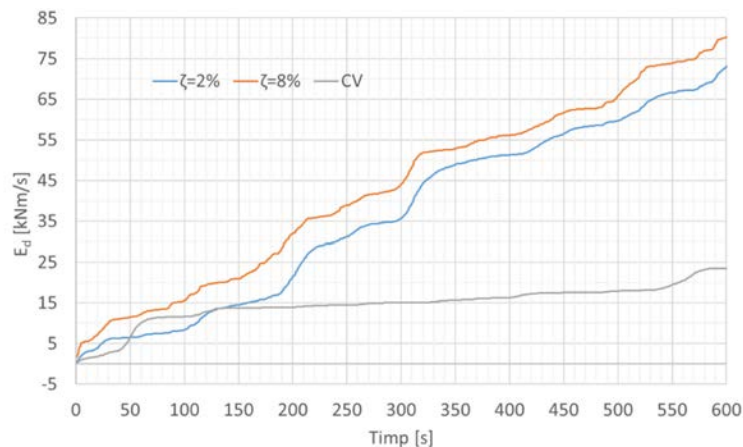


Fig. 5.17. Starea energetică (E_d) a structurii de referință S2 acționată de vântul V3 echipată cu amortizare adăugată $\zeta=8\%$ și contravântuiri

6. Răspunsul dinamic la vânt. Studii numerice

6.1. Obiectiv

Obiectivul acestui capitol se confundă, în esență, cu obiectivul principal al cercetării întreprinse: calculul *răspunsului dinamic* la vânt al structurilor multietajate. Răspunsul dinamic este exprimat prin trei clase de parametri:

- parametrii statici (forța tăietoare de bază- F_b)
- parametrii cinematici (deplasările și accelerațiile laterale de nivel)
- parametrii energetici (energia E_i indusă de vânt în structură și necesarul E_a de capacitate de absorbție pentru conservarea comportării în dimeniul elastic).

6.2. Metodologie și structuri

Metodologia abordată pentru calculul răspunsului dinamic la vânt constă în conducerea unor analize de tip *time-history* pe un set de trei structuri plane supuse unor forțe dinamice aplicate în noduri. Structurile de referință sunt cadre metalice multi-etajate proiectate conform prevederilor normative în vigoare [2, 3, 96], [116-118] și amplasate într-o zonă climatică caracterizată prin presiunea dinamică de bază a vântului, $q_b=50$ daN/m², valoarea caracteristică a încărcării date de zăpadă pe sol, $s_k=150$ daN/m², zona seismică caracterizată de $a_g = 0.1g$, $T_c = 0.7s$. Structurile metalice sunt considerate în execuție sudată, deci cu noduri grindă-stâlp rigide și având valoarea fracțiunii de amortizare critică $\zeta=2\%$ [87, 88]. Alcătuirea geometrică generală și secțională a celor trei structuri de referință, este prezentată în Fig. 6.1. Structurile de referință sunt, apoi, echipate cu sisteme pasive de reducere a răspunsului la vânt folosind atât tradiționala echipare cu contravanturi Fig. 6.2, cât și moderna echipare cu amortizare adăugată via mase adăugate Fig. 6.3, Fig 6.4.

Atât echiparea cu contravânturi cât și echiparea cu mase adăugate au exclusiv rolul de reducere a componentelor cinematice ale răspunsului la vânt: deplasări laterale absolute, deplasări laterale relative. Dacă efectul - benefic într-adevar - al reducerii deplasărilor laterale (absolute / relative) prin contravântuire poate fi evaluat printr-o analiză statică folosind *forțe statice echivalente de nivel* efectul amortizării adăugate poate fi constatat și evaluat exclusiv printr-o abordare de tip *time-history*. Autorul își exprimă opinia că imposibilitatea considerării amortizării (inerente și / sau adăugate) în analiza structurală asociată forțelor statice echivalente este - alături de fenomenul turbulenței - principalul dezavantaj în determinarea răspunsului la vânt al structurilor multietajate.

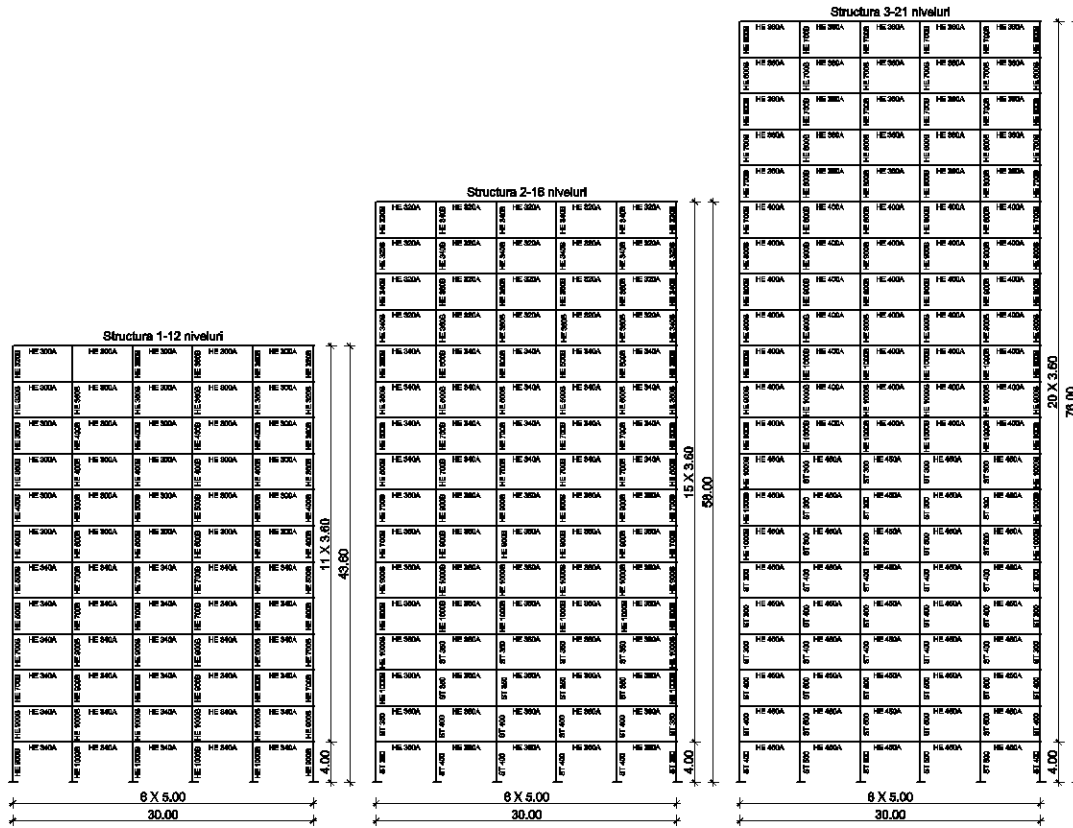


Fig. 6.1. Structuri de referință, alcătuire geometrică și secțională

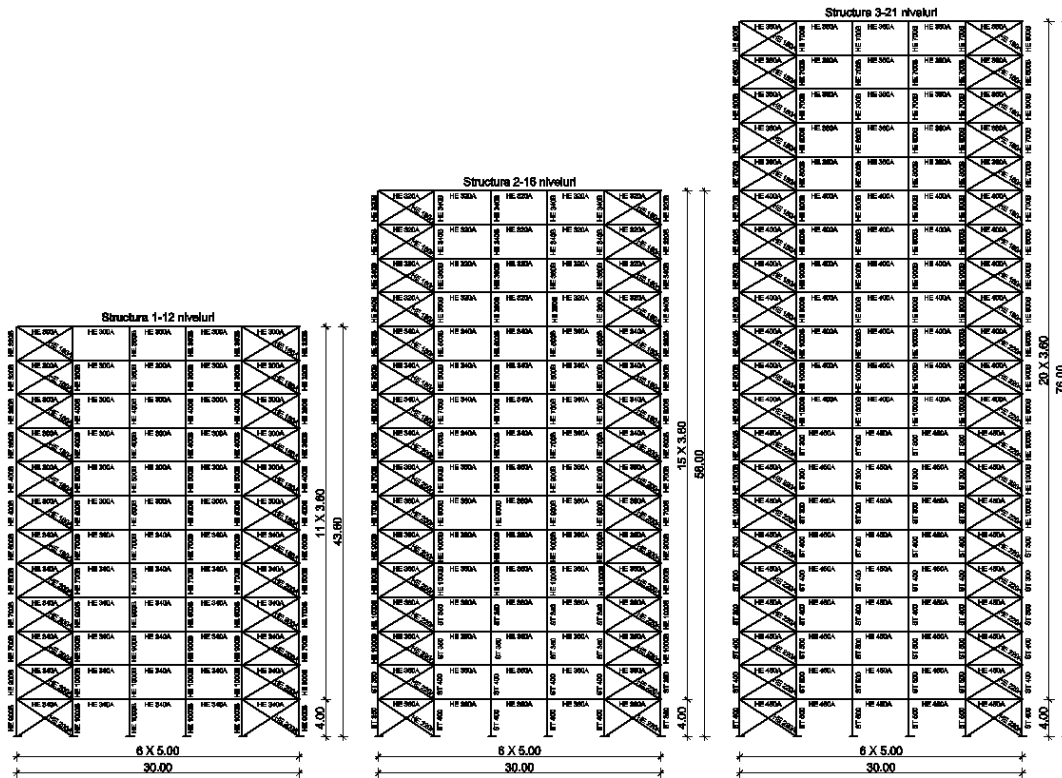


Fig. 6.2. Structuri contravântuite, alcătuire geometrică și secțională

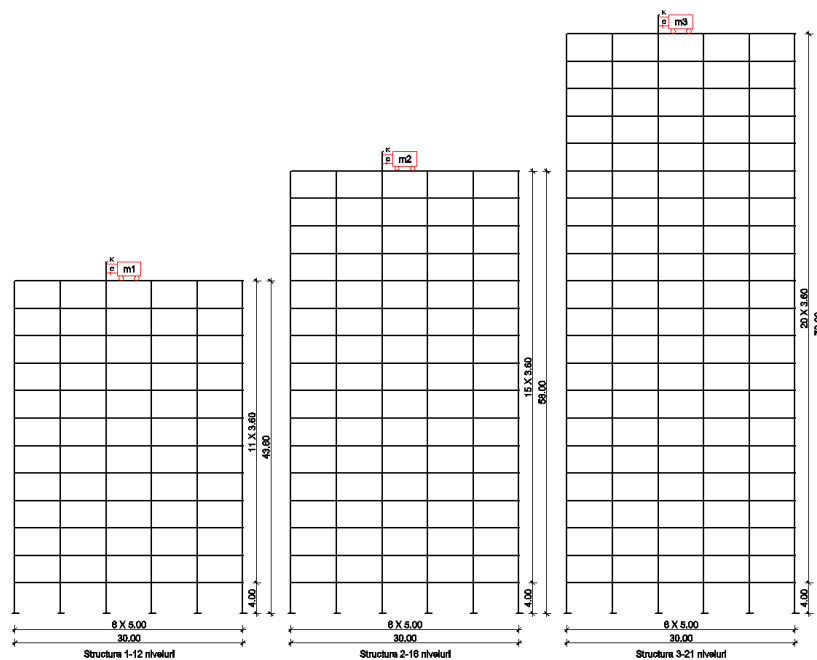


Fig. 6.3. Structurile echipate cu masă adăugată, configurația TMD1

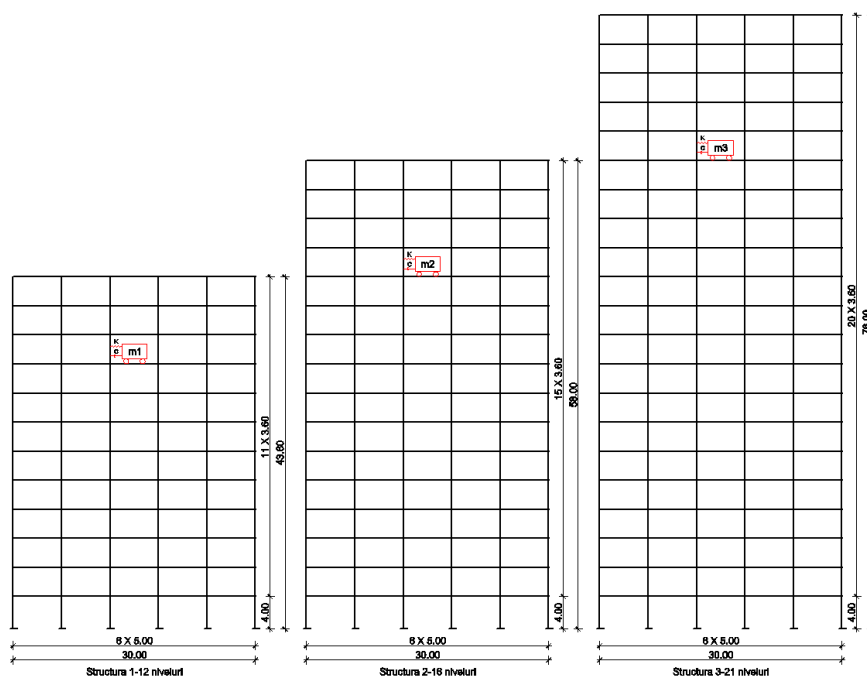


Fig. 6.4. Structurile echipate cu masă adăugată, configurația TMD2

6.2.1. Caracteristici dinamice și de vibrație ale structurilor

Studiul comportării dinamice a structurilor necesită parametri cinematici asociați vibrațiilor libere ale acestora. În continuare, sunt prezentate valorile perioadelor proprii fundamentale ale celor trei structuri în situația de referință (considerând o valoare de 2% a fracțiunii de amortizare critică) și în situațiile de echipare cu contravântuiri, cu niveluri de amortizare liniar-vâscoasă de 5%, 8%, 10%, 12%, 15% și, respectiv de echipare cu mase dăugate TMD1 și TMD2 (Tab. 6.1, Fig.6.5-Fig. 6.7).

Structura S1	Echipare								
	2%	5%	8%	10%	12%	15%	CV	TMD1	TMD2
T1 [s]	2.755	2.755	2.755	2.755	2.755	2.755	1.415	3.242	3.136
T2 [s]	0.963	0.963	0.963	0.963	0.963	0.963	0.403	2.360	2.420
T3 [s]	0.530	0.530	0.530	0.530	0.530	0.530	0.204	0.956	0.963

Structura S2	Echipare								
	2%	5%	8%	10%	12%	15%	CV	TMD1	TMD2
T1 [s]	3.324	3.324	3.324	3.324	3.324	3.324	1.942	3.889	3.761
T2 [s]	1.177	1.177	1.177	1.177	1.177	1.177	0.548	2.837	2.905
T3 [s]	0.660	0.660	0.660	0.660	0.660	0.660	0.272	1.167	1.177

Structura S3	Echipare								
	2%	5%	8%	10%	12%	15%	CV	TMD1	TMD2
T1 [s]	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	3.512	2.469	4.071	3.957
T2 [s]	1.212	1.212	1.212	1.212	1.212	1.212	0.691	3.003	3.060
T3 [s]	0.685	0.685	0.685	0.685	0.685	0.685	0.336	1.203	1.212

Tab. 6.1. Perioade proprii de vibrație

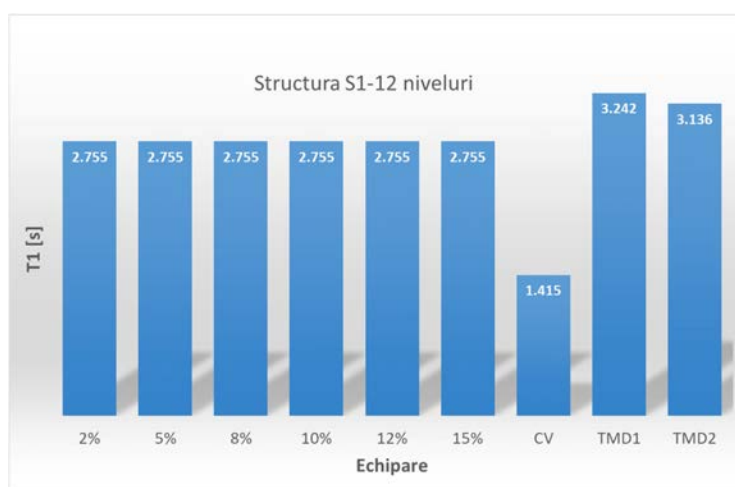


Fig. 6.5. Perioade proprii fundamentale-structura S1

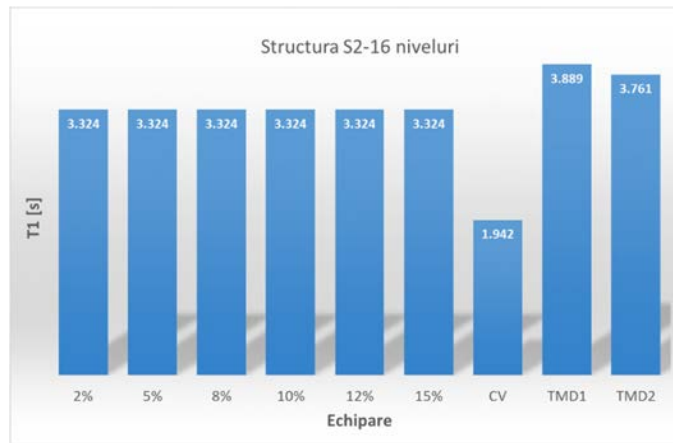


Fig. 6.6. Perioade proprii fundamentale-structura S2

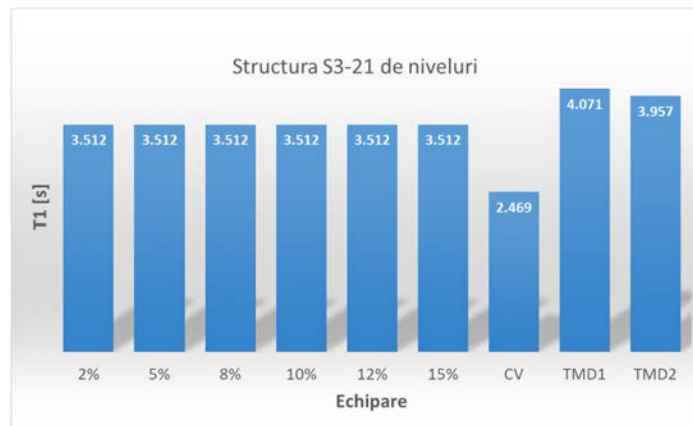


Fig. 6.7. Perioade proprii fundamentale-structura S3

6.3 Acțiunea vântului dinamic

Transformarea vitezei vântului în forțe variabile aplicate în nodurile structurilor, este abordată în două moduri distincte.

6.3.1. Abordarea cvasi-staționară

Transformarea vitezei în presiune se bazează pe ipoteza “cvasi-staționară” [12] conform căreia fluctuațiile presiunii pe suprafețele construcțiilor urmează fluctuațiile vitezei vântului:

$$q(z, t) = c_p \cdot c_0^2 \cdot c_r^2(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2(z, t) \quad (6.1)$$

În relația (6.1): $q(z, t)$ este presiunea/sucțiunea vântului pe fațadele structurilor;

c_p este coeficientul de presiune/sucțiune;

c_0 este factorul orografic;

$c_r(z)$ este factorul de rugozitate;

ρ densitatea aerului;
 $V_b(z, t)$ viteza de referință a vântului.

Vântul este considerat sub forma vitezogramelor Fig. 6.8, Fig. 6.9, Fig. 6.10 generate din date culese *în situ* și procesate statistic printr-o matematică adecvată [15-17]. Valorile vitezelor de referință sunt considerate la înălțimea $z=10.00$ m și au în comun viteza medie, de 27 m/s. Aceste valori sunt, în continuare, adaptate [1, 2] formei fiecărei structuri prin aplicarea factorului de rugozitate $c_r(z)$ și a coeficientului de presiune/sucțiune c_p .

Vitezele sunt apoi transformate în presiuni pe fațada expusă, Fig. 6.8, Fig. 6.9, Fig. 6.10, și în final în forțe concentrate în nodurile structurii, Fig. 6.11, Fig. 6.12, Fig. 6.13.

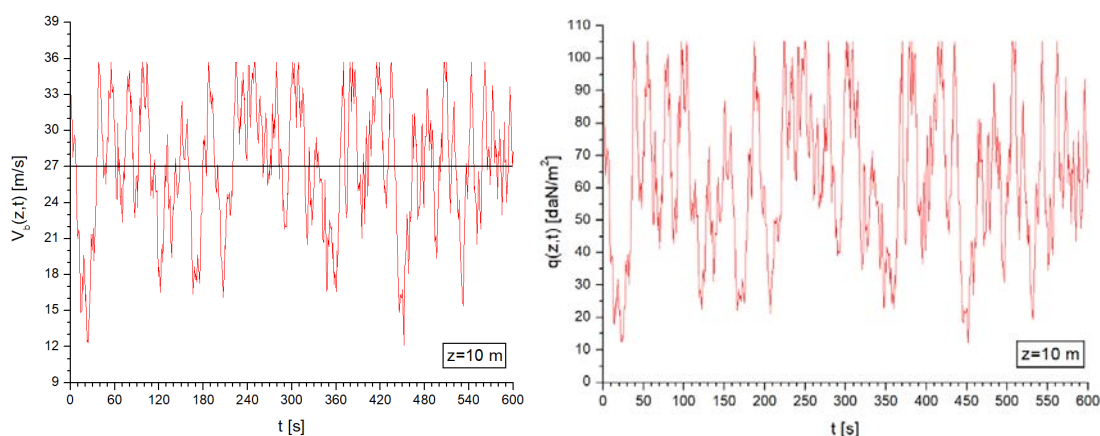


Fig. 6.8. Vântul V1, variația vitezei și a presiunii de referință

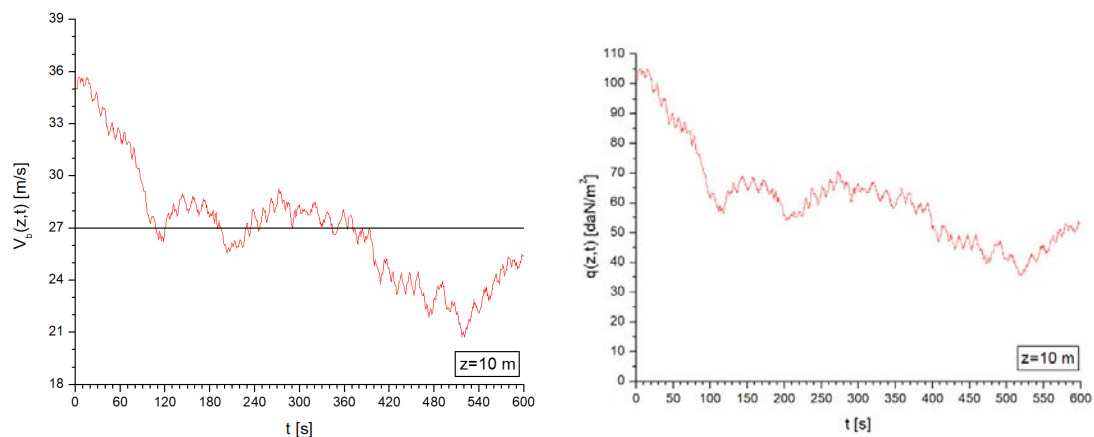


Fig. 6.9. Vântul V2, variația vitezei și a presiunii de referință

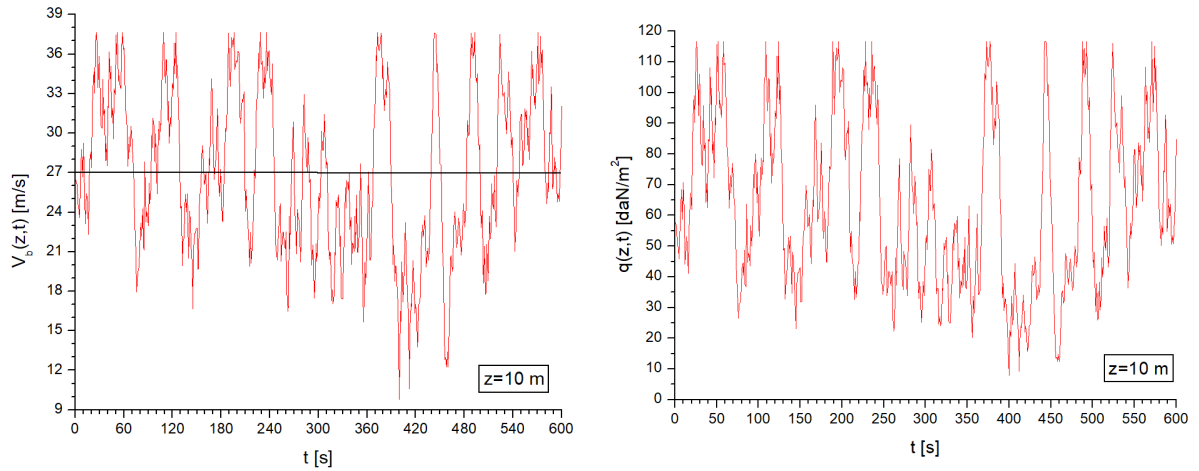


Fig. 6.10. Vântul V3, variația vitezei și a presiunii de referință

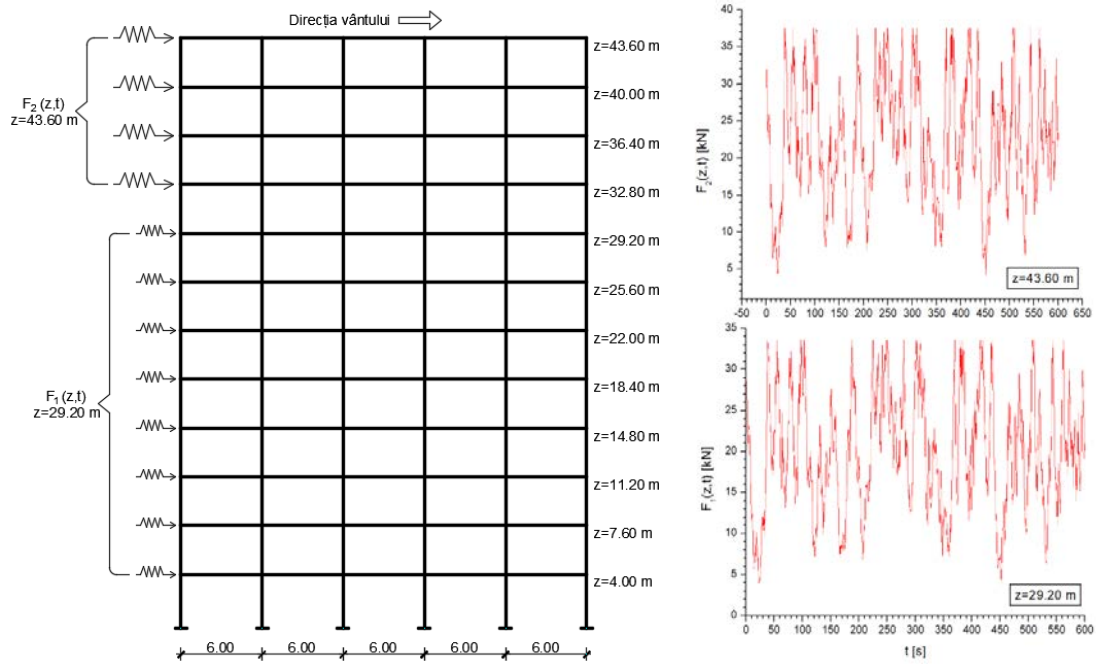


Fig. 6.11. Structura S1, forțe concentrate de nivel produse de vântul V1

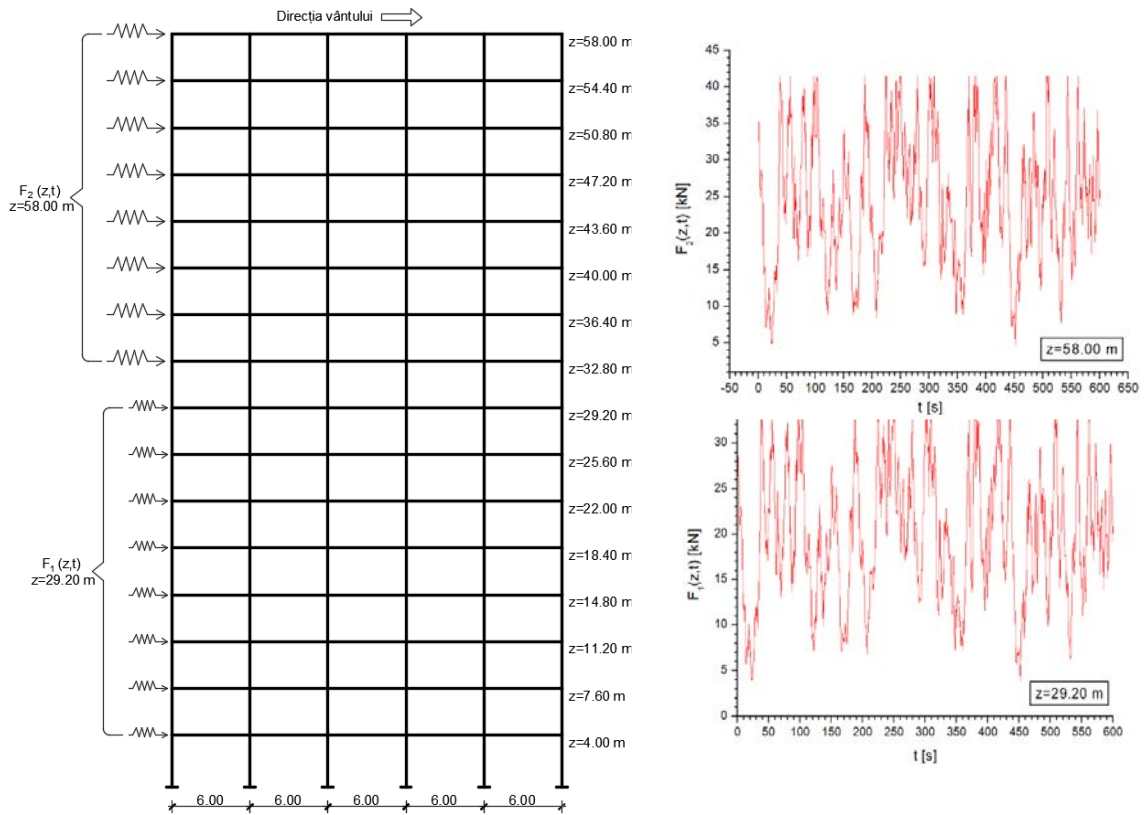


Fig. 6.12. Structura S2, forțe concentrate de nivel produse de vântul V1

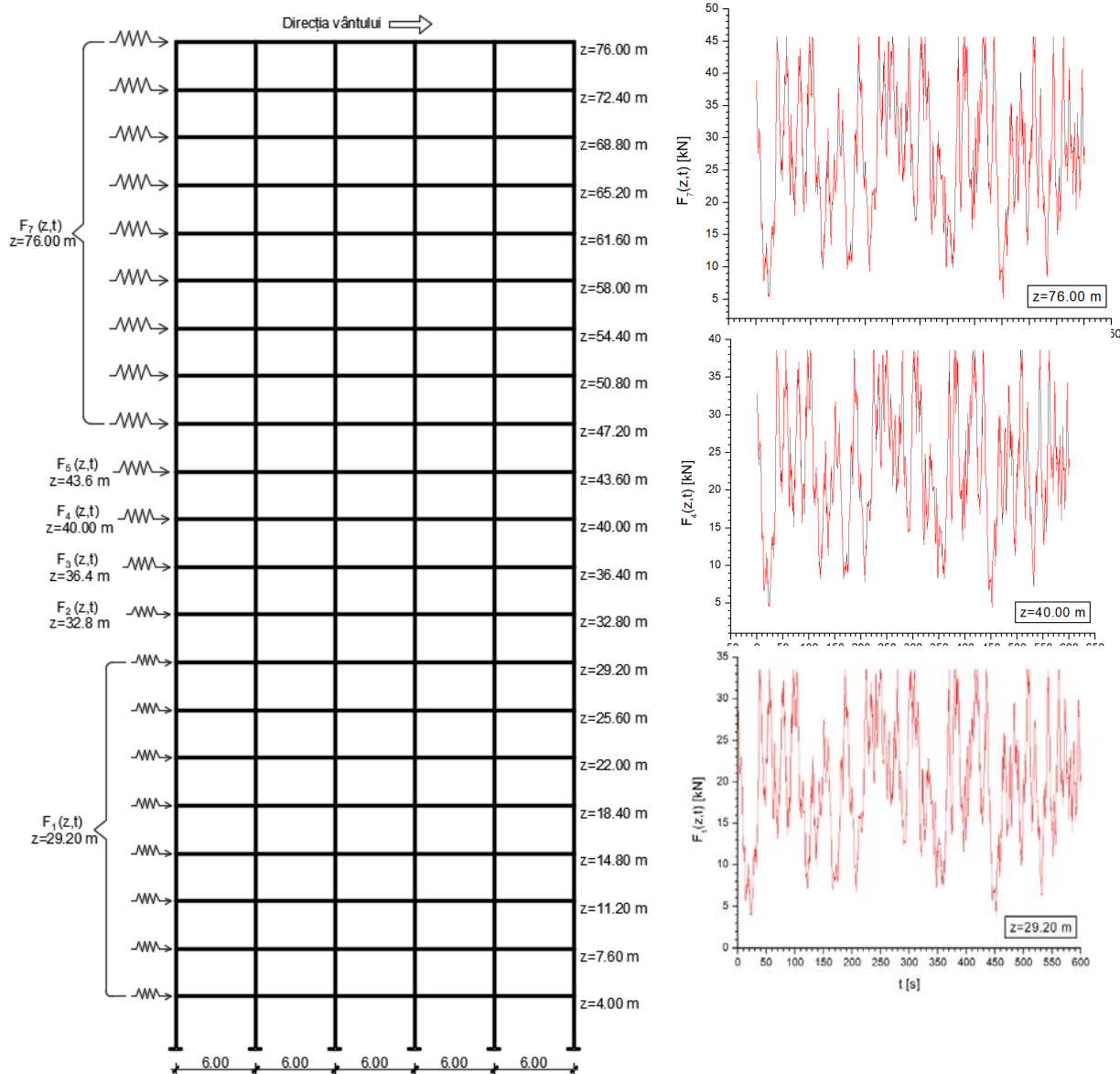


Fig. 6.13. Structura S3, forțe concentrate de nivel produse de vântul V1

6.3.2. Abordarea CFD

Studiul curgerii vântului prin analize de dinamica fluidelor, conduse cu programul comercial *ANSYS R17.0-FLUENT*, a pus în evidență caracterul turbulent al presiunii generate de vânt. Abordarea CFD include considerarea turbulenței vântului în momentul când acesta acționează obiectivul (clădirea). Turbulența este generată de existența unor obstacole și aplicarea regulilor / principiilor Dinamicii Fluidelor conduce la valori modificate ale presiunii vântului față de abordarea cvasi-staționară (Fig. 3.10). Modificarea valorilor acțiunii este însoțită de variația în timp profund diferită în abordarea CFD față de abordarea cvasi-staționară, atât pe fațada expusă - forțele $P_j(z,t)$ cât și pe fațada opusă - forțele $S_j(z,t)$ (Fig. 6.21, Fig. 6.22, Fig. 6.23). Abordarea CFD evidențiază aspecte ale variației presiunii vântului (pe ambele fațade) care nu pot fi surprinse în abordarea cvasi-staționară. În timp ce abordarea cvasi-staționară conduce

la variații ale presiunii vântului exclusiv în domeniul pozitiv (Fig. 6.8, Fig. 6.9, Fig. 6.10), abordarea CFD pune în evidență variații ale presiunii pe fațada expusă „de la + la -” (Fig. 6.15, Fig. 6.16, Fig. 6.17). Pe fațada opusă, abordarea CFD conduce la variații de tip „sucțiune” (Fig. 6.18, Fig. 6.19, Fig. 6.20) - așa cum este cunoscută acțiunea vântului în normativele curente de proiectare. Fenomenul turbulenței este profund dinamic atât din punct de vedere temporal cât și din punct de vedere spațial, ceea ce conduce la necesitatea studierii unui ansamblu teren - clădiri care să includă structura analizată. Dacă variația în timp a presiunii create de turbulență este asociată cu o funcție cvasi-periodică, variația în spațiul tridimensional poate fi asociată fenomenelor dinamice de tip haotic (Fig. 6.14). Distribuția spațială avertizează proiectantul asupra necesității considerării unui „amplasament” adecvat în jurul structurii analizate. Prevederile curente de proiectare sintetizează acest efect al vecinătăților prin coeficientul static supra-unitar, $c_r(z)$, de rugozitate al amplasamentului.

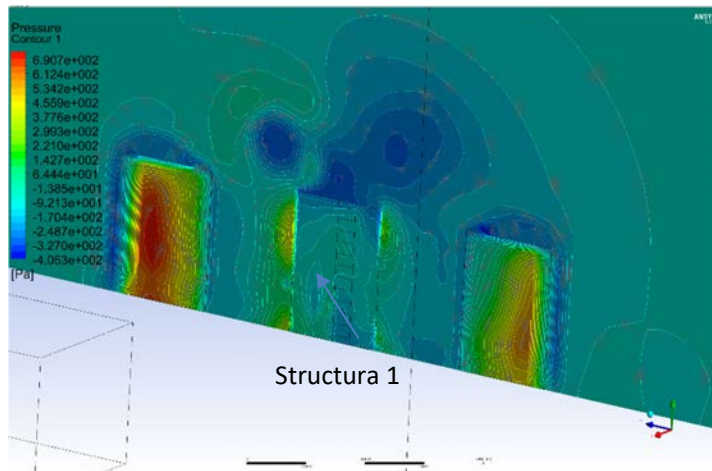


Fig. 6.14. Variația presiunii pe fațada expusă a Structurii 1 și a structurilor adiacente

Valorile presiunii sunt, în continuare, asociate structurilor analizate (Fig. 6.14) și, apoi, unei secțiuni transversale a acestora (Fig. 6.21, Fig. 6.22, Fig. 6.23). Analiza dinamică propriu-zisă poate fi abordată prin procedeele curente (analiză modală, analiză de tip *time-history*, etc). În analizele dinamice efectuate, presiunea a fost preluată pe fațada expusă vântului - $q_p(z, t)$ (Fig. 6.15, Fig. 6.16, Fig. 6.17) și pe fațada opusă - $q_s(z, t)$ (Fig. 6.18, Fig. 6.19, Fig. 6.20). Valorile prezentate - pentru diferite înălțimi z ale structurii - înglobează atât presiunea cât și sucțiunea. Evidențierea grafică a acțiunii vântului pe cele două fațade este prezentată prin variația presiunii pe cele două fațade la diferite înălțimi z ale celor trei structuri analizate.

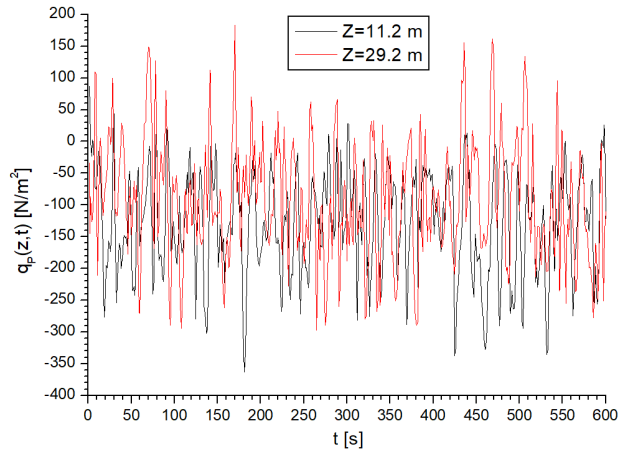


Fig. 6.15. Presiunea generată de vânt, fațada expusă, structura S1

În cazul structurii S1, așa cum este de așteptat, presiunea la înălțimea $z = 29,20$ m are variații largi de la valori pozitive la valori negative, în timp ce la înălțimea $z = 11,20$ m predomină acțiunea de tip sucțiune (Fig. 6.15).

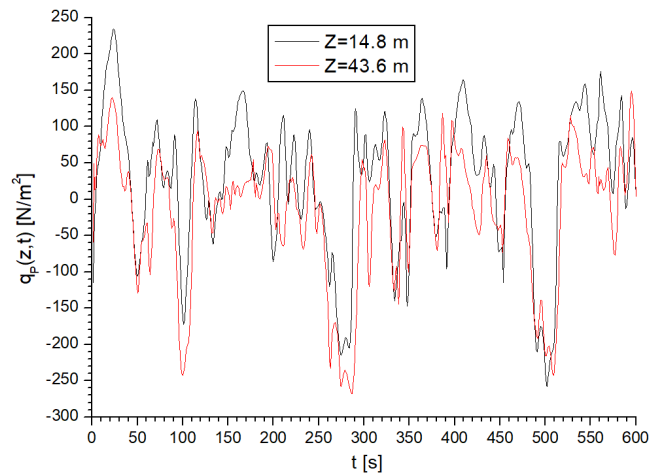


Fig. 6.16. Presiunea generată de vânt, fațada expusă, structura S2

O situație diferită este cea prezentată în Fig. 6.16 - cazul Structurii S2 la înălțimile $z = 14,80$ m și, respectiv $z = 43,60$ m: cele două componente (presiunea și sucțiunea) au variații cvasi-identice pe un mare interval de timp.

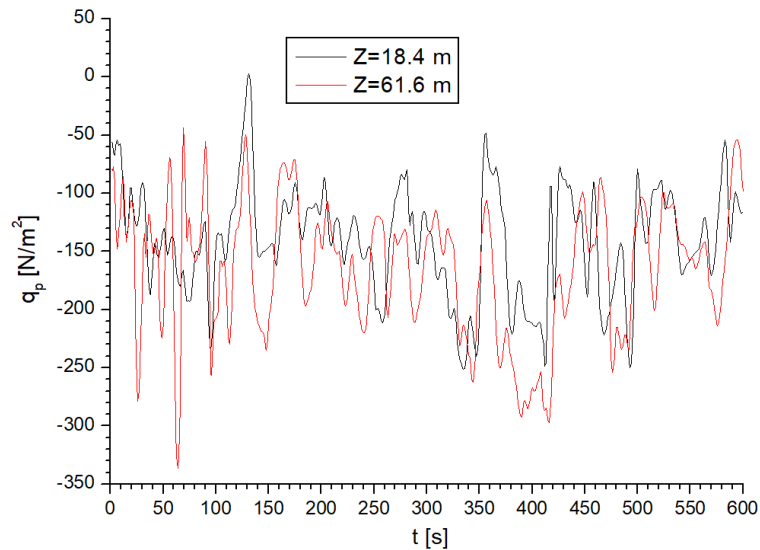


Fig. 6.17. Presiunea generată de vânt, fațada expusă, structura S3

Structura S3 având înălțimea de 76,00 m permite evidențierea variațiilor presiunii pe cele două fațade la înălțimi z mari. Pe fațada expusă (Fig. 6.17), se constată dominația exclusivă a acțiunii de tip sucțiune pe întregul interval de timp de 600 secunde și pe cea mai mare parte a înălțimii structurii.

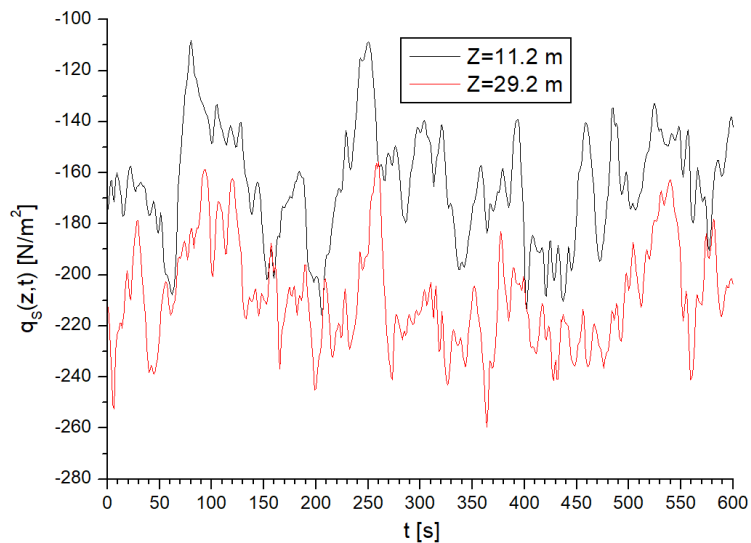


Fig. 6.18. Presiunea generată de vânt, fațada opusă, structura S1

Variația acțiunii vântului pe fațada opusă este prezentată în Fig. 6.18 ÷ Fig. 6.20. Din nou, sucțiunea predomină, iar înălțimea z este prezentă prin diferențe mai mici în cazul structurilor S2 și S3 (Fig. 6.19, Fig. 6.20) și mai mari - în cazul structurii S1 (Fig. 6.18).

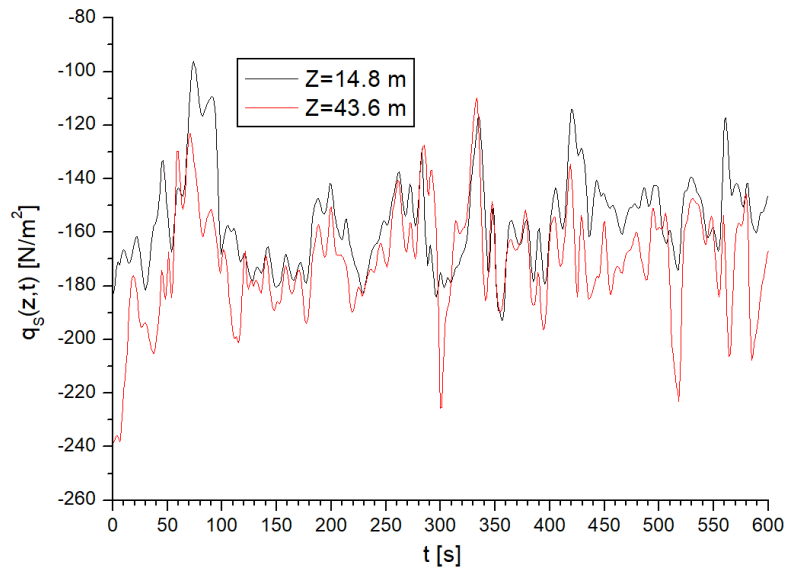


Fig. 6.19. Presiunea generată de vânt, fațada opusă, structura S2

Variația presiunii/sucțiunii a fost transformată în forțe concentrate aferente fiecărui nivel prin înmulțirea presiunii cu suprafața aferentă fiecărui nod de cadru. În Fig. 6.21 ÷ Fig. 6.23 este prezentată distribuția pe înălțime a forțelor concentrate de nivel. Valorile negative reprezintă sucțiune iar cele pozitive presiune.

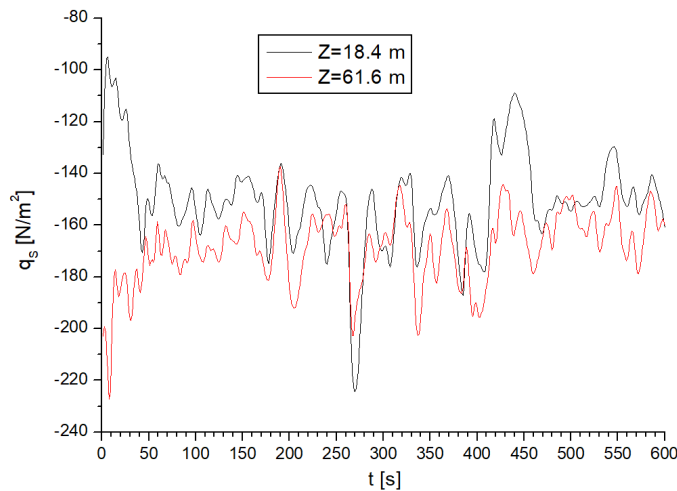


Fig. 6.20. Presiunea generată de vânt, fațada opusă, structura S3

În continuare, sunt prezentate - pentru fiecare structură - variațiile forțelor generate pe fațade atât ca funcții de timp cât și ca funcții de înălțimea z . Forțele de pe fațada expusă sunt referite $P_j(z, t)$, iar forțele generate pe fațada opusă sunt referite $S_j(z, t)$.

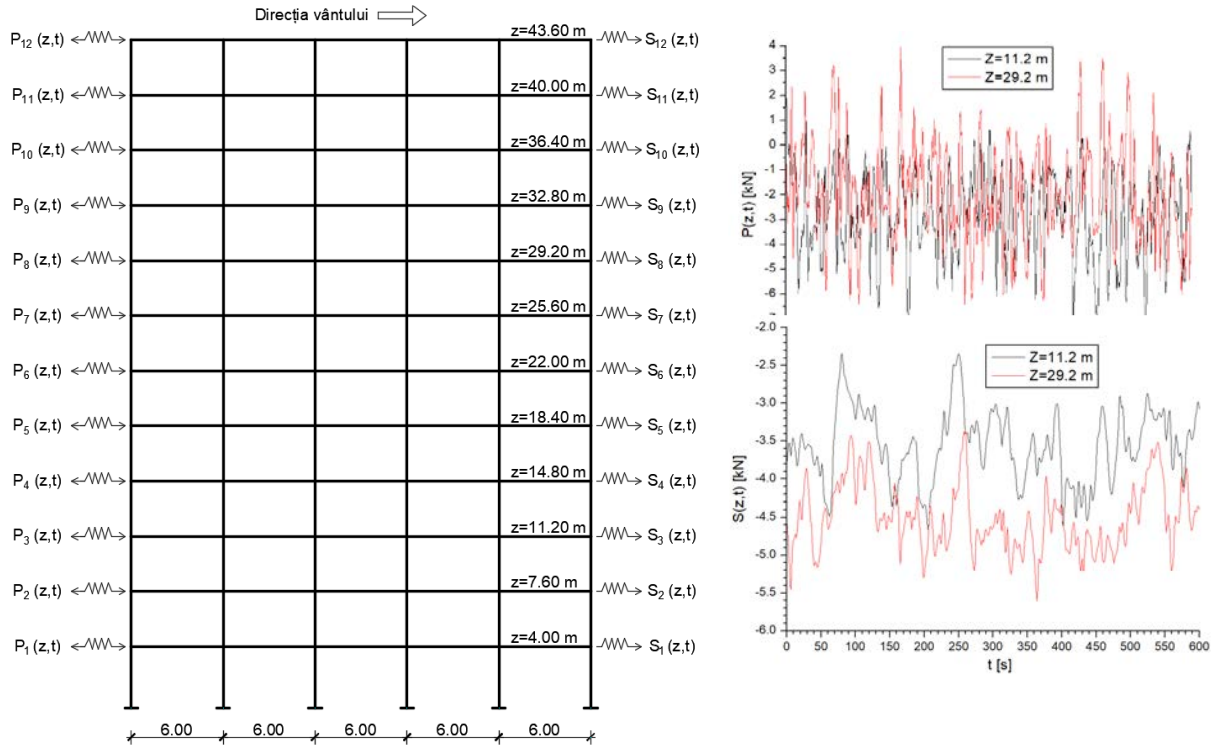


Fig. 6.21. Structura S1, distribuția forțelor concentrate de nivel

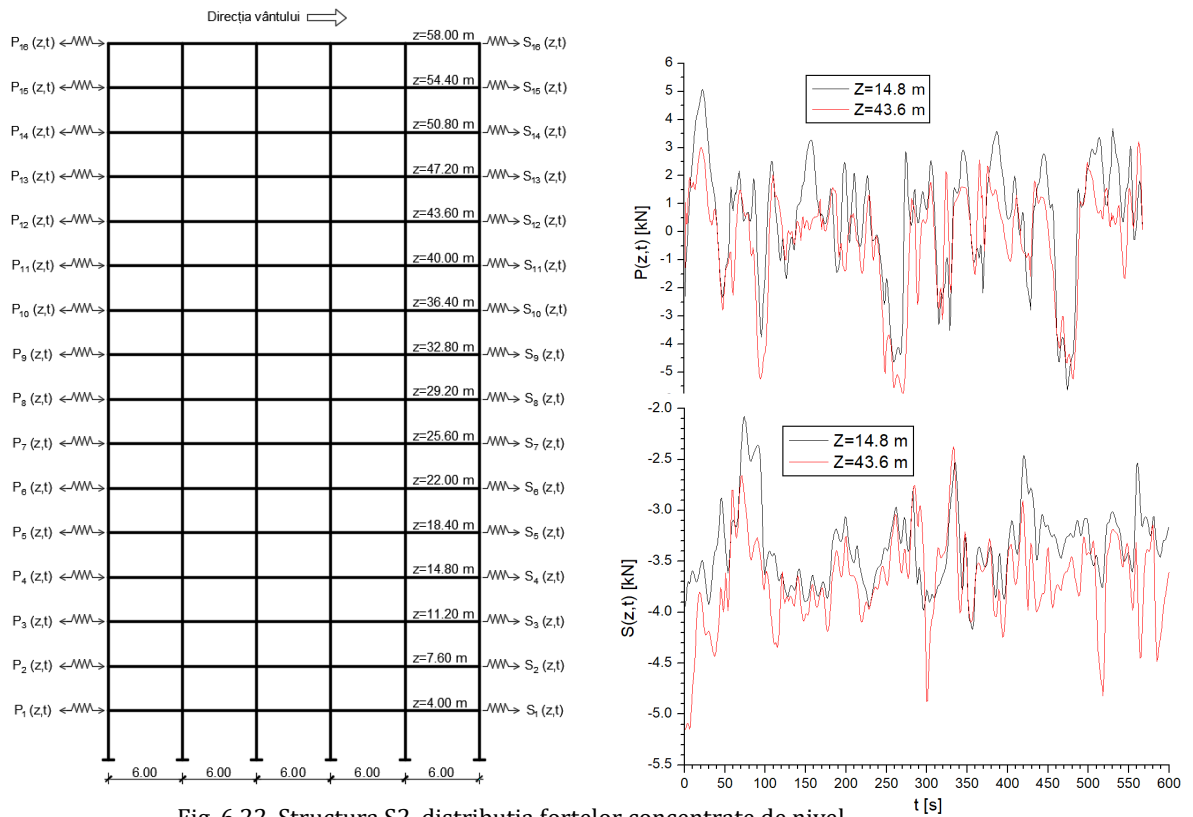


Fig. 6.22. Structura S2, distribuția forțelor concentrate de nivel

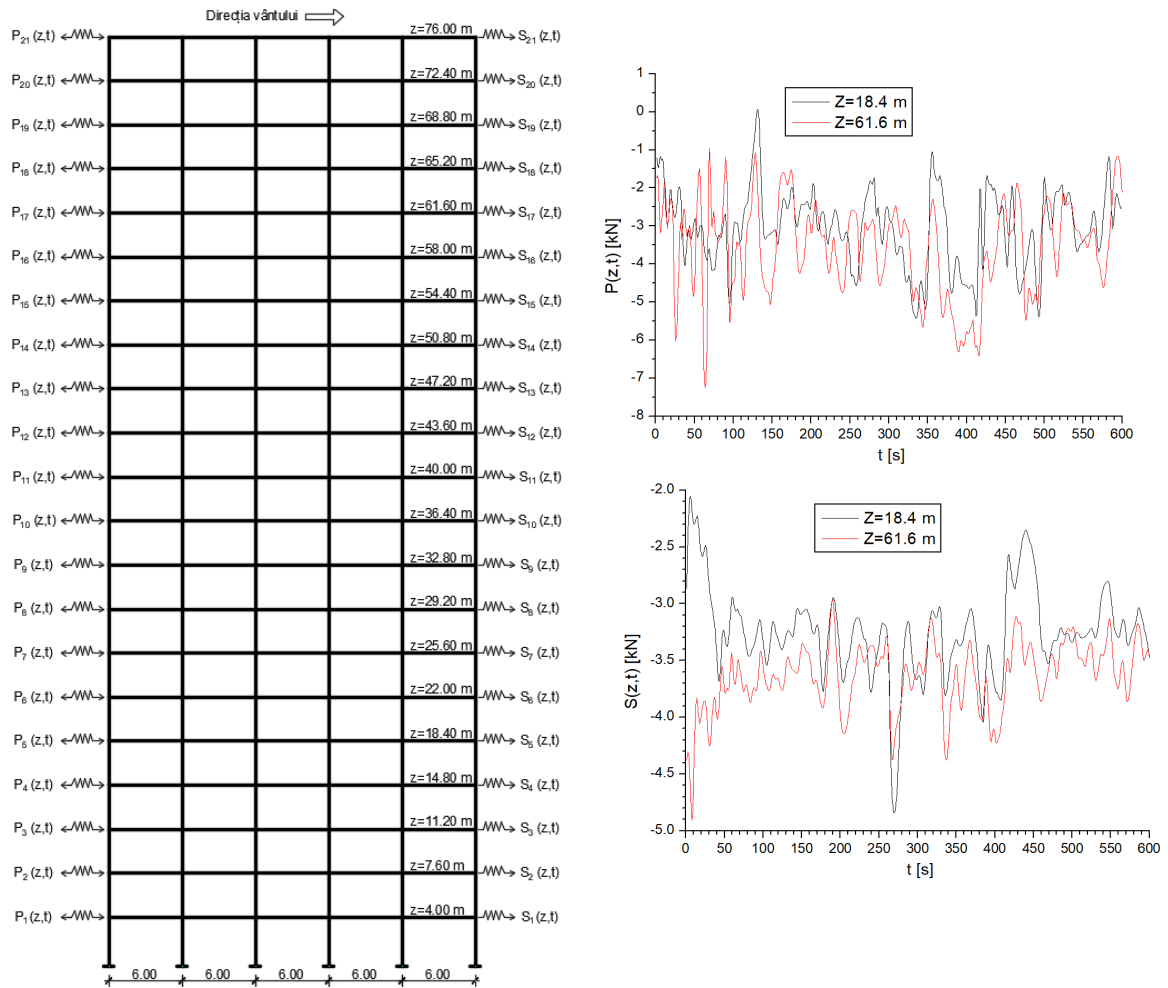


Fig. 6.23. Structura S3, distribuția forțelor concentrate de nivel

Dacă pe fațada neexpusă vântului forțele sunt exclusiv negative, pe fațada expusă, forțele generate de vânt oscilează între presiune și suucțiune. Această constatare este validă în cazul tuturor celor trei structuri. O astfel de acțiune - surprinzătoare versus variațiile cvasi-staționare - nu poate fi evidențiată decât prin abordarea CFD. Evidențierea forțelor din vânt și asocierea lor cu modelul dinamic cu număr finit de grade de libertate conduce la obținerea modelului dinamic clasic al structurilor multietajate.

6.4. Analiza structurală

Parametrii răspunsului structural la vânt sunt calculați într-o analiză elastic liniară, iar partea de răspuns dinamic este condusă prin abordarea specifică analizei modale. Analiza dinamică întreprinsă este condusă pe modelul clasic asociat structurilor multietajate: sistemul dinamic cu mase concentrate de nivel și număr finit de grade de libertate (deplasările laterale de nivel-Fig 6.24).

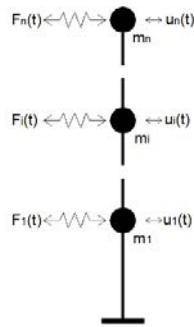


Fig. 6.24. Modelul dinamic cu n grade de libertate

6.5. Rezultate și comentarii

Rezultatele numerice obținute sunt prezentate grafic într-o manieră comparativă (structura de referință versus structurile cu mase adăugate; structura de referință versus structura cu amortizare liniar vâscoasă adăugată având valori ale fracțiunii de amortizare critică de 5%, 8%, 10%, 12%, 15% ; structura echipată cu contravântuiri versus structurile echipate cu amortizare; structura de referință în diferite situații de acțiuni dinamice) și comentate succint. Unul din termenii de comparație îl constituie parametrul asociat acțiunii cvasi-stactice a vântului conform normelor curente ale acțiunii vântului [1, 2]. Această comparație nu are ca obiectiv evidențierea rezultatelor generate de metoda cvasi-staționară ci evidențierea unor aspecte asociate exclusiv dinamicității sistemului analizat.

6.5.1. Deplasări laterale de nivel

Evidențierea valorilor și variației acestui parametru cinematic este, deja, tradițională în prezentarea rezultatelor și, în același timp, este cea mai populară asociere între acțiunea dinamică și structură - cel puțin în cazul analizelor seismice.

6.5.1.1. Abordarea cvasi-staționară

Variația în timp a deplasărilor laterale de nivel induse de acțiunile V1, V2, V3 prezintă o specificitate evidentă: deplasările laterale ale structurii nu sunt alternante ci sunt, la toate nivelurile, preponderent de aceeași parte a structurii (Fig. 6.25).

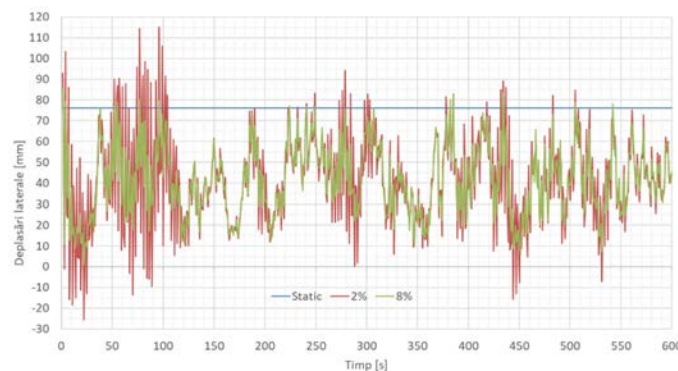


Fig. 6.25. Deplasări laterale, structura S1, vântul V1

Starea vibratorie indusă de vânt se deosebește de cea indusă seismic tocmai prin lipsa alternanței (față de poziția nedeformată) ceea ce influențează profund starea mecanică de eforturi și deformații a structurii.

Deși rezultatele cercetării prezentate în continuare nu au ca obiectiv compararea valorilor maxime obținute prin analize dinamice cu valoarea maximă asociată analizei cvasi-stactice, valoarea obținută prin această a doua abordare este, de asemenea, prezentată. În cazul acțiunii dinamice a vântului V1 asupra structurii S1 se constată - conform așteptărilor - o reducere a valorilor deplasărilor laterale a structurii echipată cu amortizare adăugată având valoarea fracțiunii de amortizare critică $\zeta=8\%$. Reducerea valorilor deplasărilor laterale este de până la 26% (Fig. 6.25)

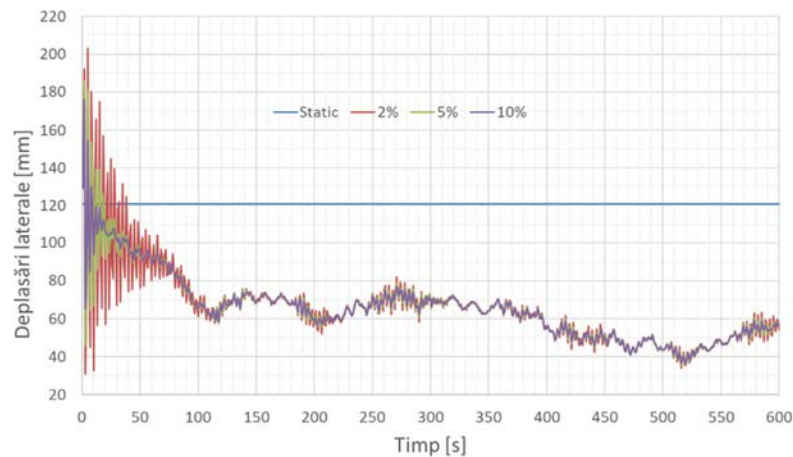


Fig. 6.26. Deplasări laterale, structura S2, vântul V2

O stare de vibrație profund nestaționară se constată în comportarea structurii S2 sub acțiunea vântului V2 în toate cele trei situații de echipare cu amortizare liniar vâscoasă adăugată (având $\zeta=5\%$ și, respectiv $\zeta=10\%$) într-o fază inițială de cca. 70 sec.-80 sec. (Fig. 6.26). În ceea ce privește eficiența nivelului de amortizare adăugată, așteptarea este - din nou - confirmată: echiparea cu amortizare $\zeta=5\%$ generează o reducere de 7% în tip ce amortizarea $\zeta=10\%$ reduce aceleași deplasări laterale cu 14% (Fig. 6.26). O stare de vibrații cvasi-staționară și practic fără diferențe între nivelurile de amortizare adăugată se instituie după primele 70 sec.-80 sec.

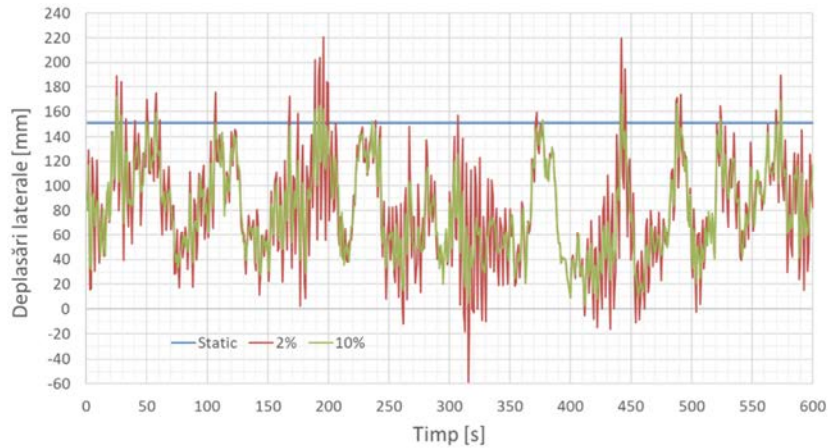


Fig. 6.27. Deplasări laterale, structura S3, vântul V3

O eficiență de cca. 11% a amortizării adăugate ($\zeta=10\%$) se contată și în cazul acțiunii dinamice V3 asupra structurii S3 (Fig. 6.27). Și în acest caz - ca în toate cazurile de altfel - se constată „acțiunea promptă” a amortizării adăugate prin lipsa defazării între mișcarea neamortizată ($\zeta=2\%$) și cea amortizată cu $\zeta=10\%$ (Fig. 6.25÷Fig. 6.27).

Starea vibratorie indusă de acțiunea dinamică a vântului depinde profund de dinamicitatea acestuia: aplicate structurii S1, vântul V1 și vântul V2 generează vibrații structurale laterale cu amplitudini mari în timp ce vântul V2 conduce la o stare vibratorie cvasi-staționară (Fig. 6.28).

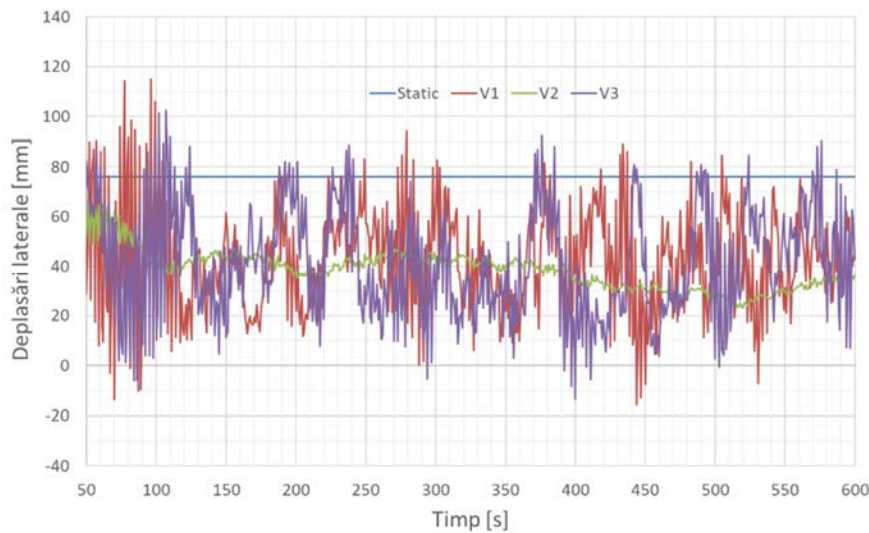


Fig. 6.28. Deplasări laterale, structura S1, $\zeta=2\%$

În Fig. 6.29 și Fig. 6.30 sunt prezentate stările vibratorii induse de cele trei acțiuni dinamice structurilor S2 și, respectiv S3.

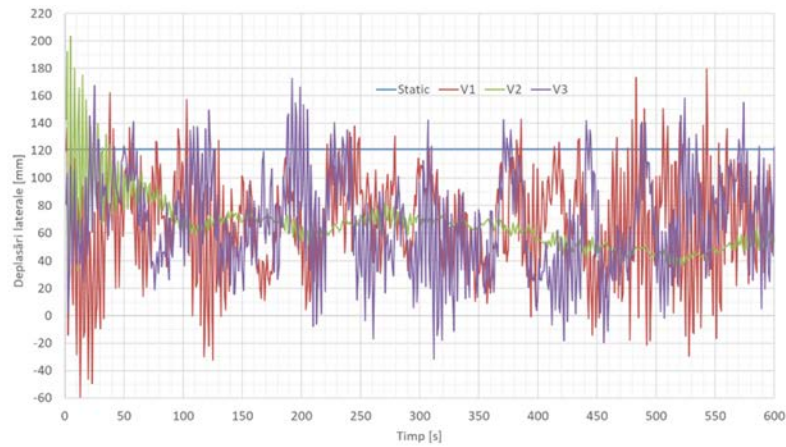


Fig. 6.29. Deplasări laterale, structura S2, $\zeta=2\%$

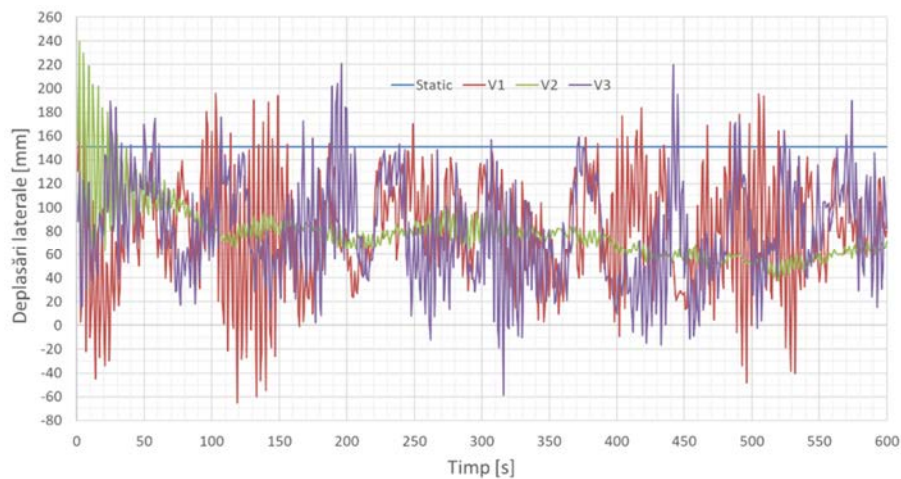


Fig. 6.30. Deplasări laterale, structura S3, $\zeta=2\%$

După un scurt interval inițial, se observă din nou aceleași diferențe între stările vibratorii generate de acțiunile V1 și V3 - pe de o parte și acțiunea V1 - pe de altă parte (Fig. 6.29, Fig. 6.30).

În continuare sunt prezentate în același mod comparativ efectele maselor adăugate în variantele TMD1 și, respectiv TMD2 asupra deplasărilor laterale de nivel induse de cele trei acțiuni dinamice celor trei structuri astfel echipate (Fig. 6.31÷Fig. 6.38).

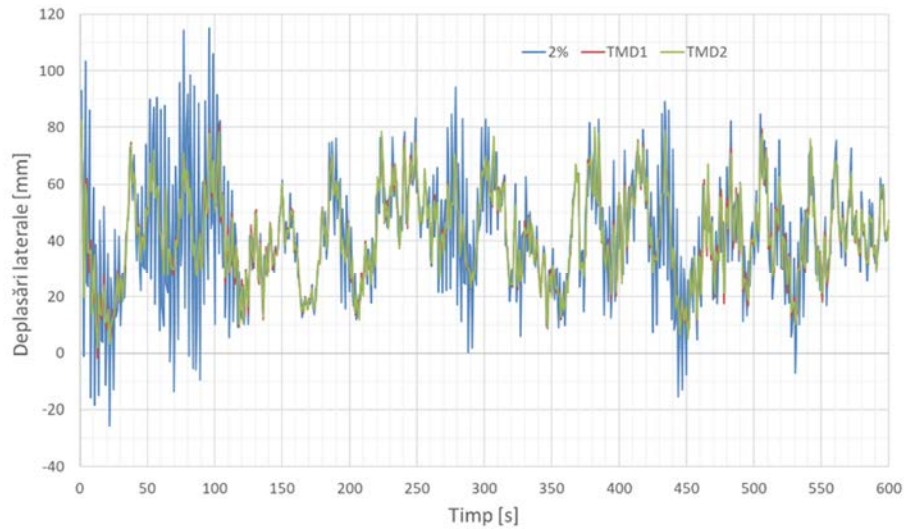


Fig. 6.31. Deplasări laterale, structura S1, vântul V1

Constatarea principală este că echiparea structurilor cu mase adăugate este mai eficientă în reducerea deplasărilor laterale de nivel decât amortizarea adăugată. Astfel, în cazul structurii S1 acționată de vântul V1 reducerea este de 30% în faza deplasărilor laterale maxime (Fig. 6.31, Fig. 6.32). De asemenea, se constată că în intervalele cu vibrații laterale reduse eficiența echipării cu mase adăugate este ne semnificativă.

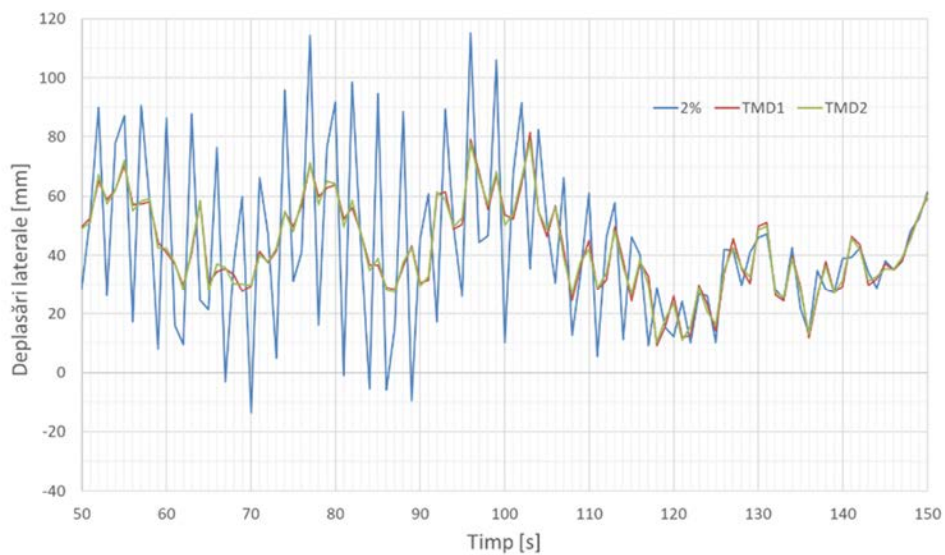


Fig. 6.32. Deplasări laterale, structura S1, vântul V1 ($t \in [50; 150]$)

În ceea ce privește diferența între echipările TMD1 și, respectiv TMD2, acestea nu sunt semnificative.

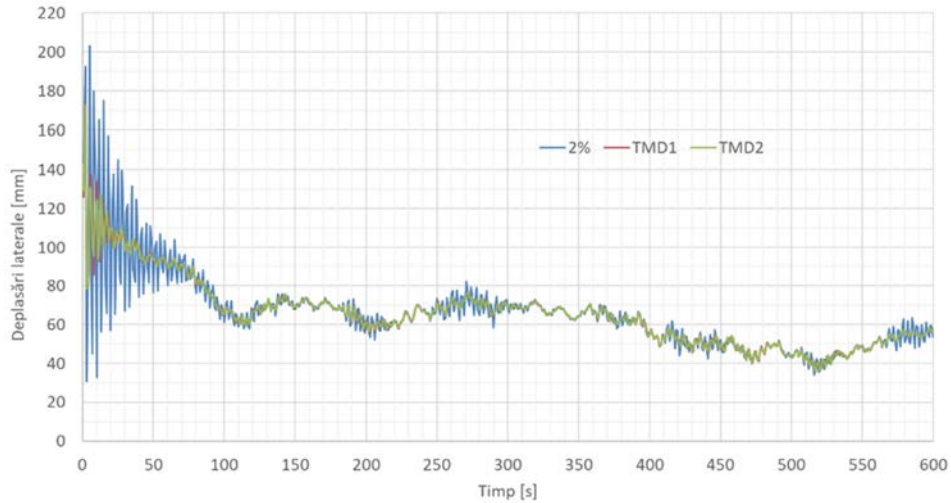


Fig. 6.33. Deplasări laterale, structura S2, vântul V2

În ceea ce privește starea vibratorie indusă de vântul V2 structurii S2, se constată - din nou - amplitudini mari în intervalul inițial și instalarea unei stări cvasi-staționare și fără efecte semnificative ale echipării cu mase adăugate (Fig. 6.33).

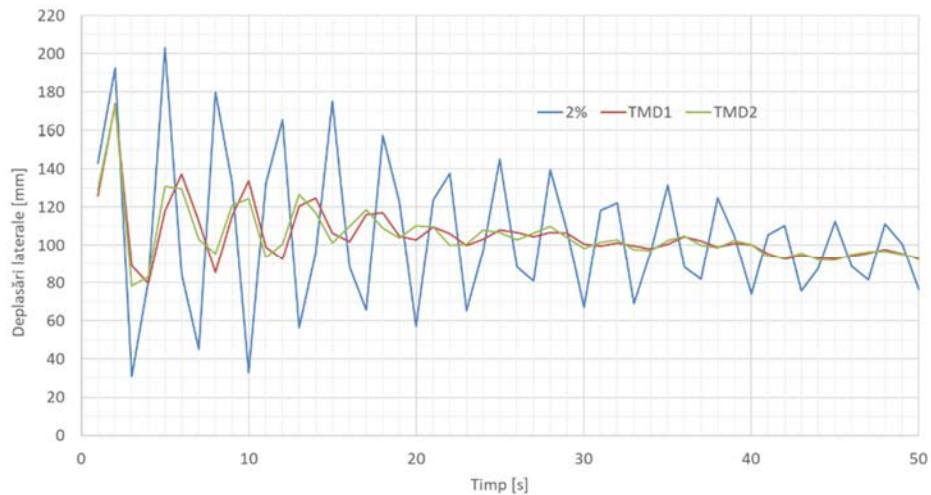


Fig. 6.34. Deplasări laterale, structura S2, vântul V2 ($t \in [0 \div 50]$)

În intervalul inițial de până la cca. 50 sec. eficiența echipării cu mase adăugate este evidentă atât prin reducerea valorilor maxime ale deplasărilor laterale de nivel (cu cca. 28%) cât și prin instalarea rapidă a unei stări pseudo-vibratorii (Fig. 6.34).

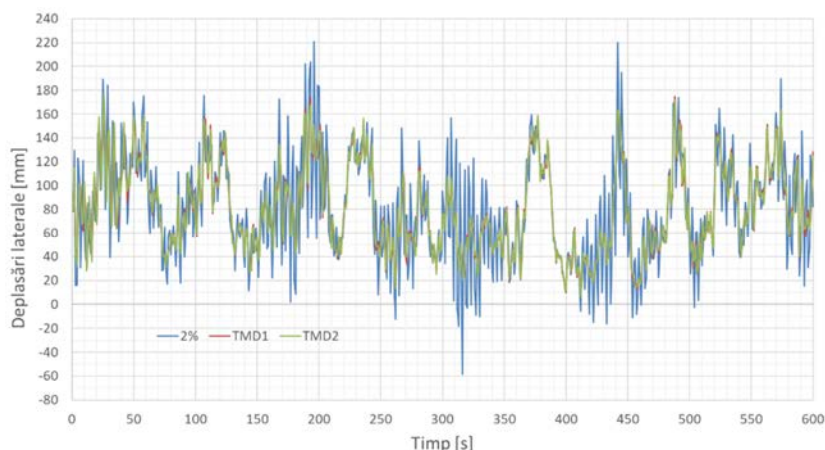


Fig. 6.35. Deplasări laterale, structura S3, vântul V3

Ca în cazurile structurilor S1, S2 și în cazul structurii S3 se constată o eficiență mai mare a echipării cu mase adăugate în intervalele cu deplasări laterale de nivel maxime. Astfel, sub acțiunea dinamică V3, reducerea valorilor maxime ale deplasărilor laterale de nivel este de pana la 17% (Fig. 6.35).

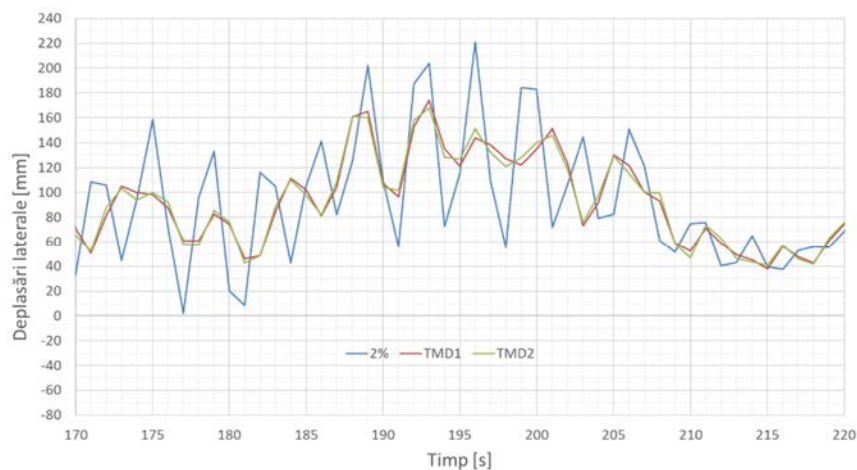


Fig. 6.36. Deplasări laterale, structura S3, vântul V3 ($t \in [170 \div 220]$)

În intervalul de timp dintre secundele 170 și, respectiv 220 starea vibratorie este relativ pronunțată atât în cazul structurii neechipate cât și al structurii echipate cu mase adăugate. În acest interval eficiența echipării cu mase adăugate este, la rândul său maximă în timp ce în intervale cu mișcări vibratorii reduse (cum este cel dintre secundele 210 și 220), eficiența maselor adăugate este aproape nulă (Fig. 6.36).

În analizele curente ale structurilor acționate seismic și echipate cu amortizare pasivă via amortizori vâscoși sau mase adăugate, un aspect colateral dar important este echivalarea nivelului de amortizare generat de masa adăugată prin exprimarea acestuia prin valori

ale fracțiunii de amortizare critică [92]. Rezultatele acestor analize comparative sunt importante și utile în modelarea structurilor acționate dinamic și echipate cu mase adăugate. Echivalarea stării de amortizare generată de masele adăugate ca un nivel de amortizare definit printr-o valoare adecvată / echivalentă a fracțiunii de amortizare critică, permit utilizarea simplă și directă a produselor comerciale curente de analiză structurală.

O astfel de comparație / echivalare este prezentată în Fig. 6.37÷Fig. 6.40.

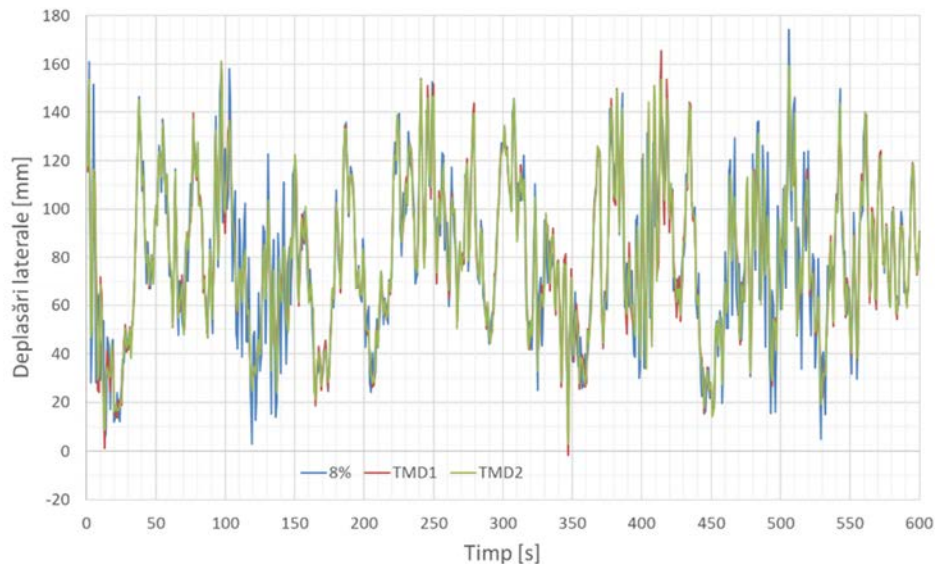


Fig. 6.37. Deplasări laterale, structura S3, vântul V1

Asfel, în cazul acțiunii V1 asupra structurii S3 se constată că echiparea cu mase adăugate este aproximativ echivalentă cu un nivel de amortizare liniar vâscoasă cu $\zeta=8\%$ (Fig. 6.37) - în primul rând în zonele cu deplasări mari, în timp ce în intervalele de timp cu deplasări laterale reduse, eficiența echipării cu mase adăugate este redusă față de același nivel de 8% (Fig. 3.38).

În continuare sunt prezentate comparativ rezultatele numerice ale analizelor structurale în cazul echipărilor cu mase adăugate și, respectiv cu amortizare liniar vâscoasă adăugată.

Echiparea cu amortizare adăugată având $\zeta=10\%$ și, respectiv cu cele două variante TMD1 și TMD2 de mase adăugate a structurii S2 sub acțiunea dinamică V3 evidențiază o echivalență aproape totală a celor două procedee (TMD1 și, respectiv TMD2) de generare a stării de amortizare (Fig. 6.38).

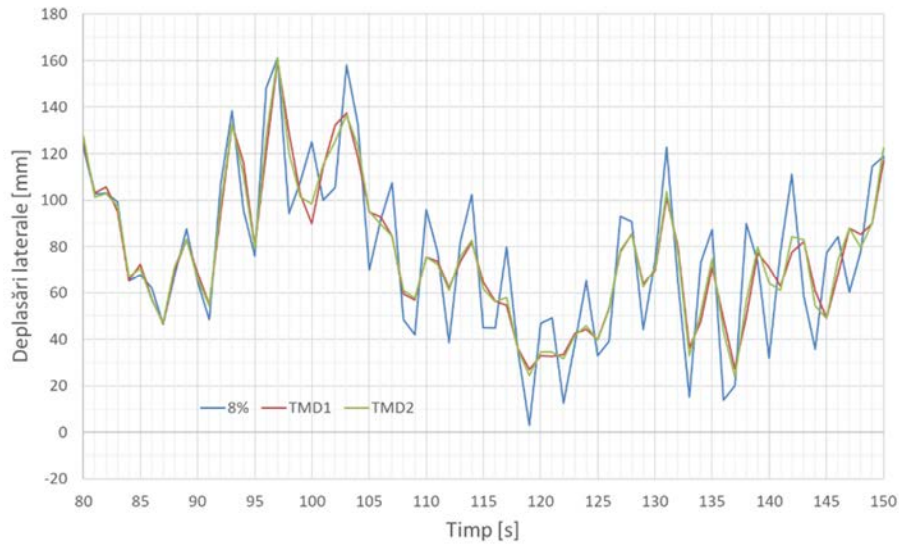


Fig. 6.38. Deplasări laterale, structura S3, vântul V1 ($t \in [80 \div 150]$)

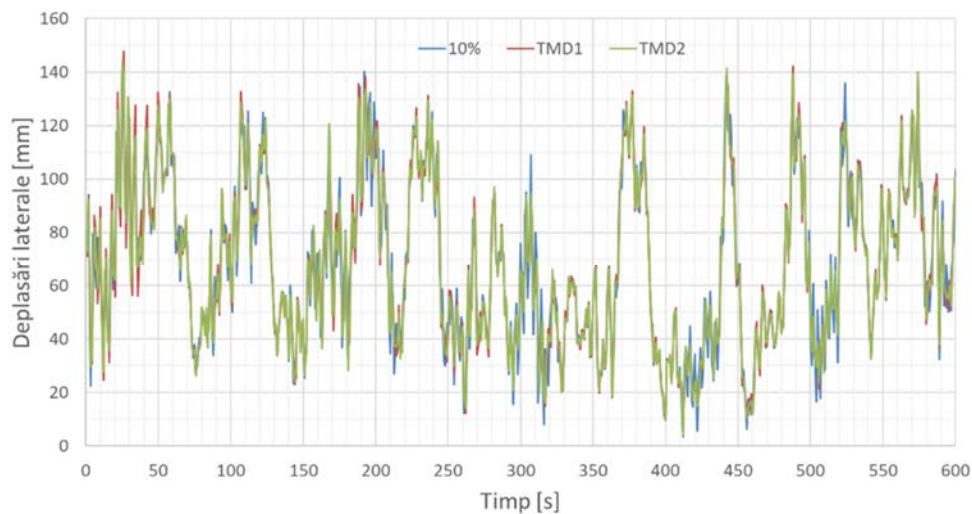


Fig. 6.39. Deplasări laterale, structura S2, vântul V3

În ceea ce privește compararea eficienței sistemului cu mase adăugate cu nivelul de amortizare de 10% (Fig. 6.39), se constată o cvasi-eficacitate cu o ușoară prevalență a sistemului cu mase adăugate (Fig. 6.39, Fig. 6.40). Se constată, de asemenea, că ambele modalități sunt eficiente în intervalele de timp cu deplasări laterale de nivel având valori extreme. Pe de altă parte, diferențele între eficacitatea celor două sisteme, TMD1 și, respectiv TMD2 sunt, din nou, mici.

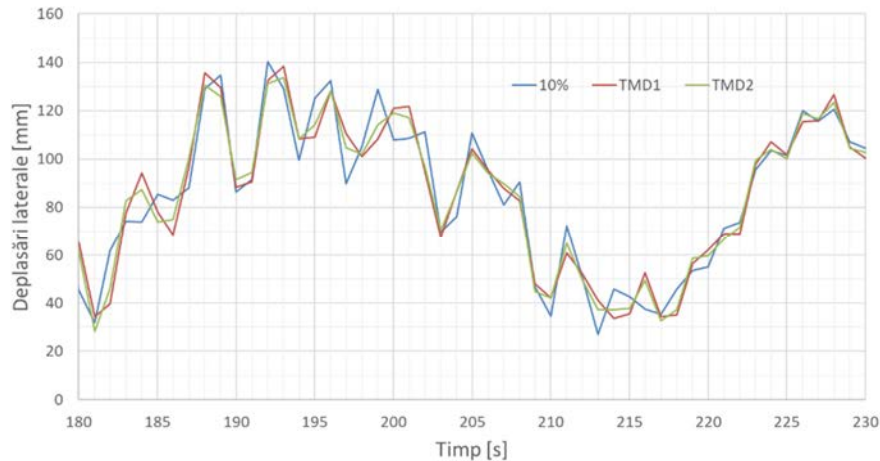


Fig. 6.40. Deplasări laterale, structura S2, vântul V3 ($t \in [180 \div 230]$)

În activitatea de proiectare a structurilor multietajate acționate dinamic (cutremure, vânt) soluția încă tradițională este prevederea sistemelor de contravânturi. Într-adevăr, prevederea contravântuirilor rezolvă în mare măsură încadrarea structurii proiectate în prevederile normative de tip SLS prin creșterea semnificativă a rigidității laterale a acestor structuri și reducerea importantă a deplasărilor laterale de nivel. În cazul structurilor acționate exclusiv seismic creșterea rigidității laterale conduce și la creșterea forței tăietoare seismice de bază astfel că, cele două consecințe (cea favorabilă-reducerea deplasărilor laterale de nivel și, respectiv cea defavorabilă-creșterea forței tăietoare seismice de bază) trebuie considerate împreună pentru a obține nivelul optim al rigidității laterale [92].

În cazul acțiunii dinamice a vântului prevederea sistemelor de contravântuire a structurilor metalice multietajate „rezolvă” într-o măsură cvasi-totală reducerea deplasărilor laterale de nivel (Fig. 6.41) deși creșterea rigidității laterale prin contravânturi nu conduce - în aceeași măsură ca în cazul acțiunii seismice - la creșterea semnificativă a forței tăietoare de bază din vânt (Fig. 6.57). În schimb creșterea rigidității laterale a structurii contravântuite generează o stare cinematică de accelerații crescute față de structura de referință (Fig. 6.48).

În cazul acțiunii V1 asupra structurii S1 variația valorilor deplasărilor laterale de nivel este prezentată comparativ (Fig. 6.41) pentru structura de referință, structura echipată cu mase adăugate și, respectiv structura contravântuită (Fig. 6.2). Și în cazul acțiunii dinamice a vântului, la fel ca în cazul acțiunii dinamice a cutremurului, se constată necesitatea evaluării concomitente a eficienței contravântuirilor atât din punct de vedere a stării statice induse (exprimată prin forța tăietoare de bază) cât și al stării cinemate generate exprimată prin deplasări laterale de nivel și, respectiv accelerații laterale de nivel.

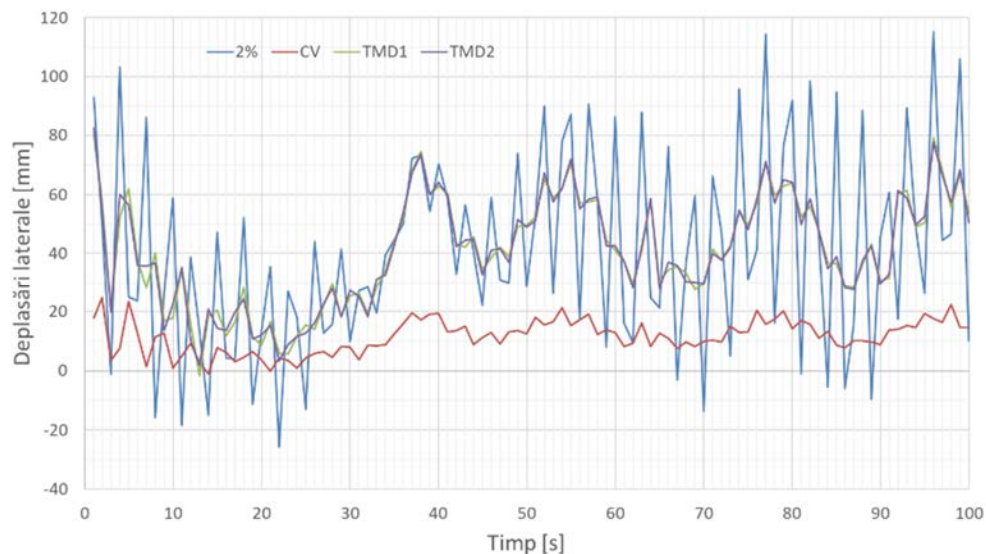


Fig. 6.41. Deplasări laterale, structura S1, vântul V1 ($t \in [0+100]$)

6.5.1.2. Abordarea CFD

Considerarea dinamicității acțiunii vântului prin transformarea vitezei în presiune și a acesteia în forțe dinamice aplicate structurii este o cale firească de analiză a structurilor, mai ales în contextul actual în care vântul și rezultatele catastrofelor generate de acțiunea acestuia sunt evenimente aproape cotidiene. În același timp, vântul constituie doar o formă specifică a contextului mai larg al dinamicii fluidelor în care vântul este inclus cu specificitățile sale adecvate densității aerului, geometria fluxului acestui fluid, viteza și condițiile de contur. Această abordare, mult mai cuprinzătoare, conduce la abordarea acțiunii dinamice a vântului asupra structurilor prin metodele *Dinamicii Fluidelor* (Computational Fluid Dynamics-CFD). Încadrarea acțiunii dinamice a vântului în contextul CFD implică considerarea cât mai fidelă a interacțiunii vânt- formă structurală, mai ales în cadrul structurilor multi-etajate. Interacțiunile mecanice dintre structura analizată și mediul în care este amplasată, cum sunt interacțiunile structură-teren, structură-vânt constituie tendința actuală în domeniul analizei structurilor acționate de vânt [31, 32]. Tehnica modelării sistemului interacțional structură-vânt se dovedește cea specifică metodei elementelor finite [119, 120]. Parametrii care definesc interacțiunea în contextul abordării CFD sunt viteza vântului, rugozitatea amplasamentului, densitatea și înălțimea construcțiilor de pe amplasament și geometria secțională a unui tunel virtual (domeniu de calcul). Conceptul de *Tunel Virtual* este, probabil, cel mai nou în astfel de analize pentru că mai vechiul tunel real este, de asemenea, nelipsit în partea experimentală asociată analizelor. Crearea tunelului virtual (Fig. 3.3) include definirea amplasamentului (rugozitatea terenului, geometria construcțiilor de pe amplasament, pozițiile reciproce a acestor construcții și viteza de intrare a vântului în tunel. În continuare sunt prezentate rezultatele numerice obținute printr-o astfel de abordare CFD

prin modelarea unor tuneluri vituale care includ structurile S1, S2 și S3 în formă tridimensională.

Rezultatele numerice obținute în abordarea CFD se referă la deplasările laterale de nivel, accelerațiile laterale de nivel, componentele energetice E_i , E_d și forța tăietoare de bază.

Și în această abordare rezultatele sunt prezentate comparativ: structura echipată cu amortizare adăugată, cu mase adăugate, cu contravântuiri versus structura de referință. În cazul structurii echipate cu un nivel de amortizare asociat valorii de 10% a fracțiunii de amortizare critică se constată (Fig. 6.42) o eficiență redusă a amortizării adăugate.

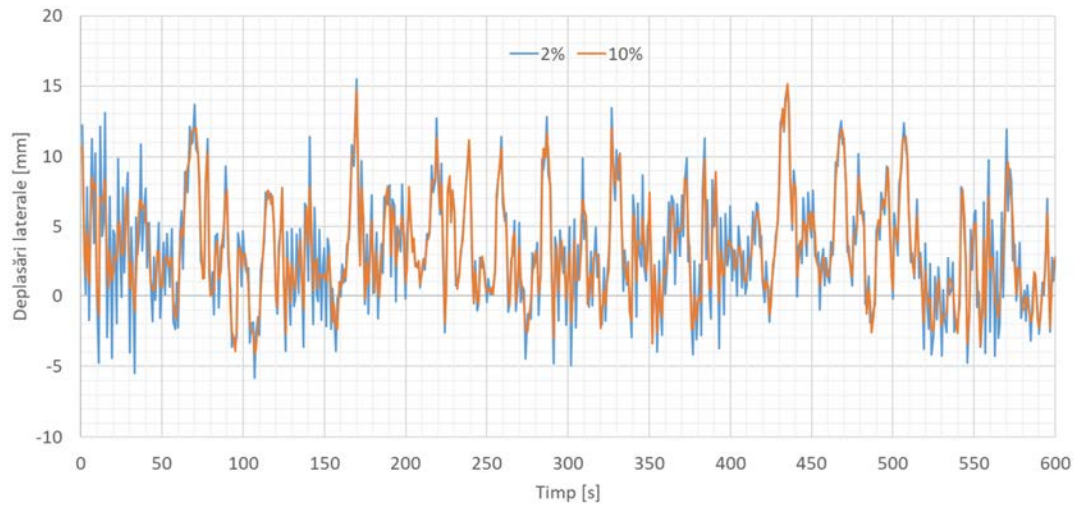


Fig. 6.42. Deplasări laterale, structura S1, vântul CFD

Rezultatele numerice evidențiază posibilitatea echivalării eficienței echipării cu sistemele TMD1 și TMD2 printr-un nivel adecvat de amortizare adăugată. Astfel se constată că cele două echipări TMD1 și TMD2 sunt, pe de o parte, cvasi-echivalente și, pe de altă parte, echivalente cu un nivel de amortizare liniar vâscoasă de 8% (Fig. 6.43). Se constată, de asemenea o diminuare a caracterului vibratoriu al mișcării induse structurii după un prim interval de cca. 20 de secunde.

Referitor la valorilor absolute ale deplasărilor calculate prin abordarea CFD, se constată o diminuare accentuată a acestora atât în cazul structurii de referință cât și în cazul structurilor echipate (Fig. 6.42-Fig. 6.44). Acest efect de reducere a stării cinemate a structurii în abordarea CFD față de abordarea cvasi-staționară este un rezultat de așteptat având în vedere variația total diferită a presiunii (relativ mari) generate în abordarea cvasi-staționară față de presiunea (relativ mică) asociată abordării CFD. Într-adevăr, în cazul abordării CFD care consideră obstacolele de pe amplasament (rugozitatea terenului, construcțiile învecinate), presiunea exercitată de vânt pe structura analizată este, pe de o parte, mai mică și, pe de altă parte are un caracter profund aleatoriu în ceea ce privește sensul de acțiune (Fig. 3.12÷Fig. 3.14). Acesta este momentul și contextul în care trebuie remarcat faptul că, deși valorile deplasărilor laterale în abordarea CFD sunt mai mici, valorile medii ale presiunilor asociate unei viteze medii de

27,0 m/s de cca. 700,0 Pa (Fig. 6.8) și valorile maxime ale presiunii asociate abordării CFD de cca. 690,0 Pa (Fig. 6.14) sunt apropiate.

Autorul acestei teze consideră că interacțiunea vânt - formă structurală care generează variația profundă a presiunilor în abordarea CFD atât ca valori cât și ca sens de acțiune (de la -300,0 Pa la +100,0 Pa - în cazul structurii S1 - Fig. 6.14) este mai aproape de realitate decât abordarea dinamică cvasi-staționară.

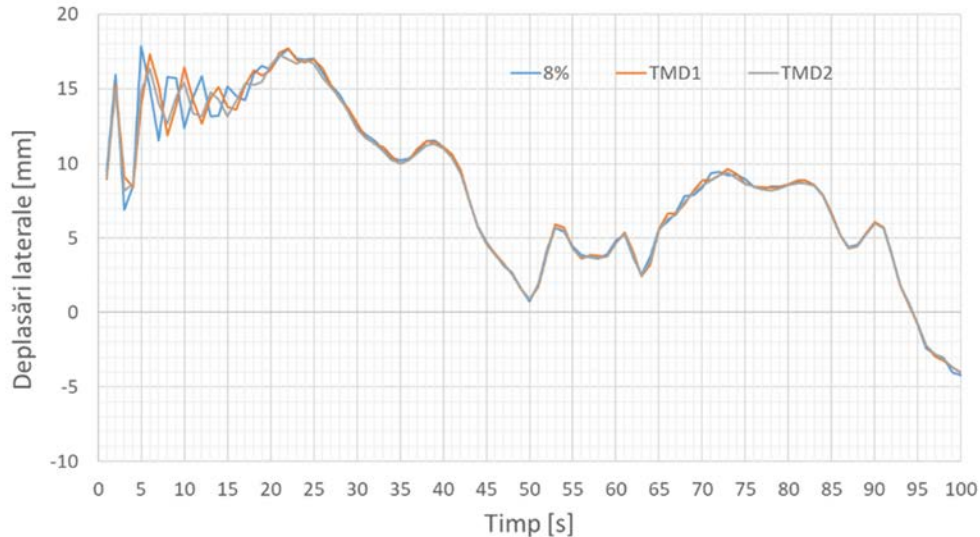


Fig. 6.43. Deplasări laterale, structura S2, vântul CFD ($t \in [0 \div 100]$)

Rezultatele în valorile deplasărilor laterale de nivel obținute în cazul echipării cu amortizare liniar vâscoasă având $\zeta=10\%$ (Fig. 6.44) evidențiază echivalarea și a acestui nivel de amortizare cu efectul echipării structurii cu sistemele TMD1 și TMD2. Se poate concluziona că echiparea clasică cu mase adăugate amplasate la ultimul nivel (TMD1) sau la un nivel intermediar (TMD2) este echivalentă din punct de vedere al efectului de reducere a deplasărilor laterale, cu un nivel de 8% până la 10% al amortizării liniar vâscoase adăugate.

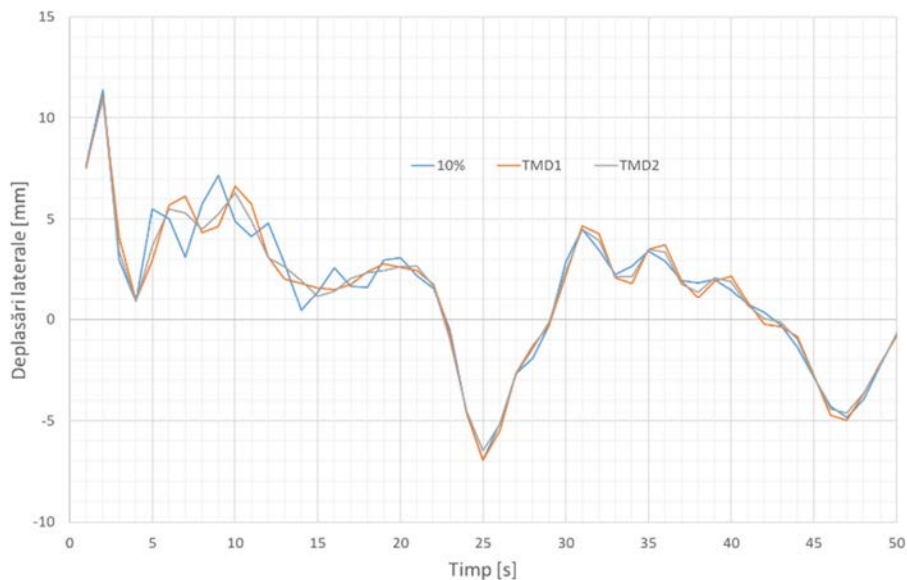


Fig. 6.44. Deplasări laterale, structura S3, vântul CFD ($t \in [0 \div 50]$)

6.5.2. Accelații laterale de nivel

Exprimarea răspunsului dinamic al unei structuri acționată fie de cutremur fie de vânt în accelerații laterale de nivel constituie un aspect relativ nou, deși este de multă vreme demonstrat că daunele produse unei structuri înalte corect alcătuite și dimensionate secțional sunt mai mici decât daunele produse sistemelor asociate funcțiunii clădirii (echipamente specifice etc.). Normativele de proiectare conțin reguli și prevederi care asigură performanțele structurii în sine - dar nu întodeauna și prevederi referitoare la utilizatorii clădirii și la echipamentele adăpostite. Dar accelerațiile mișcărilor vibratorii induse structurii generează forțe de inerție și asupra utilizatorilor și a echipamentelor de pe planșee. În cazul acțiunii dinamice a vântului, normativele de proiectare prevăd valori maxime admisibile ale accelerațiilor laterale de nivel [1, 2] pentru protejarea utilizatorilor clădirii.

În ceea ce urmează sunt prezentate grafic câteva rezultate numerice ale variației accelerațiilor laterale de nivel ale structurilor studiate acționate de vânt în abordarea cvasi-staționară și în abordarea CFD. Rezultatele sunt, din nou, prezentate comparativ pentru a avea și din acest punct de vedere al accelerațiilor laterale de nivel un criteriu de evaluare a eficienței echipării cu amotizare adăugată, cu mase adăugate și, respectiv cu contravântuiri.

6.5.2.1. Abordarea cvasi-staționară

În cazul structurii S1 sub acțiunea V1 se constată o reducere semnificativă a valorilor accelerațiilor laterale de nivel: de cca. 40% în cazul structurii echipate cu amotizare adăugată de 5% și, respectiv de cca. 60% în cazul structurii echipate cu amotizare adăugată de 10% (Fig. 6.45)

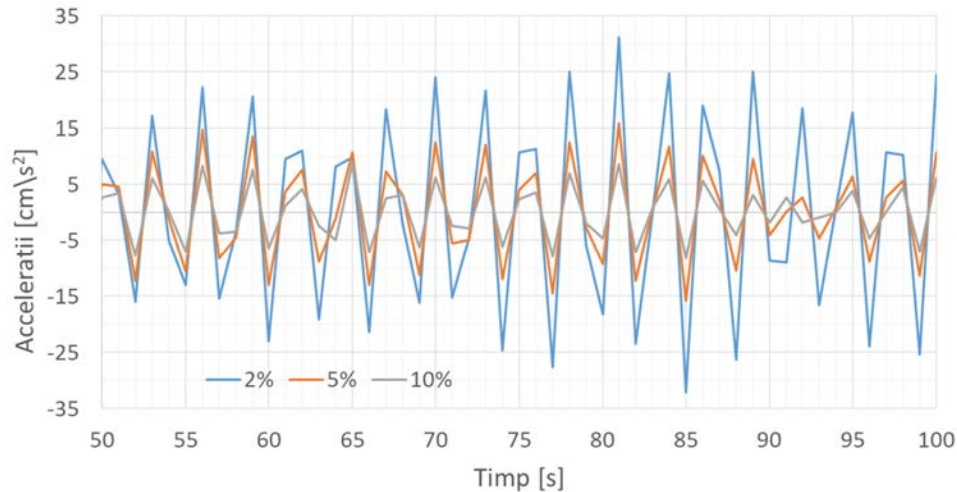


Fig. 6.45. Accelații ale ultimului nivel, structura S1, vântul V1 ($t \in [50 \div 100]$)

În cazul astructurii S2, rezultatele numerice prezentate se referă la acțiunea V2 și la echiparea cu sistemele TMD1 și, respectiv TMD2.

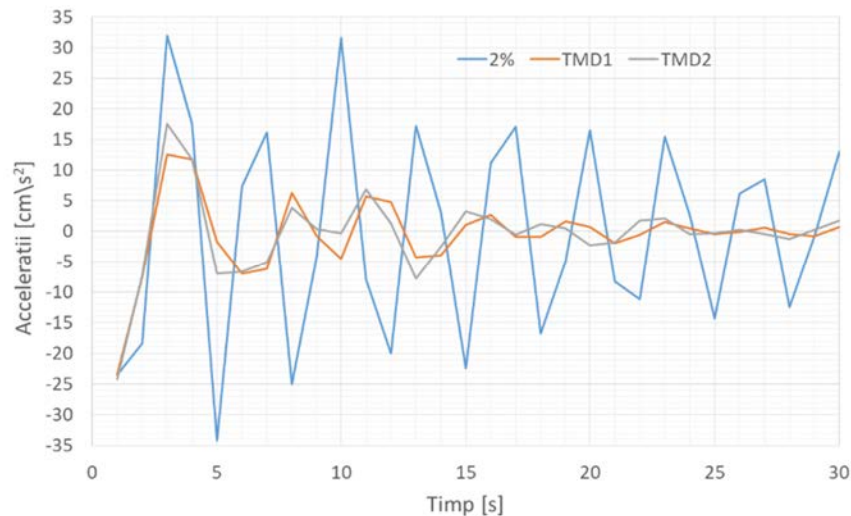


Fig. 6.46. Accelații ale ultimului nivel, structura S2, vântul V2 ($t \in [0 \div 30]$)

Se constată că echiparea cu mase adăugate reduce dramatic valorile de vârf ale accelerațiilor laterale de nivel cu până la 60% (Fig. 6.46). În același timp se constată un efect de reducere nu numai a valorilor accelerațiilor ci și a stării vibratorii însăși după un scurt interval de timp (de cca. patru perioade proprii de vibrație).

Efectul de reducere a valorilor accelerațiilor laterale de nivel în cazul structurilor echipate cu amotizare adăugată sau cu mase adăugate se constată și în cazul structurii S3 sub acțiunea dinamică V3. Reducerea valorilor accelerațiilor structurii echipate cu

amortizare dăugată de 8% este - din nou - semnificativă, dar echiparea cu sitemul TMD1 generează aceeași „calmare” a stării vibratorii (Fig.6.47).

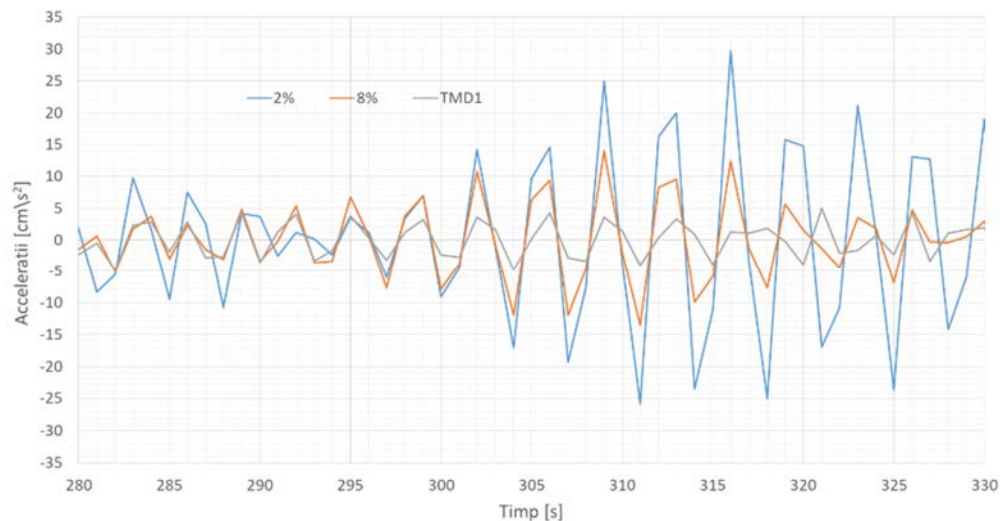


Fig. 6.47. Accelații ale ultimului nivel, structura S3, vântul V3 ($t \in [280\div 330]$)

Pentru structura S3 acționată de vântul V1 și echipată cu contravântuiri și, respectiv cu sistemele TMD1 și TMD2, exprimarea comparativă a stării de vibrații în termeni de accelerații se referă la intervalul de timp $t \in [270\div 350]$ în care mișcarea vibratorie este cvasi-staționară (Fig. 6.48). Se constată că echiparea cu contravântuiri generează o creștere importantă a rigidității laterale și conduce, de asemenea, la o creștere de 60% a valorilor accelerațiilor laterale de nivel. Echiparea cu mase adăugate generează o reducere de până la 40% a acestui parametru (Fig. 6.48). Revenind la cazul structurii echipate cu contravântuiri, acest efect de creștere semnificativă a valorilor accelerațiilor de nivel este de multe ori ignorat, accentul punându-se pe reducerea deplasărilor laterale de nivel. Starea vibratorie comparativă din Fig. 6.48 exprimă sugestiv efectele dorite și nedorite în comportarea structurii echipate cu contravântuiri și, respectiv cu sisteme de tip TMD și evidențiază dezavantajul creat de prevederile de proiectare antiseismică prin ne-includerea în setul de parametrii de răspuns seismic a accelerațiilor laterale de nivel. Prin această adevărată omisiune a importanței componente în accelerații de nivel a răspunsului seismic se crează în comunitatea profesională convingerea că echiparea structurilor metalice multietajate cu sisteme de contravântuiri „rezolvă” problema alcătuirii și proiectării structurilor amplasate în zone seismice.

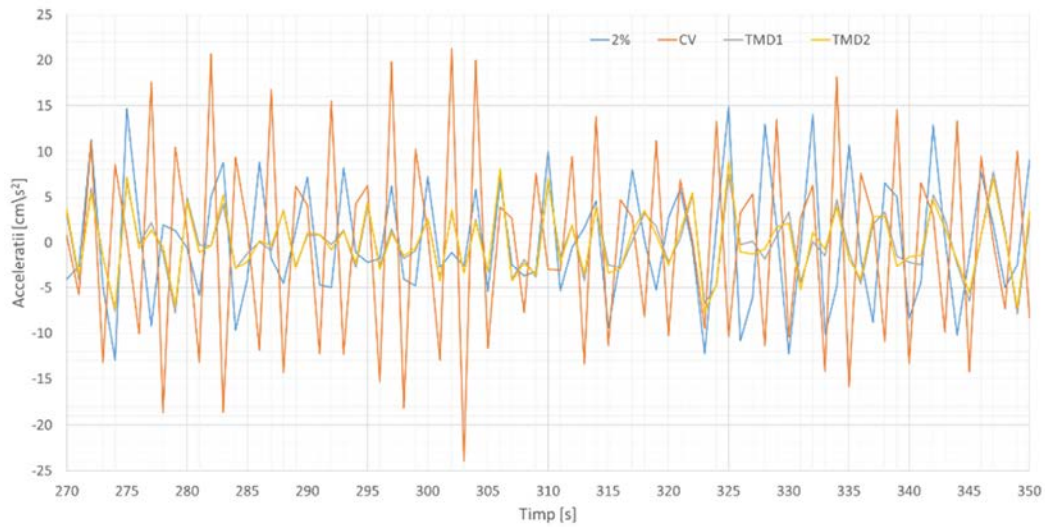


Fig. 6.48. Accelații ale ultimului nivel, structura S3, vântul V1 ($t \in [270 \div 350]$)

Răspunsul structural la acțiunea dinamică a vântului în accelerații laterale de nivel și evidențierea rolului „negativ” al echipării structurii cu contravântuiri este evidențiat - în continuare - în Fig. 6.49 și Fig.6.50.

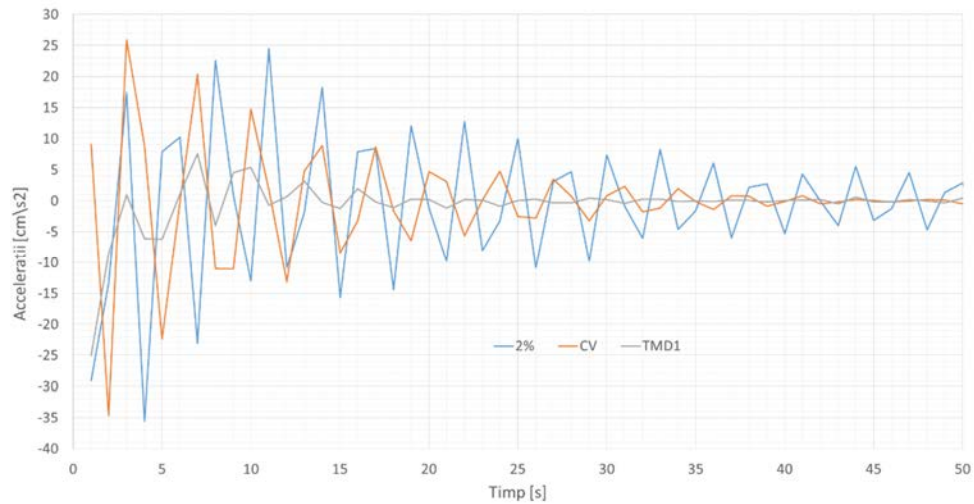


Fig. 6.49. Accelații ale ultimului nivel, structura S1, vântul V2 ($t \in [0 \div 50]$)

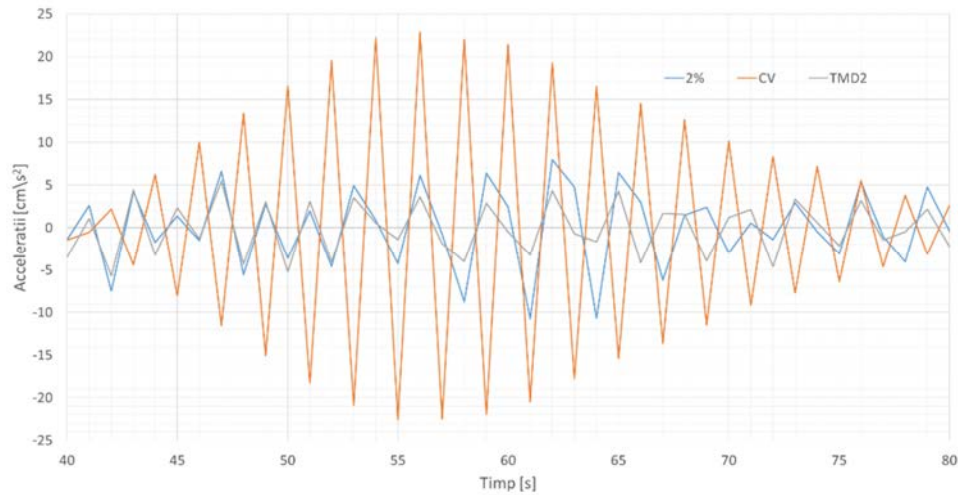


Fig. 6.50. Accelații ale ultimului nivel, structura S2, vântul V3 ($t \in [40-80]$)

6.5.2.2. Abordarea CFD

Așa cum s-a arătat deja, exprimarea variației în timp a acțiunii vântului prin abordarea CFD este, de multe ori, surprinzătoare pentru inginerul structurist format în activitatea de proiectare antiseismică și la vânt guvernată de normativele în vigoare (Fig. 6.15÷Fig. 6.20).

Cu toată variația în timp, mai mult sau mai puțin așteptată, a acțiunii vântului în abordarea CFD, efectul de creștere a accelerațiilor laterale de nivel a structurii echipate cu contravântuiri se conservă (Fig. 6.51).

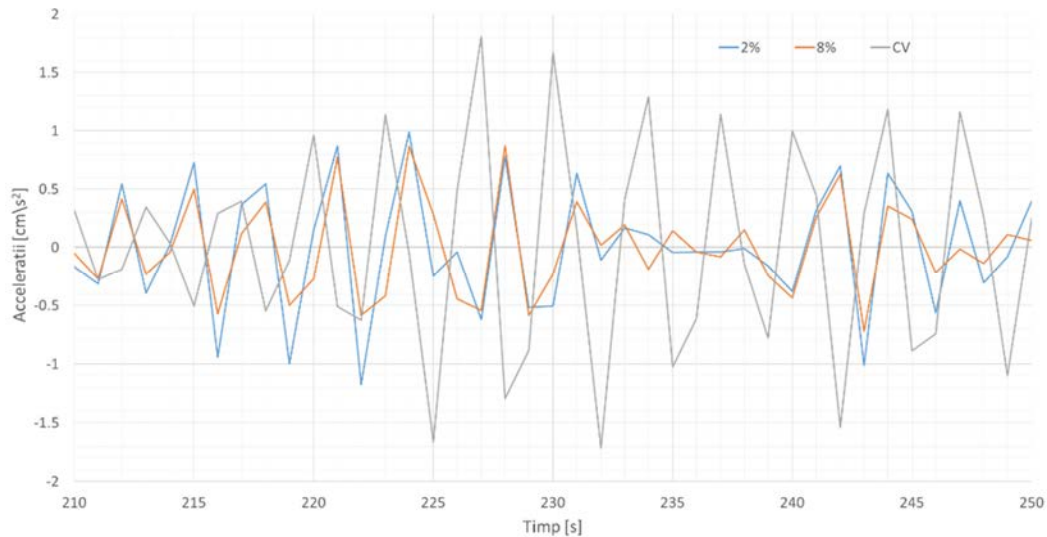


Fig. 6.51. Accelații ale ultimului nivel, structura S1, vântul CFD ($t \in [210-250]$)

În ceea ce privește efectul echipării cu sisteme TMD, reducerea valorilor accelerațiilor laterale de nivel și efectul de „calmare” a stării vibratorii se constată, din nou, în cazul structurii S2 (Fig. 6.52).

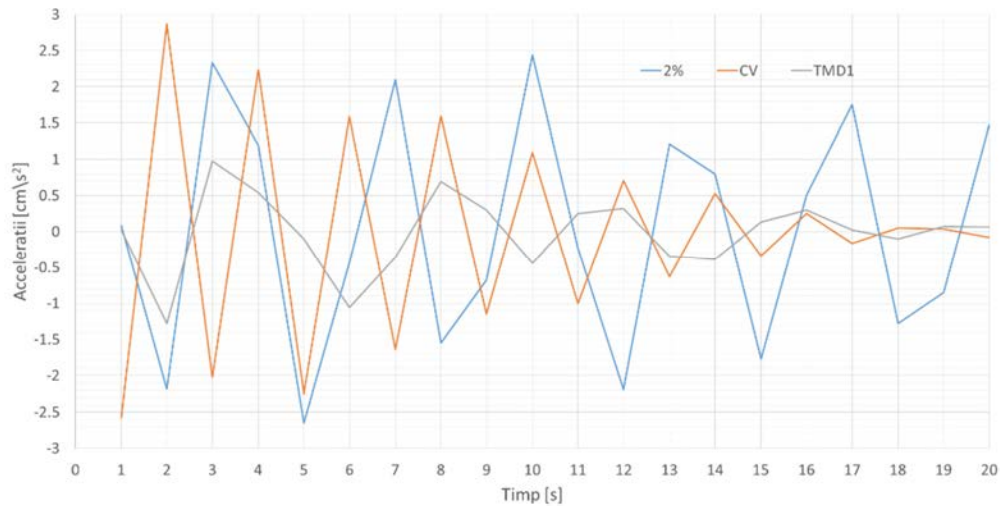


Fig. 6.52. Accelerații ale ultimului nivel, structura S2, vântul CFD ($t \in [0;20]$)

Așa cum s-a încercat și în cazul modelării cvasi-staționare a acțiunii dinamice a vântului o echivalare a nivelului de amortizare generat de echiparea cu sisteme TMD, o astfel de echivalare este prezentată în Fig. 6.53. Se constată că și din punct de vedere al accelerațiilor laterale de nivel echiparea cu sistemul TMD2, de exemplu, este echivalentă cu un nivel de amortizare de 8% (Fig. 6.53).

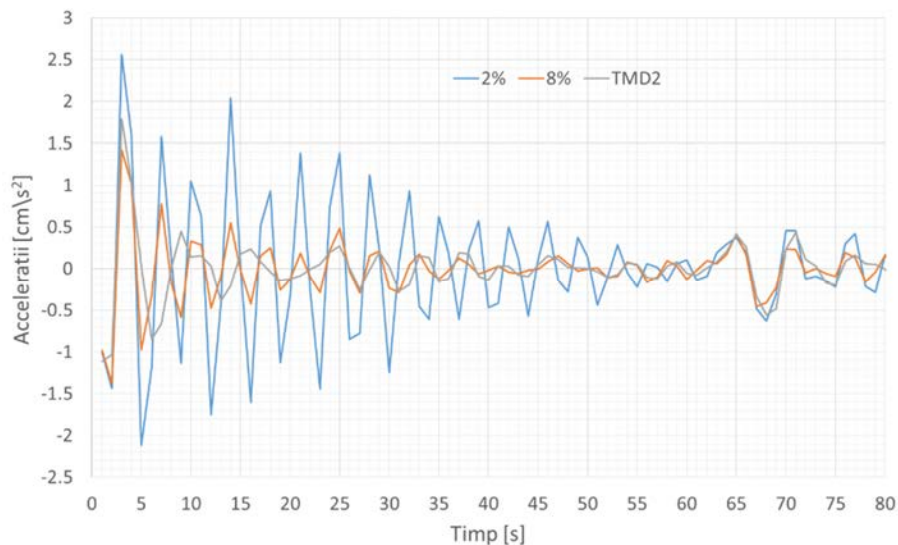


Fig. 6.53. Accelerații ale ultimului nivel, structura S3, vântul CFD ($t \in [0;80]$)

6.5.3. Forța tăietoare de bază

Studiul variației forței tăietoare de bază (F_b) în funcție de echiparea structurii constituie unul dintre cele mai folosite - și populare în același timp - instrumente de evaluare a eficienței echipării anti-vânt. Forța tăietoare de bază sintetizează într-o manieră specifică transformarea mișcării vibratorii în echivalentul său static. Această sinteză statică - prin exprimarea sa în unități de forță și temporală - prin variația sa în timp este folosită, în cele ce urmează pentru evidențierea eficienței echipării anti-vânt a structurii. Urmând drumul analizei seismice, repartizarea forței tăietoare de bază la nivelurile structurii poate constitui o direcție utilă de studiu viitor. Variația forței tăietoare și eficiența echipării anti-vânt sunt asociate cu variațiile perioadelor proprii fundamentale de vibrație T_1 care exprimă fidel afectarea mișcării de vibrație de echiparea sau de amortizarea adăugată. Creșterea perioadei de vibrație (a celei fundamentale - în primul rând) este, probabil cel mai adecvat parametru (dar nu și cel mai popular) pentru exprimarea atenuării stării vibratorii.

Și în acest caz rezultatele numerice vor fi prezentate în aceeași manieră grafică cu scurte comentarii asociate situației respective.

6.5.3.1. Abordarea cvasi-staționară

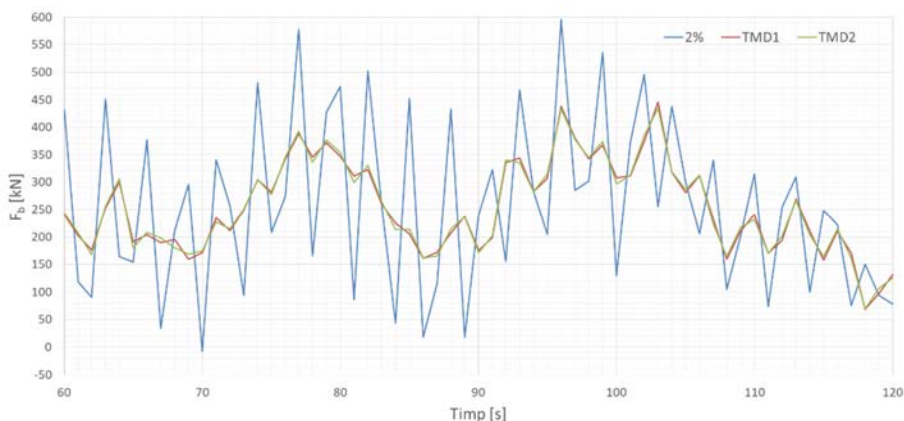


Fig. 6.54. Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V1 ($t \in [60 \div 120]$)

Echiparea cu masă adăugată a structurii S1 conduce la o creștere a perioadei fundamentale de vibrație de la $T_1=2.75$ s în cazul structurii neechipate, la $T_1=3.24$ s în cazul structurii echipate cu TMD1 și, respectiv la $T_1=3.13$ s în cazul echipării cu TMD2. Deși o astfel de creștere de cca. 17% a perioadei fundamentale ar fi destul pentru a acorda un calificativ înalt echipării cu masă adăugată, reducerea forței tăietoare de bază în medie cu peste 30% (Fig. 6.54) este, la rândul său, un efect benefic pentru protecția pasivă la vânt.

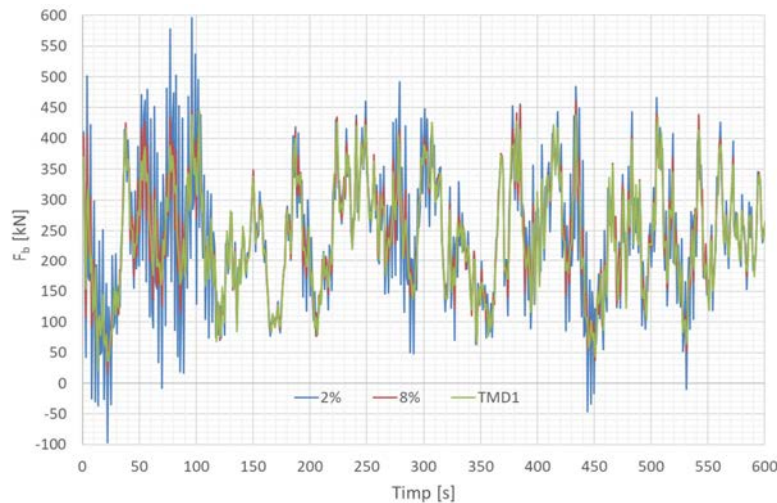


Fig. 6.55. Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V1

Compararea efectului echipării cu TMD1 și, respectiv cu amortizarea adăugată având fracțiunea de amortizare critică de 8% (Fig. 6.55) indică un efect cvasi-echivalent (Fig. 6.56). Această cvasi-echivalență în efectul de reducere a forței tăietoare de bază împreună cu evidențierea faptului că amortizarea de 8% nu modifică practic perioada de vibrație, constituie un argument puternic pentru opțiunea TMD versus amortizare adăugată.

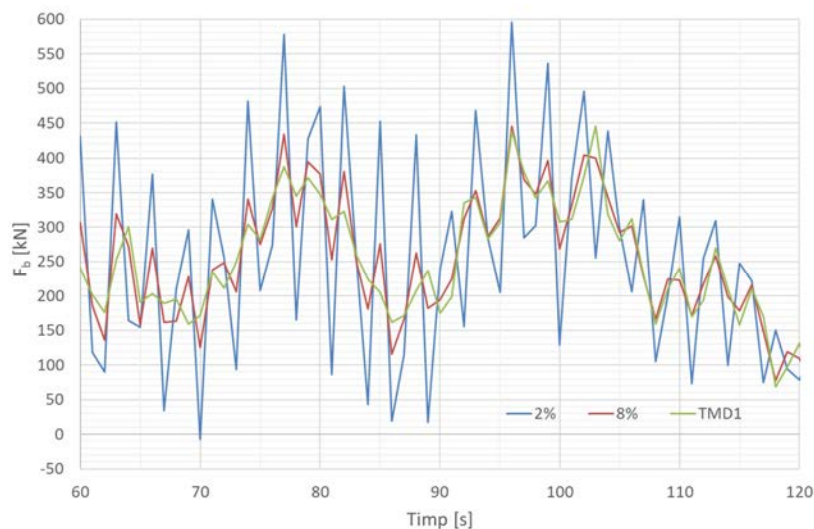


Fig. 6.56. Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V1 ($t \in [60 \div 120]$)

Un aspect neașteptat în starea statică a structurilor acționate de vânt este scăderea forței tăietoare de bază în cazul echipării cu contravânturi (Fig. 6.57). Scăderea valorilor forței tăietoare de bază în cazul echipării structurii cu contravânturi este, aparent, neașteptată doar dacă este analizată în contextul stării statice induse seismic unde creșterea rigidității laterale prin echipare cu contravânturi conduce, într-adevăr, la creșterea substanțială a forței tăietoare seismice de bază [115].

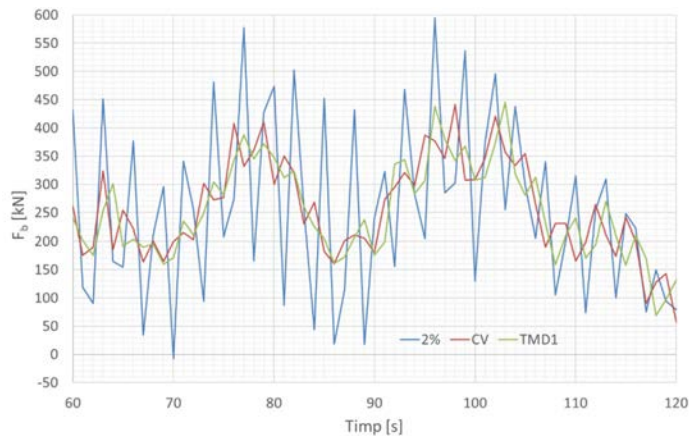


Fig. 6.57. Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V1 ($t \in [60 \div 120]$)

Scăderea forței tăietoare a structurii echipată cu contravântuiri și acționată de vânt este atât de contradictorie, în raport cu situația mult mai populară în care structura este acționată de cutremur, încât acest lucru necesită o apofundare adecvată. În cazul acțiunii seismice starea vibratorie indusă unei structurii multietajate este caracterizată prin alternanța de semn - mai ales dacă referința este la deplasările laterale ale ultimului nivel (Fig. 6.58). În cazul acțiunii vântului, deși starea mecanică este vibratorie, aceasta nu este alternantă ca semn.

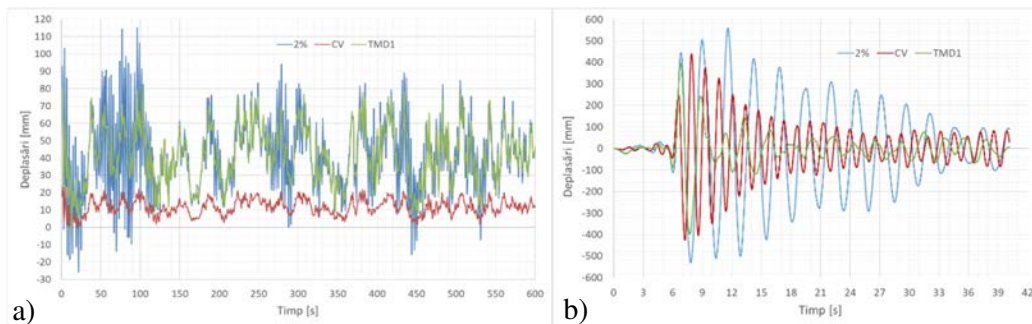


Fig. 6.58. Deplasări laterale, structura S1: a) Vântul V1, b) Cutremur Vrancea 1977

Lipsa alternanței de semn - în cazul structurilor acționate de vânt - se traduce cinematic printr-o variație relativ redusă a vitezelor induse. Adică prin accelerații mici în cazul acțiunii vântului față de cazul acțiunii cutremurului. Starea cinematică de accelerații redusă are ca rezultat o manifestare redusă a stării de inerție și ca urmare o scădere a valorilor forței tăietoare de bază.

Aceleași efecte de reducere a forței tăietoare se constată și în cazul structurii S2 acționată de vântul V1 și echipată cu amortizare adăugată ($\zeta=8\%$) și, respectiv masă adăugată TMD2 (Fig.6.59, Fig. 6.60).

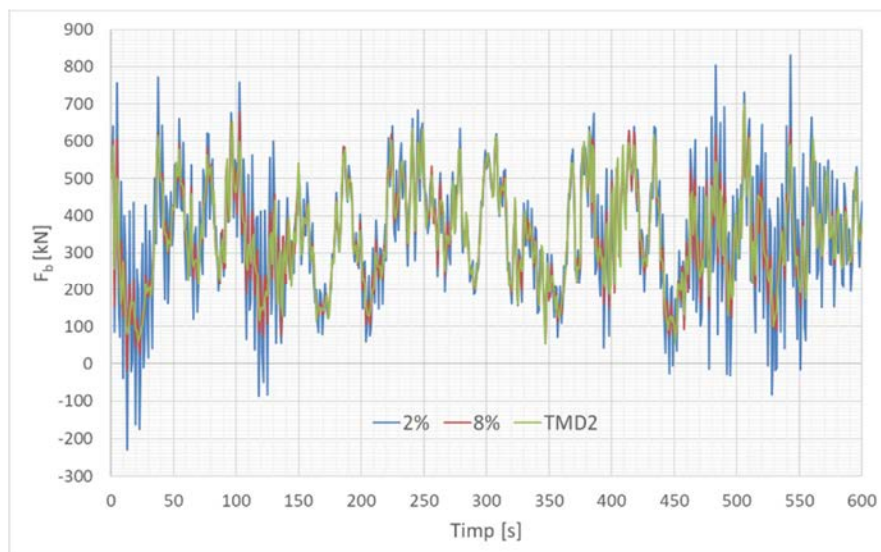


Fig. 6.59. Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V1

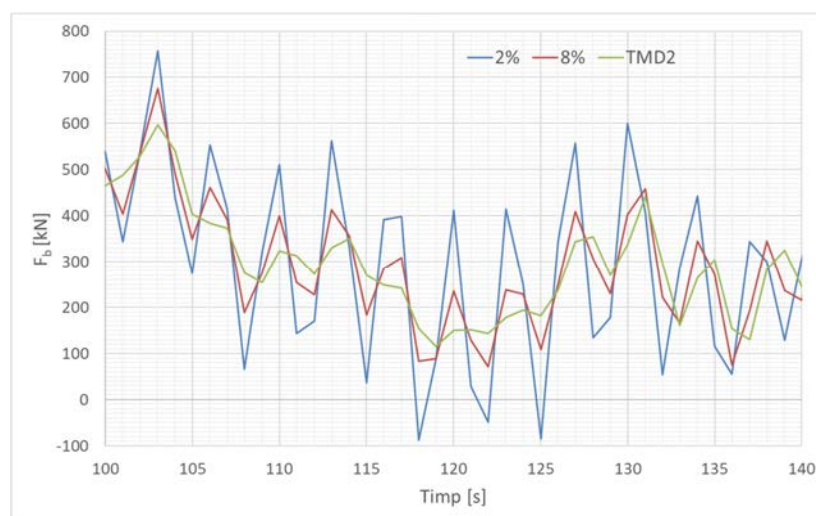


Fig. 6.60. Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V1 ($t \in [100; 140]$)

Analiza efectului echipării structurii S2 cu amortizare adăugată ($\zeta=12\%$) și, respectiv cu masa adăugată TMD1 evidențiază o reducere a forței tăietoare de bază și dă posibilitatea comparării efectelor acestor două echipări (Fig. 6.61). Se constată, astfel, că echiparea cu masă adăugată conduce la o reducere mai mare a forței tăietoare de bază decât echiparea cu un nivel de amortizare liniar vâscoasă de 12%.

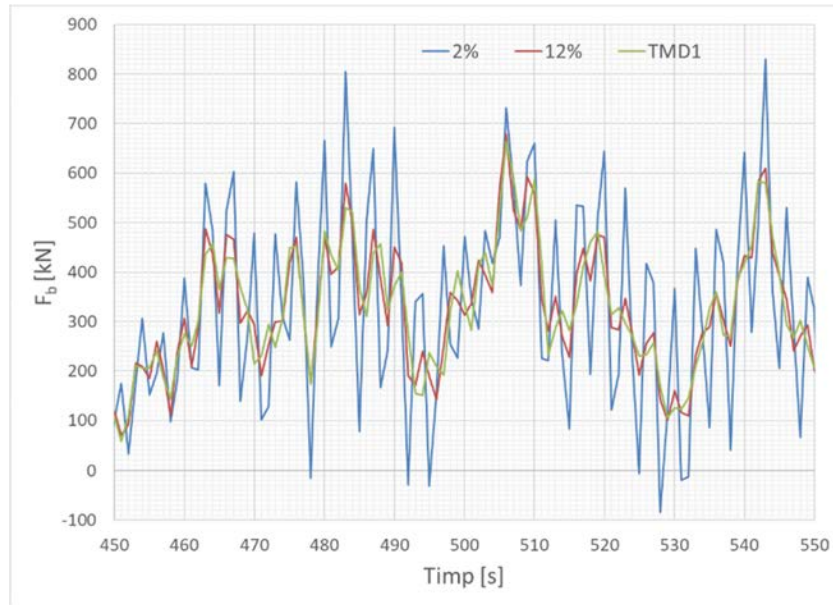


Fig. 6.61. Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V1 ($t \in [450 \div 550]$)

Echiparea cu contravântuiri versus echiparea cu masa adăugată TMD1 a structurii S2 acționată de vântul V1 confirmă constatările referitoare la scăderea forței tăietoare de bază a structurii astfel echipate (Fig. 6.62).

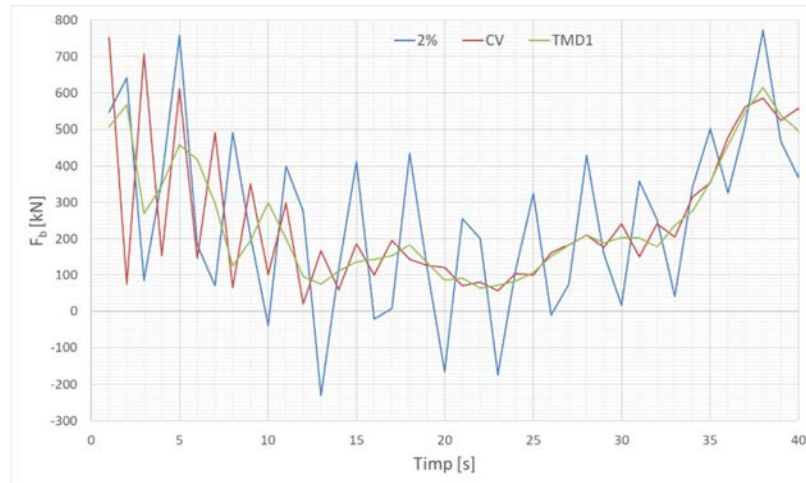


Fig. 6.62. Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V1 ($t \in [0 \div 40]$)

Variația forței tăietoare de bază și, în primul rând, reducerea acesteia în cazul echipării cu contravântuiri trebuie asociată și cu înălțimea (numărul de niveluri) a clădirii. Dintr-o astfel de analiză se constată că efectul de reducere al F_b este mai pregnant la structurile cu înălțimea mai mică (structura S1 cu 11 niveluri, în acest caz) față de structurile cu înălțimea mai mare (structura S3 cu 22 niveluri) așa cum rezultă și din graficele de mai jos (Fig. 6.63÷Fig. 6.65).

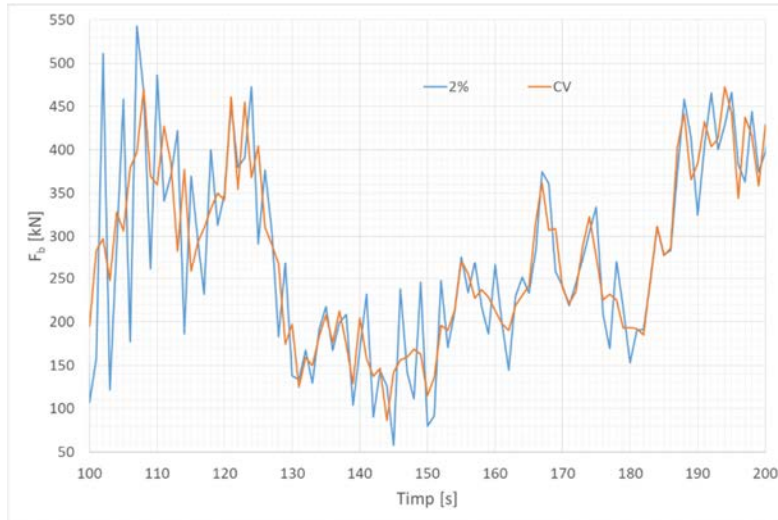


Fig. 6.63. Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V3 ($t \in [100 \div 200]$)

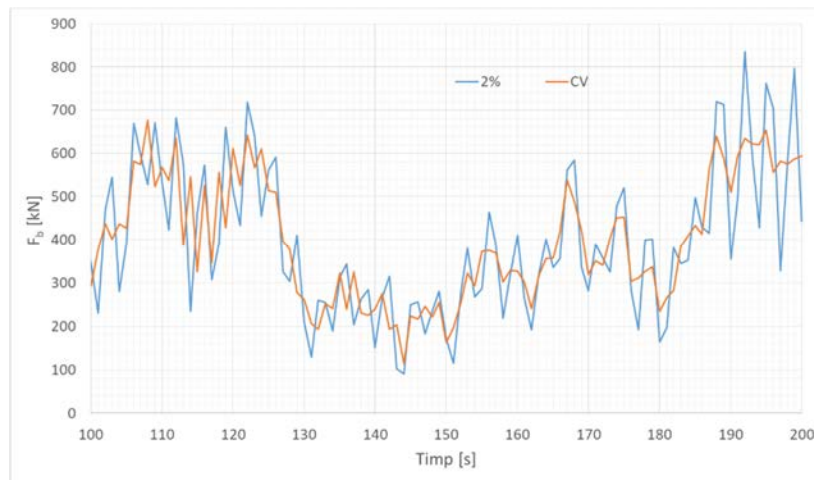


Fig. 6.64. Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V3 ($t \in [100 \div 200]$)

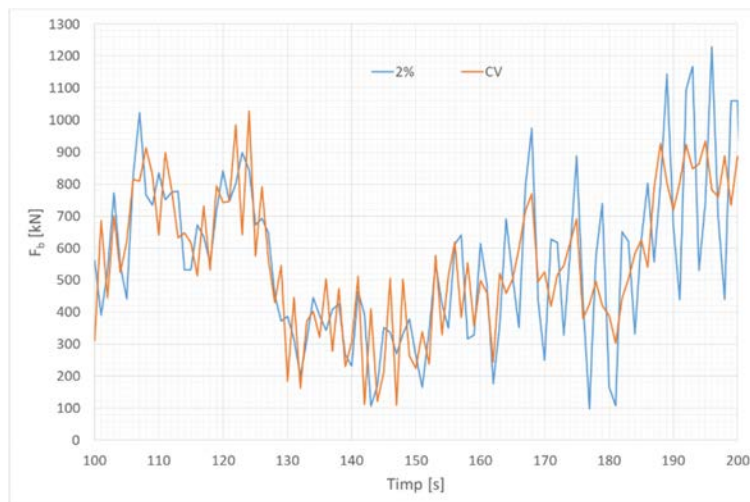


Fig. 6.65. Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V3 ($t \in [100 \div 200]$)

Așa cum este de așteptat, creșterea înălțimii (deci a masei totale care vibrează) are ca efect și creșterea în valoare absolută a forței tăietoare de bază.

În cazul structurii S3 acționată de vântul V3 se constată o conservare a valorilor forței tăietoare de bază în cazul echipării cu amortizare adăugată ($\zeta=10\%$) și o creștere a forței tăietoare de bază în cazul echipării cu contravântuiri a acestei structuri (Fig. 6.66, Fig. 6.67).

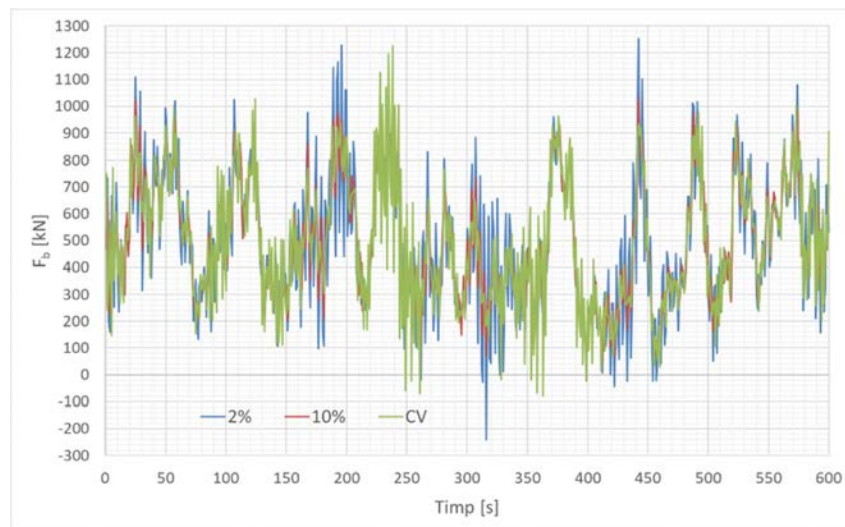


Fig. 6.66. Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V3

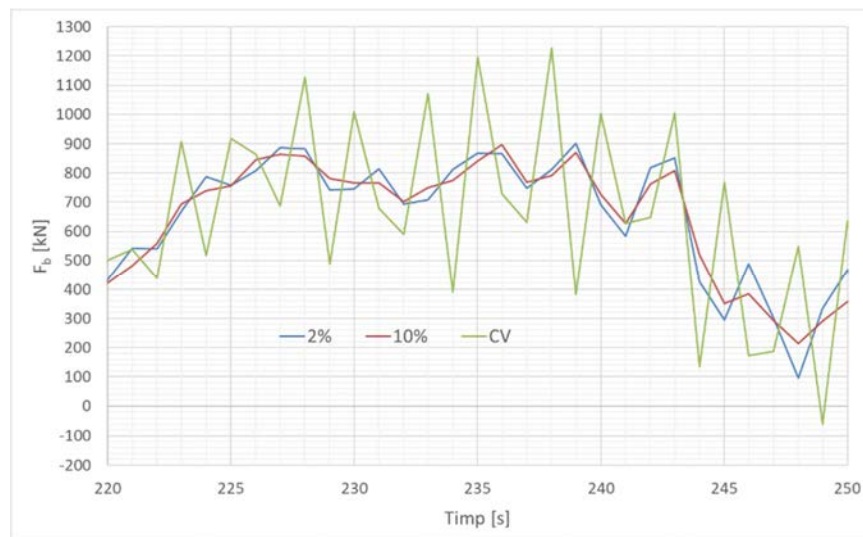


Fig. 6.67. Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V3 ($t \in [220 \div 250]$)

Specificitatea acțiunii V2 (Fig. 6.9) induce o comportare dinamică afină în termeni de forță tăietoare de bază (Fig. 6.68). În zona de acțiune cuprinsă în intervalul $t \in [0 \div 60]$, efectul echipării cu amortizare - nivel 10% și, respectiv cu masă adăugată este mai vizibil (Fig. 6.69) și conduce - pe de o parte - la constatarea cvasi-echivalenței acestor două

echipari și - pe de altă parte - la constatarea scăderii importante a valorilor forței tăietoare de bază.

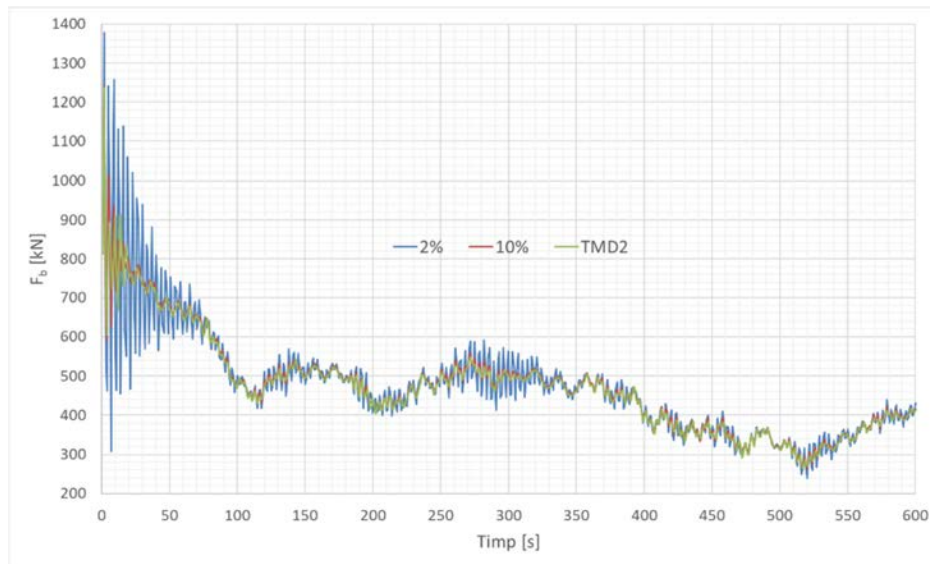


Fig. 6.68. Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V2

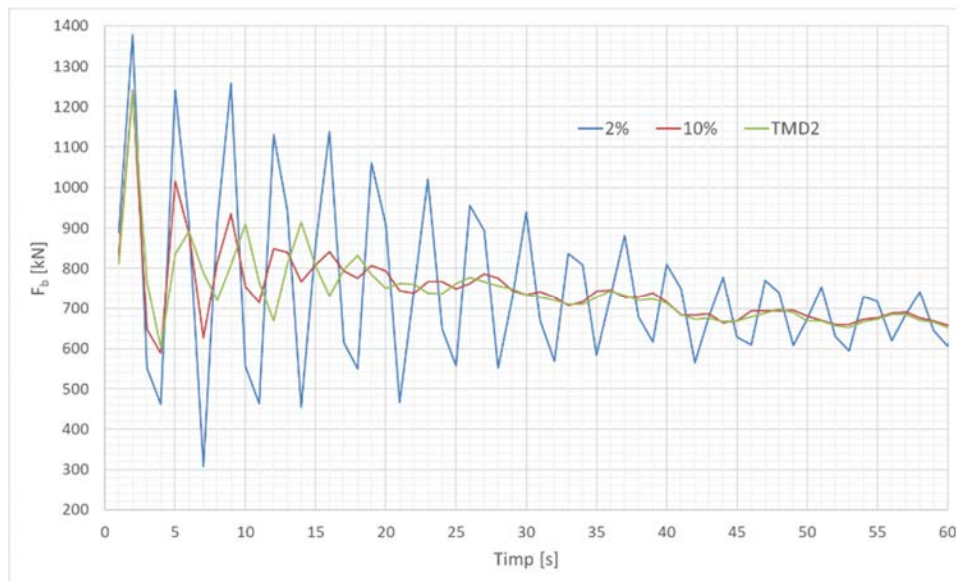


Fig. 6.69. Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul V2 ($t \in [0;60]$)

În cazul structurii S2, numărul mai mic de niveluri și rigiditatea crescută generată de echiparea cu cntravântuiri diminuează, în primul interval ($t < 10s$), reducerea valorilor forței tăietoare (Fig. 6.70, Fig. 6.71). Un efect vizibil îl are, totuși, echiparea cu masă adăugată, când reducerea valorilor forței tăietoare ajunge la peste 30% (Fig. 6.71).

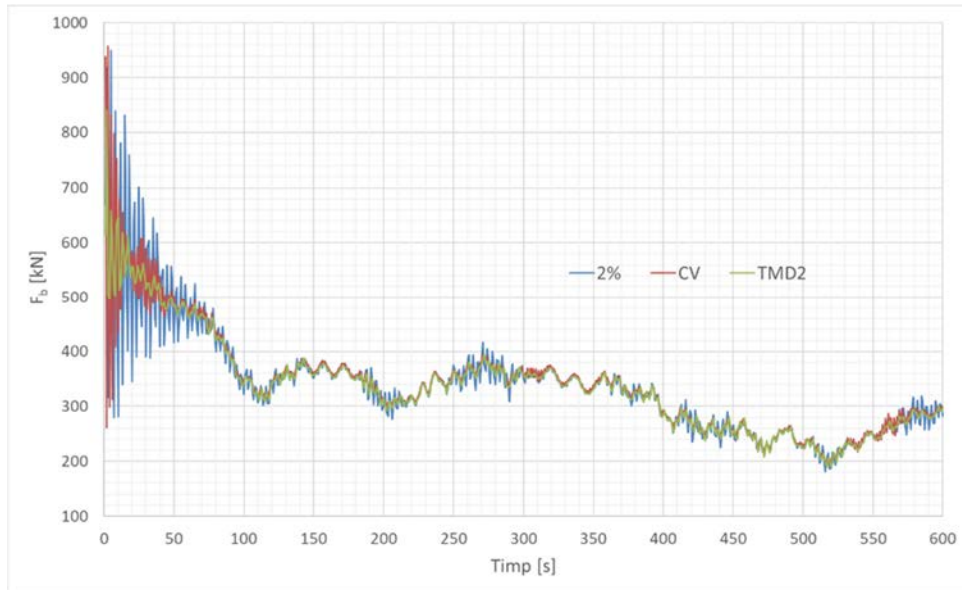


Fig. 6.70. Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V2

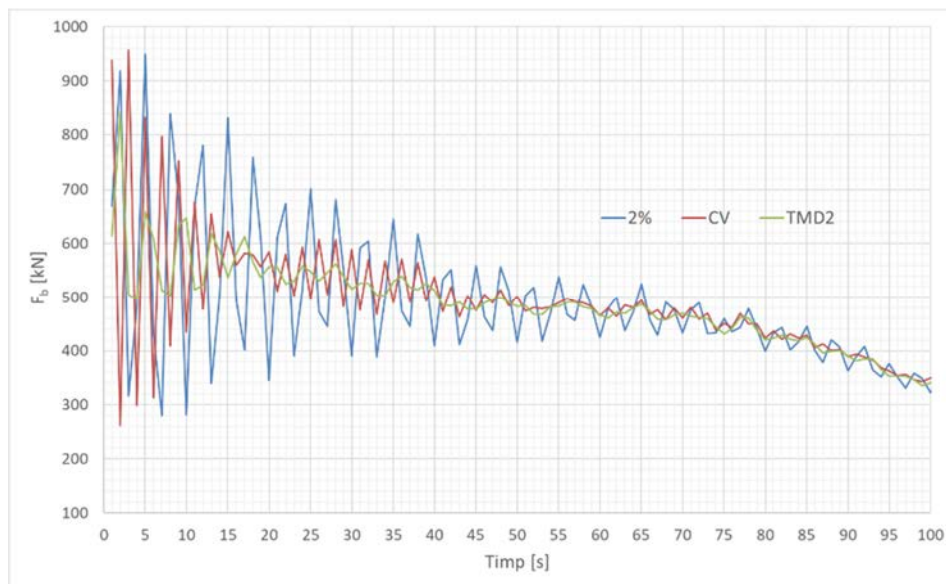


Fig. 6.71. Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul V2 ($t \in [0; 100]$)

Echivalența efectului amortizării adăugate ($\zeta=8\%$) cu efectul masei adăugate TMD1 se constată și în cazul structurii S1 acționată de vântul V3 (Fig. 6.72, Fig. 6.73).

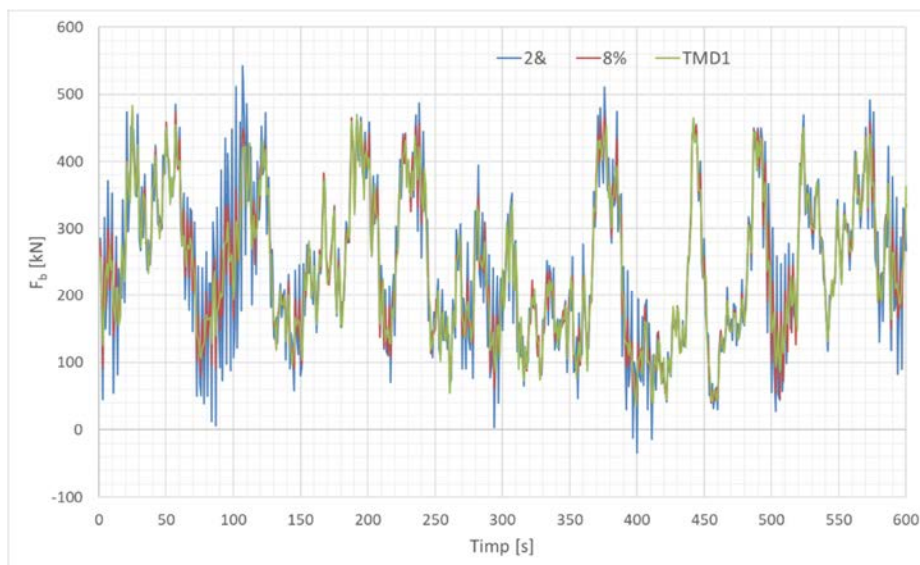


Fig. 6.72. Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V3

Efectul reducerii forței tăietoare de bază, în acest caz, este constant de peste 30% (Fig. 6.73).

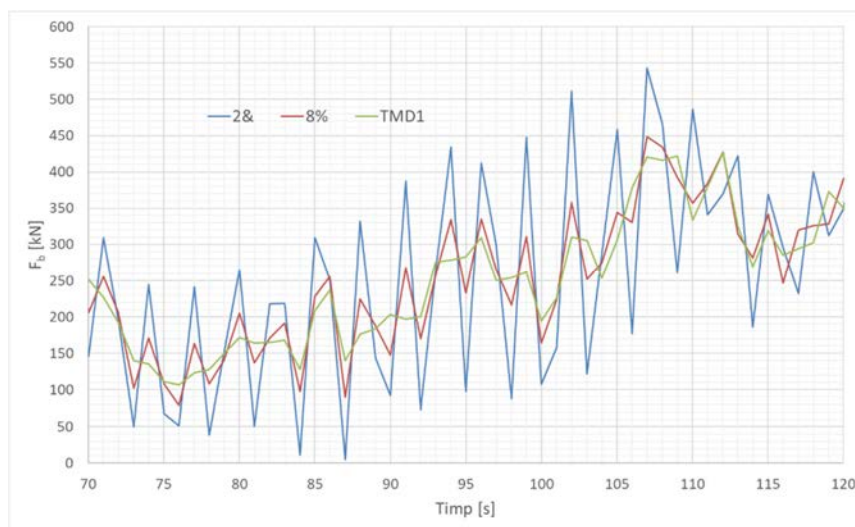


Fig. 6.73. Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul V3 ($t \in [70 \div 120]$)

6.5.3.2. Abordarea CFD

Specificul considerării acțiunii dinamice a vântului prin abordarea CFD conduce, așa cum s-a arătat, la generarea variației alternante de la + la - ceea ce, la rândul său generează o variație asociată a forței tăietoare de bază (Fig. 6.74÷Fig. 6.78).

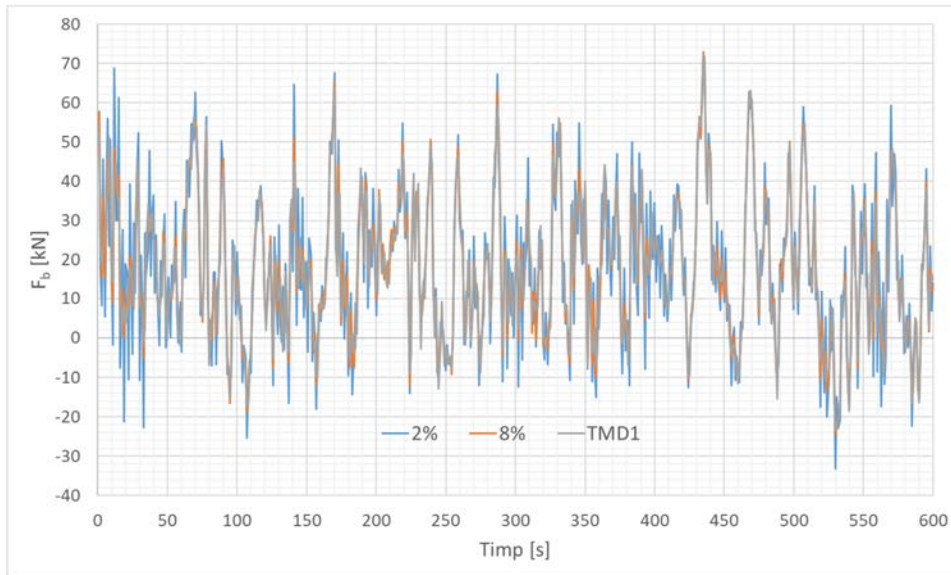


Fig. 6.74. Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul CFD

Referitor la variația acestui parametru în situațiile de echipare cu un nivel de amortizare liniar vâscoasă de 10% a structurii S2 și, respectiv cu masă adăugată, se constată o reducere în intervalul inițial al acțiunii vântului (Fig. 6.75).

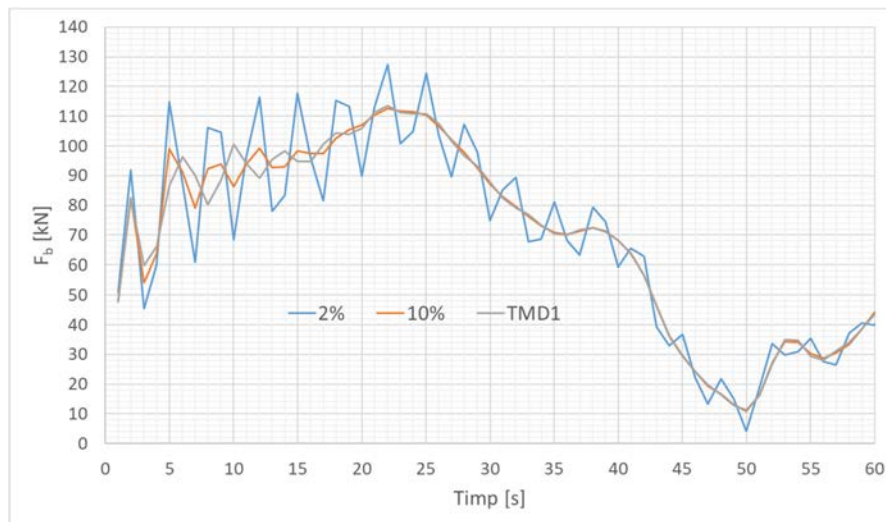


Fig. 6.75. Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul CFD ($t \in [0;60]$)

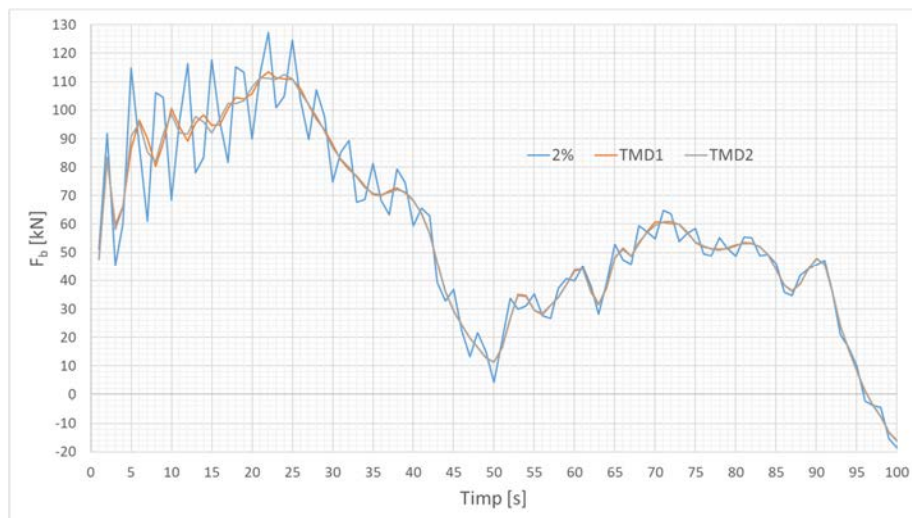


Fig. 6.76. Forța tăietoare de bază, structura S2, vântul CFD ($t \in [0 \div 100]$)

Același fenomen al variației forței tăietoare se constată și în cazul structurii S2 echipată cu cele două variante de masă adăugată (Fig. 6.76).

În abordarea CFD a acțiunii vântului se constată o diminuare aproape totală - după un prim interval de cca. 40 secunde - a efectului echipării cu sisteme de protecție pasivă (Fig. 6.75-Fig. 6.78).

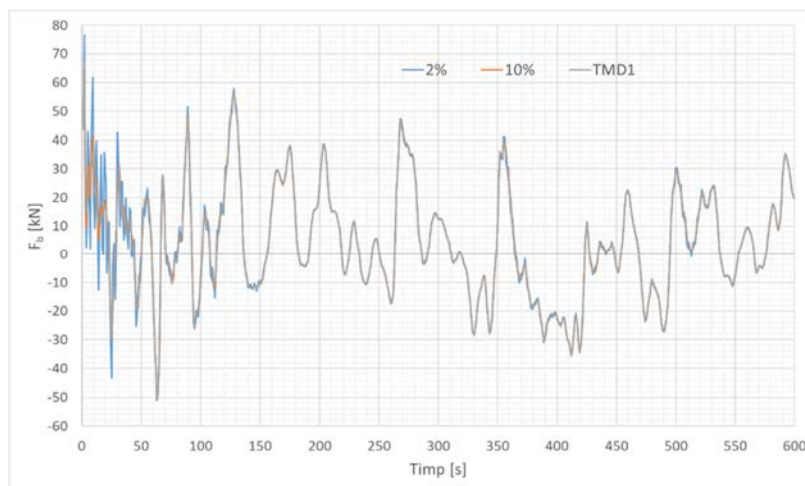


Fig. 6.77. Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul CFD

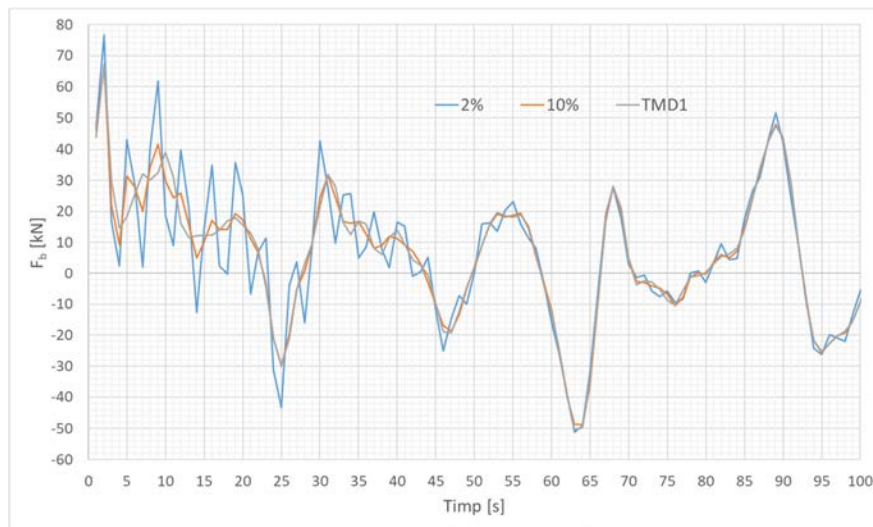


Fig. 6.78. Forța tăietoare de bază, structura S3, vântul CFD ($t \in [0 \div 100]$)

Spre deosebire de cazul acțiunii seismice când forța tăietoare seismică de bază se consideră aplicată structurii la nivelul fundației și este, apoi, repartizată nivelurilor (în funcție de parametrii geometrici și inerțiali asociați fiecărui nivel), forța tăietoare de bază generată de acțiunea vântului este o simplă rezultantă a acțiunilor directe ale vântului asupra structurii. Astfel, studiul acestui parametru static este relevant doar ca mijloc de comparație a eficienței diferitelor sisteme/echipări de protecție pasivă a construcțiilor la acțiunea vântului.

6.5.4. Starea energetică

Așa cum s-a arătat (5.11), starea energetică este definită de componentele energiei: indusă E_i , energie cinetică E_k , energie de deformație elastică E_s și energie disipată E_d . Exprimarea răspunsului structurii în termeni de stare energetică include - în acest studiu - atât energia disipată prin amortizare adăugată și, respectiv, prin masă adăugată în componenta E_d - energie disipată, cât și contribuția exclusivă a amortizării / masei adăugate.

6.5.4.1. Abordarea cvasi-staționară

În continuare sunt prezentate sub formă grafică câteva rezultate numerice asociate abordării cvasi-staționare a acțiunii vântului. Având în vedere că unul dintre obiectivele studiului este eficiența sistemelor de protecție pasivă la acțiunea vântului, sunt studiate cu preponderență componentele energie indusă E_i și, respectiv energie disipată E_d ale structurilor analizate. În același timp, rezultatele numerice referitoare la energia disipată E_d sunt prezentate comparativ pentru valorile menționate ale fracțiunii de amortizare critică (2%-valoarea de referință și 5%, 8%, 10%, 12%, 15%-amortizare adăugată) și pentru cazurile de echipare cu mase adăugate (TMD1, TMD2) și contravântuiri.

În cazul structurii S1 acționată de vântul V1 starea energetică este prezentată grafic în Fig. 6.79. Se constată că, în medie, cca. 66% din energia indusă E_i este disipată prin amortizarea liniar viscoasă inerentă a structurii.

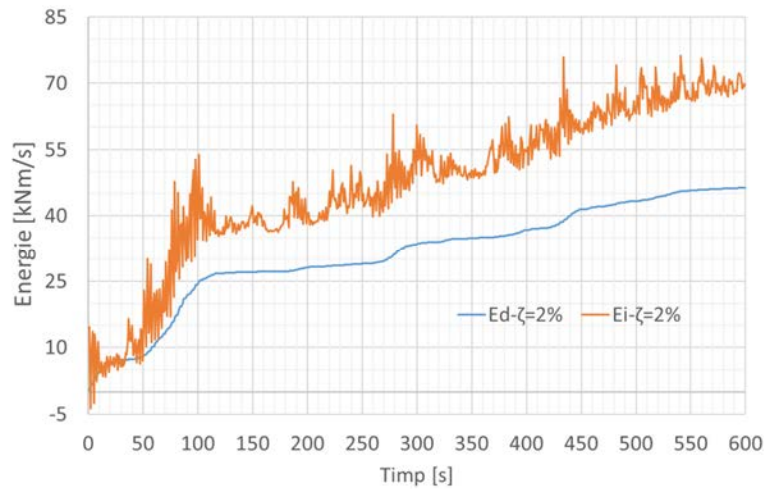


Fig. 6.79. Bilanț energetic, structura de referință S1, vântul V1

În acest context al comparării energiei disipate E_d cu energia indusă E_i de acțiunea vântului (considerat pe un interval de timp de 600 s), autorul tezei evidențiază faptul că o astfel de comparație în cazul acțiunii cutremurului - foarte cunoscută de comunitatea de Inginerie Civilă interesată de protecția pasivă a structurilor acționate seismic - are un specific diferit față de imaginea $E_i - E_d$ în cazul acțiunii vântului. În cazul acțiunii seismice, în momentul t_c (t_c =durata cutremurului) valorile celor două componente energetice devin egale datorită însăși situației de încetare a acțiunii seismice (Fig. 6.80).

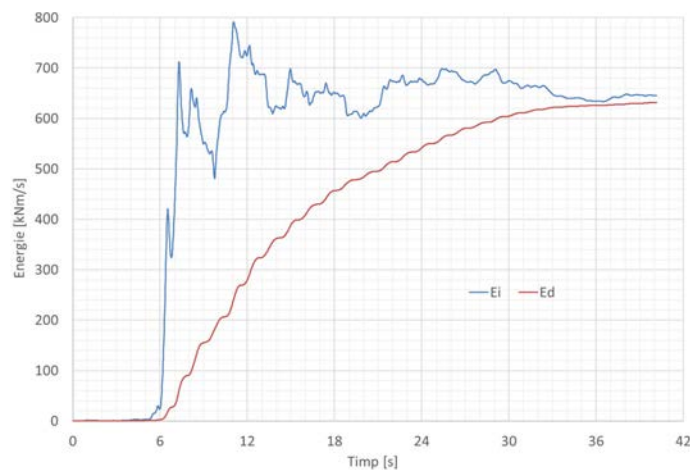


Fig. 6.80. Bilanț energetic, structura de referință S1, cutremurul Vrancea 1977 N-S

În cazul acțiunii vântului, valoarea $t=600$ s nu reprezintă durata de acțiune propriu-zisă ci un interval considerat de autor suficient de extins pentru analiza adecvată a rezultatelor numerice ale parametrilor asociați studiilor efectuate.

O imagine a valorilor energiei disipate E_d și a secvențierii acestora pentru valorile de 2%, 5%, 8%, 15% ale fracțiunii de amortizare critică în cazul structurii S2 acționată de vântul V3 este prezentată în Fig. 6.81.

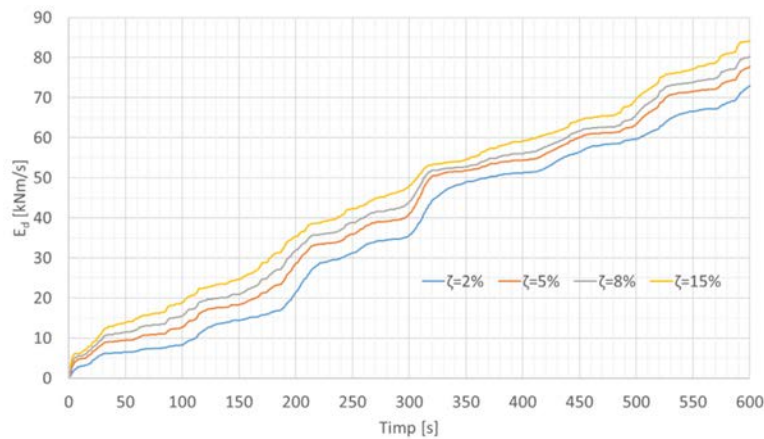


Fig. 6.81. Energie disipată E_d , structura S2, vântul V3

Se constată o situație firească a ordonării crescătoare a cantității de energie disipată E_d : valorile inferioare asociate fracțiunii de amortizare critică de 2%, urmate crescător de valorile E_d pentru $\zeta=5\%$, $\zeta=8\%$, $\zeta=15\%$. În același timp, se constată diferențe mici în aceste valori pentru creșteri relativ mari ale fracțiunii de amortizare critică. Astfel, pentru creșterea fracțiunii de amortizare critică de la 2% la 15% se constată (la $t=300$ s) o creștere a energiei disipate de 37% (Fig. 6.81).

Pentru aceeași structură S2 acționată de același vânt V3, sunt prezentate (Fig. 6.82) variațiile energiei disipate în cazul echipării structurii cu masele TMD1, TMD2 (Fig. 6.3, Fig. 6.4).

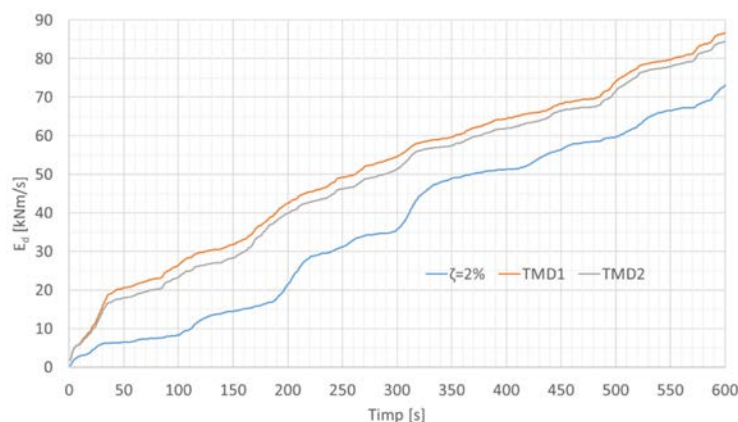


Fig. 6.82. Energie disipată E_d , structura S2 cu mase edăugate, vântul V3

Considerând aceeași valoare $t=300$ s a cțiunii vântului, creșterea cantității de energie disipată în cazul echipării cu TMD1 este de 57% iar în cazul echipării cu TMD2, creșterea este de 43% (Fig. 6.82). Se constată, în același timp, o eficiență crescută (cu cca. 10%) a echipării cu TMD1 față de echiparea cu TMD2.

Având în vedere limitările valorilor deplasărilor laterale de nivel ale structurilor multietajate din oțel impuse de reglementările [3, 116] care guvernează proiectarea acestor structuri, echiparea cu contravânturi se dovedește o întreprindere eficientă (Fig. 6.41). Dealtfel, creșterea rigidității laterale a structurilor multietajate prin echipare cu contravânturi este chiar acesta: de reducere a deplasărilor relative sau absolute de nivel. Din punct de vedere al afectării stării energetice, echiparea cu contravânturi are efectul așteptat al rigidizării structurii: scăderea energiei induse E_i (datorită scăderii deplasărilor laterale de nivel - Fig. 6.41) și scăderea energiei disipate E_d (datorită scăderii vitezelor laterale de nivel - Fig. 6.83).

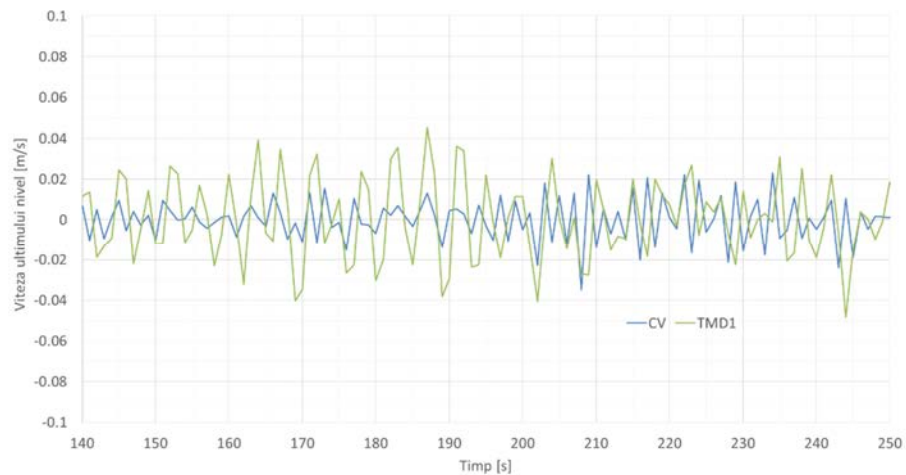


Fig. 6.83. Viteza ultimului nivel, structura S2, vântul V3 ($t \in [140 \div 250]$)

O astfel de situație este prezentată grafic în Fig. 6.84 în cazul structurii S2 acționată de vântul V3 și echipată cu contravânturi și, respectiv cu mase adăugate.

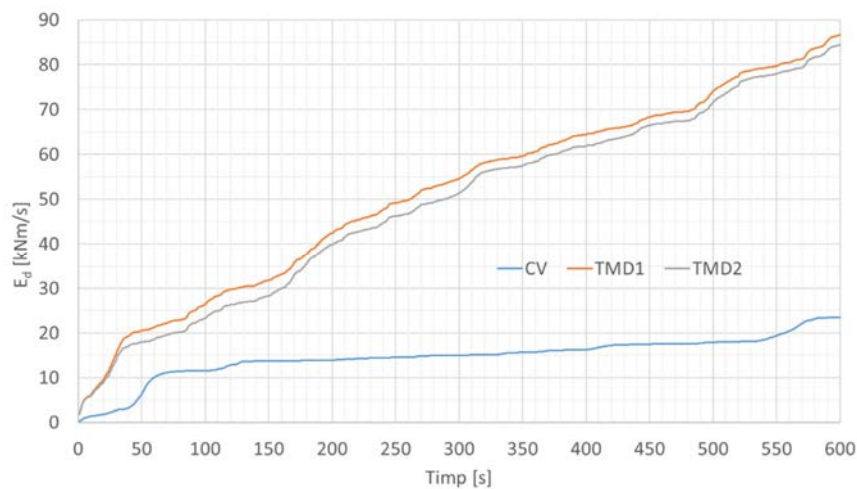


Fig. 6.84. Energie disipată E_d , flexibilizare vs rigidizare, structura S2, vântul V3

Cu tot efectul pozitiv pe care îl are echiparea cu contravânturi pentru reducerea deplasărilor laterale de nivel, trebuie evidențiată capacitatea redusă de disipare a

energiei induse de acțiunea vântului atât în raport cu echiparea cu mase adăugate (Fig. 6.84) cât și în raport cu echiparea cu diferite niveluri de amortizare liniar vâscoasă adăugată (Fig. 6.85). Astfel, în cazul echipării cu contravântuiri a structurii S2 acționate de vântul V3, cantitatea de energie disipată de structura contravântuită este mai mică cu cca. 57% față de nivelul de amortizare inerentă de 2% (Fig. 6.85).

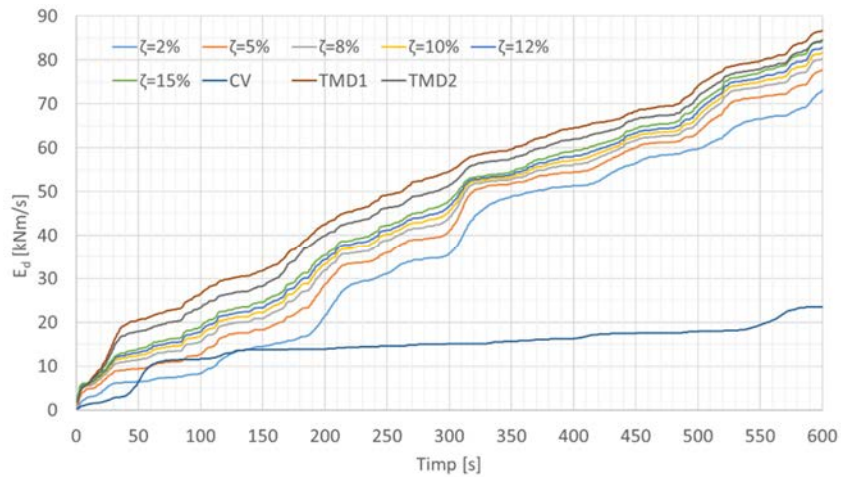


Fig. 6.85. Energie disipată E_d , amortizare vs echipare, structura S2, vântul V3

Același efect al reducerii capacității de disipare a energiei structurii echipate cu contravântuiri se constată și în cazul structurii S3 acționate de vântul V3. În momentul $t=300$ s, cantitatea de energie disipată de structură este cu 58% mai mare în cazul echipării cu mase adăugate față de cazul echipării cu contravântuiri (Fig. 6.86).

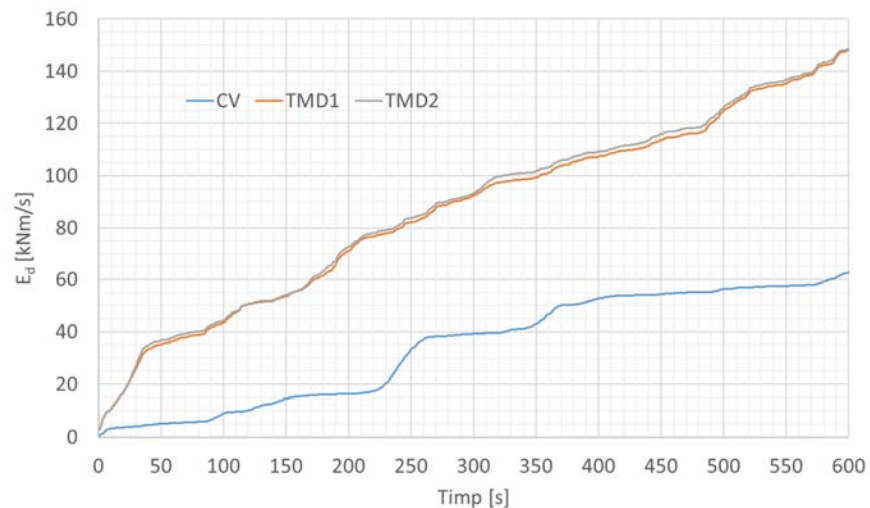


Fig. 6.86. Energie disipată E_d , flexibilizare vs rigidizare, structura S3, vântul V3

Specificitatea variației în timp a acțiunii vântului V2 (Fig. 6.9) induce o variație specifică a acumulării în timp a energiei disipate de structura S2 (Fig. 6.87): această energie ramâne, practic, constantă după $t=50$ s când vântul V2 are o cvasi-stabilizare.

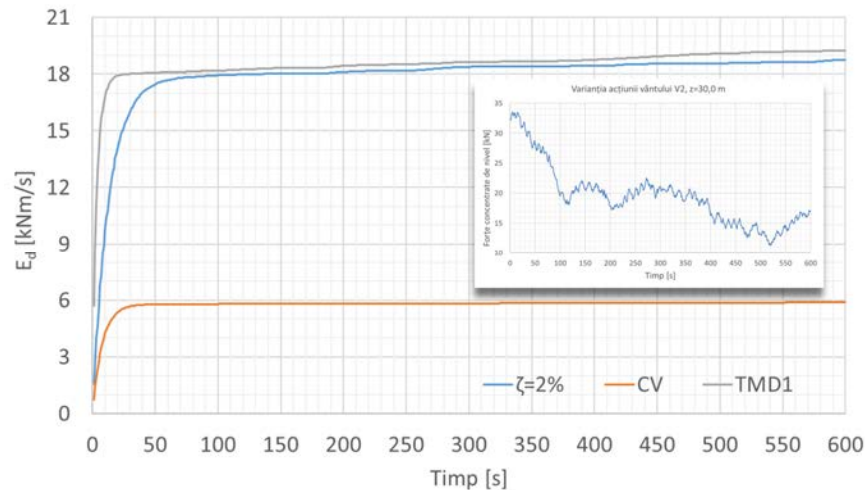


Fig. 6.87. Energie disipată E_d , structura S2, vântul V2

O imagine de detaliu a creșterii capacității de disipare a energiei și - în paralel - a variației vântului V2 în intervalul $t \in [0 \div 100]$ s este prezentată în Fig 6.88 în care structura este acționată de vântul V2 atât în ipostaza sa de referință ($\zeta=2\%$) cât și în cazurile echipării cu contravântuiri și, respectiv cu TMD1.

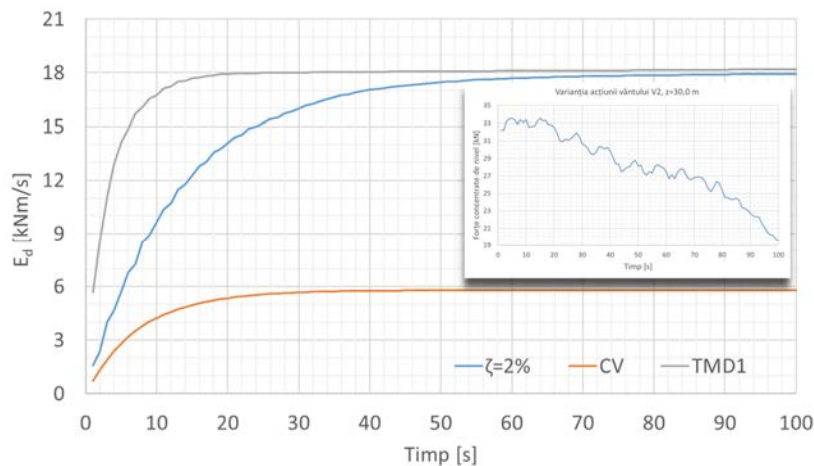


Fig. 6.88. Energie disipată E_d , structura S2, vântul V2 ($t \in [0 \div 100]$)

Dacă creșterea rigidității laterale (prin echipare cu contravântuiri) conduce la o reducere a stării energetice, creșterea nivelului amortizării (prin amortizare adăugată) conduce la îmbunătățirea capacității structurii de disipare a energiei induse de acțiunea vântului. Astfel, în cazul structurii S3 acționată de vântul V3 se constată o creștere a valorilor energiei disipate E_d de cca. 40% (Fig. 6.89).

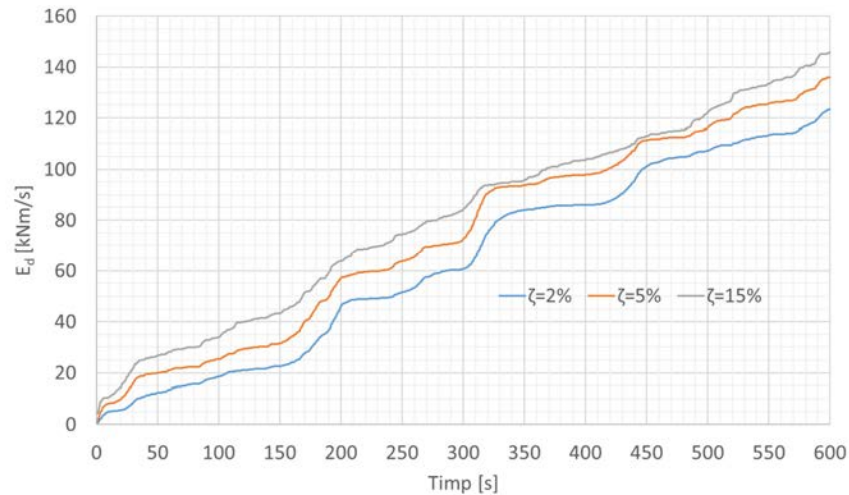


Fig. 6.89. Energie disipată E_d , structura S3, vântul V3

Aceeași creștere a capacității de disipare a energiei cinetice induse de vânt se constată și în cazul echipării structurii cu mase adăugate. În cazul structurii S3 acționate de vântul V3 echiparea cu mase adăugate conduce la creșterea capacității de disipare a energiei cinetice de cca. 58% (Fig. 6.90).

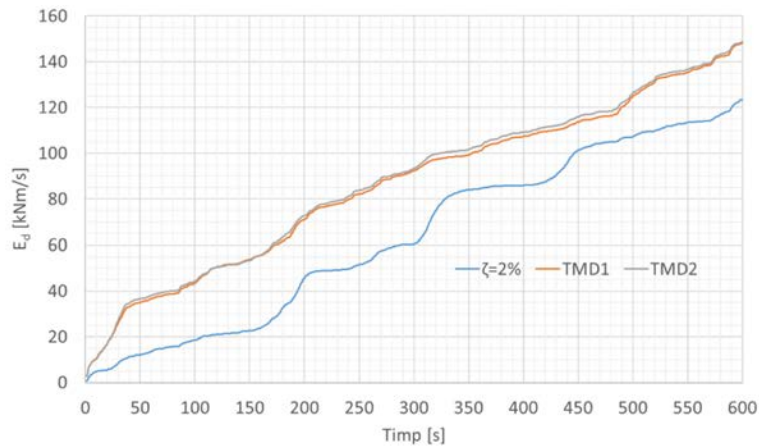


Fig. 6.90. Energie disipată E_d , structura S3 echipată cu mase adăugate, vântul V3

Tendința de creștere a capacității de disipare a energiei cinetice prin creșterea nivelului de amortizare și echiparea cu TMD și, în același timp reducerea acestei capacități prin echiparea cu contravântuiri poate fi constatată în toate cazurile de amortizare și mase adăugate analizate (Fig. 6.91, Fig. Fig. 6.92)

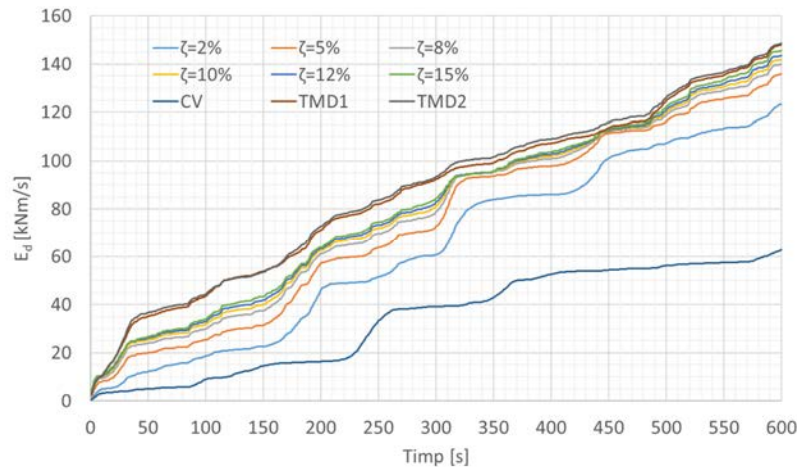


Fig. 6.91. Energie disipată E_d , amortizare vs echipare, structura S3, vântul V3

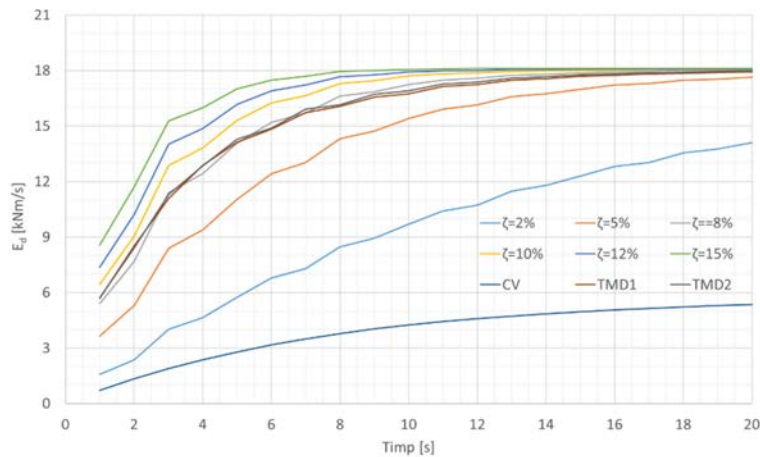


Fig. 6.92. Energie disipată E_d , structura S2, vântul V2 ($t \in [0;20]$)

Referitor la dependența capacității de disipare a energiei, aceasta este, evident, dependentă de structură prin nivelul de amortizare / de echipare a acesteia dar, se constată o profundă dependență a capacității de disipare de acțiunea vântului. În cazul echipării celor trei structuri cu TMD1, variația energiei disipate E_d în cazul acționării succesive cu V1, V2, V3 este prezentat în Fig. 6.93, Fig. 6.94, Fig. 6.95 în paralel cu variația acțiunii.

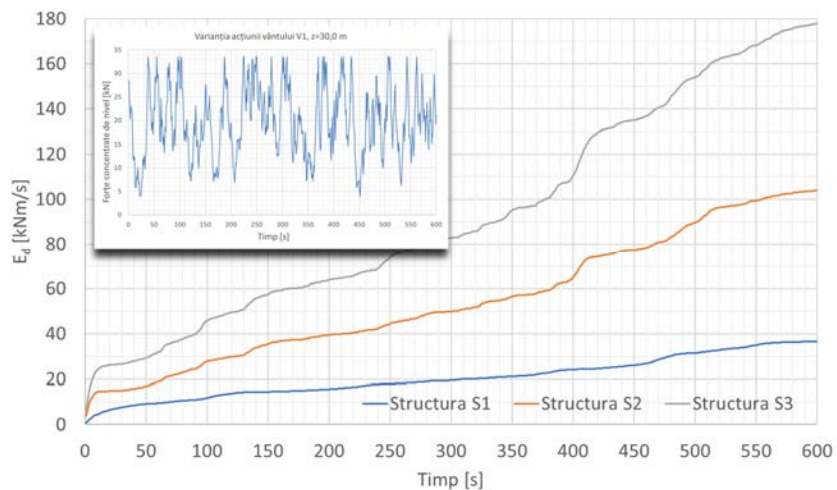


Fig. 6.93. Energie disipată E_d , echipare cu masă adăugată TMD1, vântul V1

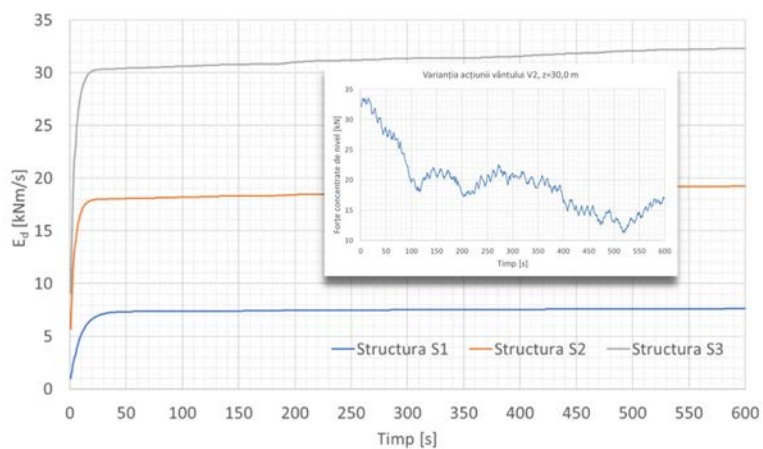


Fig. 6.94. Energie disipată E_d , echipare cu masă adăugată TMD1, vântul V2

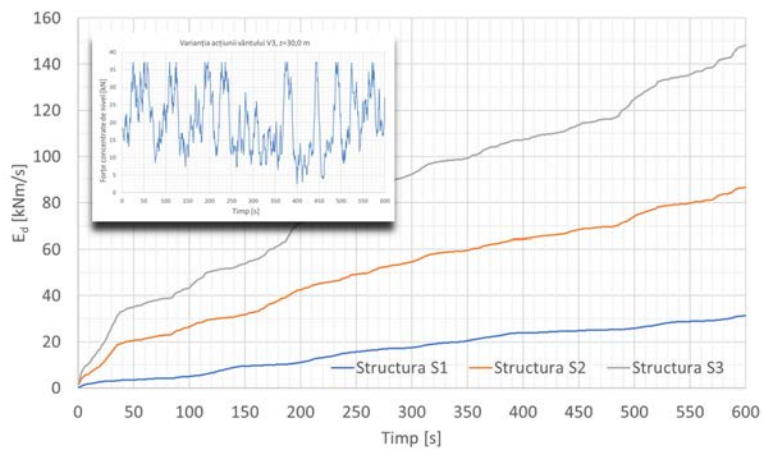


Fig. 6.95. Energie disipată E_d , echipare cu masă adăugată TMD1, vântul V3

6.5.4.2. Abordarea CFD

Așa cum s-a arătat în Secțiunea 6.3.2, în cazul abordării prin metodologia *CFD* (Computational Fluid Dynamics), presiunea exercitată de vânt pe structura amplasată într-un ansamblu de clădiri (Fig. 6.14) are valori sub cele asociate abordării cvasi-staționare datorită valorilor reduse ale vitezei vântului.

În continuare sunt prezentate grafic variațiile capacității de disipare a energiei induse de vânt în diferite ipostaze de echipare a celor trei structuri analizate.

Se constată o distribuție așteptată a valorilor energiei disipate: cantitatea de energie disipată crește odată cu creșterea fracțiunii de amortizare critică (Fig. 6.96). În ceea ce privește cazul echipării cu mase adăugate, energia disipată este - aproximativ - echivalentă cu un nivel de amortizare adăugată de 12% - 13% în cazul structurii S1 (Fig. 6.97), de 9% în cazul structurilor S2 (Fig. 6.98) și, respectiv S3 (Fig. 6.99).

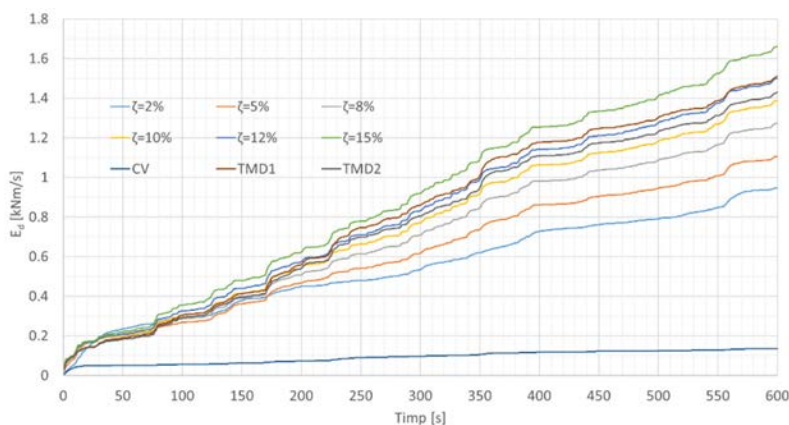


Fig. 6.96. Energie disipată E_d , structura S1

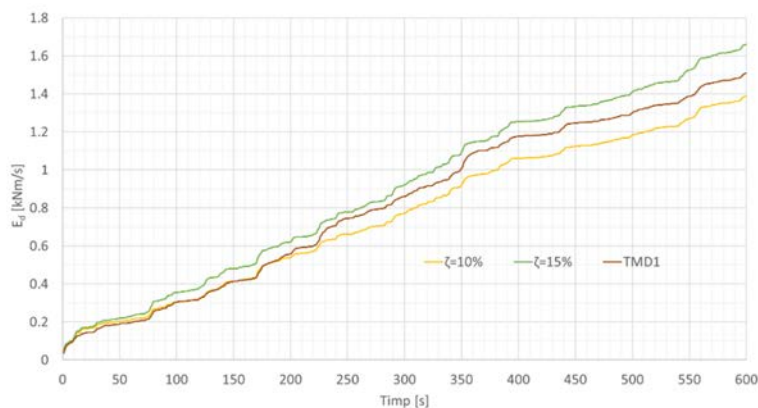


Fig. 6.97. Energie disipată E_d , structura S1, echipare cu TMD1

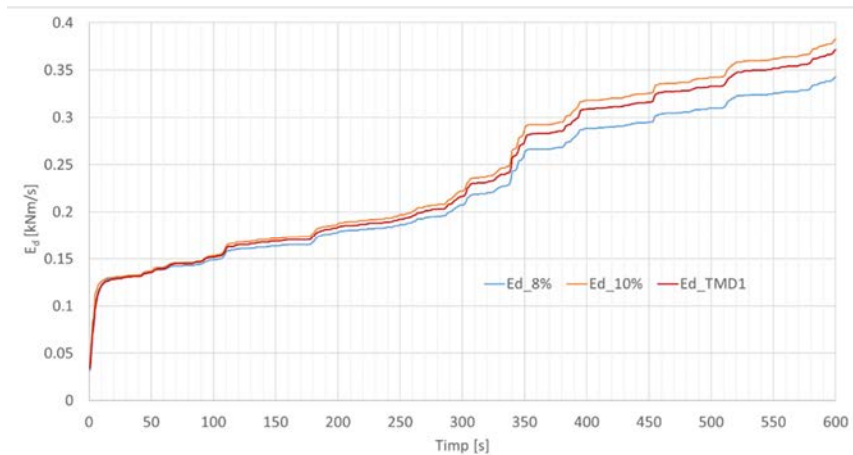


Fig. 6.98. Energie disipată E_d , structura S2, echipare cu TMD1

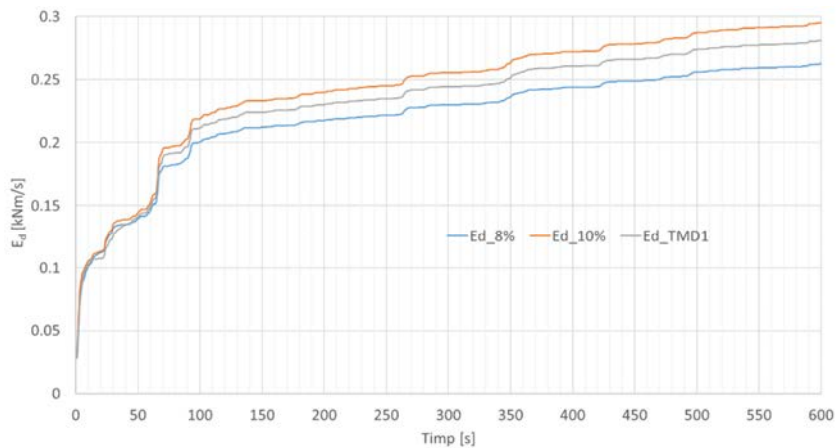


Fig. 6.99. Energie disipată E_d , structura S3, echipare cu TMD1

Evaluarea cantității de energie disipată permite - în procesul de proiectare structurală - stabilirea nivelului de amortizare adăugată sau a procentajului de masă adăugată necesare pentru protecția pasivă față de acțiunea vântului. În același timp, cantitatea de energie disipată permite exprimarea eficienței echipării structurii cu diferite niveluri de amortizare sau mase adăugate.

7. Concluzii, contribuții originale și obiective viitoare

Acest ultim capitol este pe cât de tradițional pe atât de necesar în faza de finalizare a unei etape a cercetării întreprinse. Concluzionarea activității desfășurate este cel mai bine exprimată prin evidențierea îndeplinirii obiectivelor propuse. Obiectivul principal al cercetării îl constituie abordarea specificului dinamic al acțiunii vântului asupra structurilor de construcții. Dinamicitatea vântului ca acțiune asupra construcțiilor este pe cât de evidentă pe atât de prezentă în timpurile recente. Și totuși, un efort susținut este încă depus pentru substituirea acțiunii dinamice a vântului prin tradiționalele forțe aplicate static.

7.1. Realizarea obiectivelor propuse

Obiectivul general al cercetării de doctorat întreprinse - considerarea dinamicității vântului în analiza structurilor - este tratat în două modalități distincte.

Prima modalitate - *abordarea cvasi-staționară* - urmează o cale tradițională: transformarea vitezei vântului în presiune și a presiunii în forțe dinamice de nivel. Viteza vântului este un parametru important în abordarea dinamică a acțiunii vântului. În cercetarea întreprinsă, viteza vântului este exprimată ca funcție de timp generată prin procesări matematice. Astfel de funcții ale vitezei vântului se obțin atât prin măsurători primare cât și prin procesări matematice. În cercetarea întreprinsă în această teză sunt folosite rezultatele (sub formă de „vitezograme”) furnizate de *Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, AGH University of Science and Technology, Poland* [15-17].

Câteva exemple de astfel de funcții $v(t)$ numite și „semnale” [121, 122] sunt prezentate mai jos (Fig. 7.1).

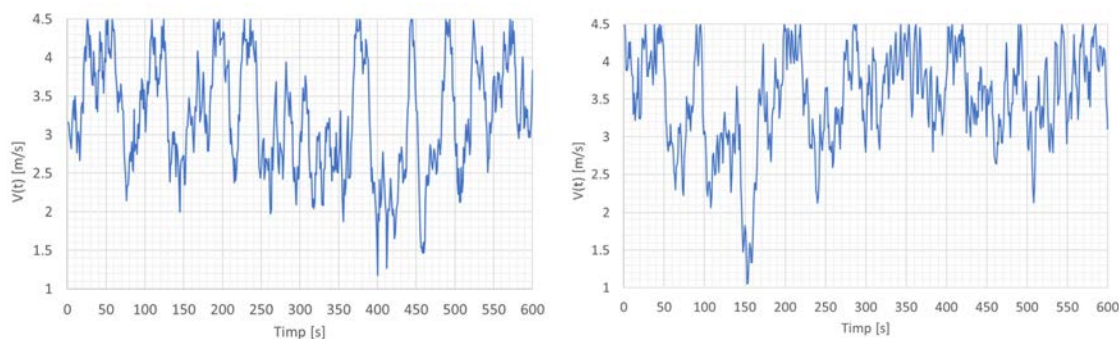


Fig. 7.1. Variații ale vântului generate matematic [15-17]

Cea de-a doua modalitate este *abordarea CFD* în care o valoare constantă a vitezei vântului (30.00 m/s) este aplicată unui ansamblu structural și - prin metodele specifice Dinamicii Fluidelor - este transformată în fluctuații de tip rafale/turbulențe. Abordarea CFD din teză este asociată unei modelări virtuale a tunelului de vânt (Fig. 3.5, Fig. 3.6).

Forțele dinamice obținute prin transformarea viteză - presiune - forțe sunt aplicate unor structuri multi-etajate plane (Fig. 6.1÷Fig. 6.4). Analizele structurale includ trei structuri

plane multi-etajate considerate în mai multe ipostaze: ipostaza de referință, structurile echipate cu amortizare liniar vâscoasă asociată mai multor valori (5%, 8%, 10%, 12%, 15%) ale fracțiunii de amortizare critică, structuri echipate cu mase adăugate amplasate la ultimul nivel și, respectiv la un nivel intermediar, structuri echipate cu contravântuiri (Fig. 6.1÷Fig. 6.4).

Acțiunile dinamice de tip forțe sunt asociate cu trei variații ale presiunii vântului generate prin abordarea cvasi-staționară și trei variații ale presiunii vântului - specifice fiecărei structuri - generate prin abordarea CFD. Acțiunile se desfășoară pe un interval de timp de 600 s. Răspunsul dinamic obținut este exprimat numeric și grafic prin parametrii stării mecanice considerată ca fiind alcătuită din cele două stări (cinematică și statică) tradiționale, parametrii specifici calculați fiind: deplasări, accelerații, forțe tăietoare de bază. Prezentarea valorilor acestor parametri se face într-o manieră comparativă (Fig. 7.2÷Fig. 7.4) și este însoțită de scurte comentarii adecvate situației.

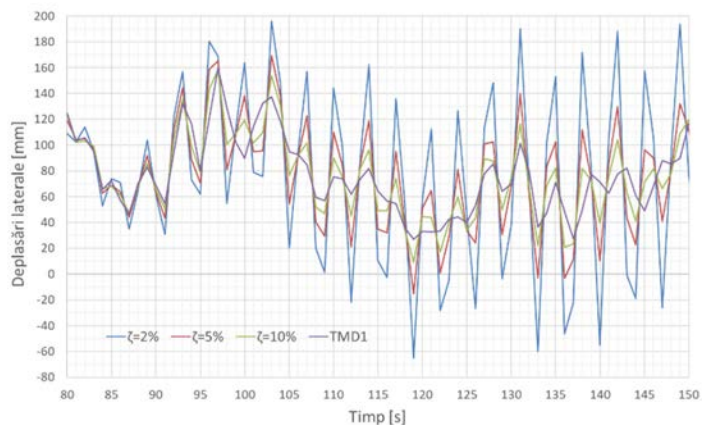


Fig. 7.2. Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S3, vântul V1 ($t \in [80 \div 150]$)

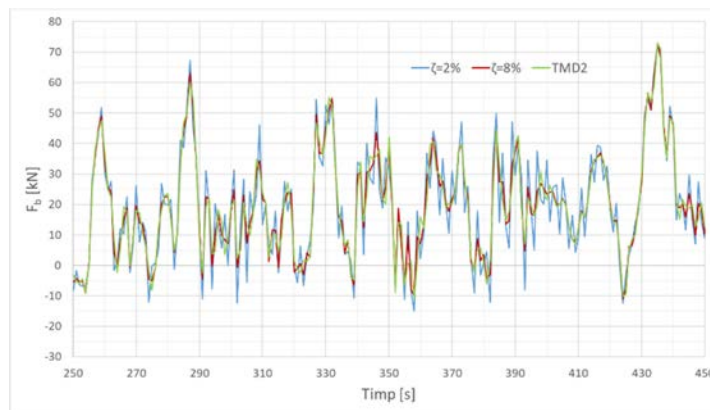


Fig. 7.3. Forța tăietoare de bază, structura S1, vântul CFD ($t \in [250 \div 450]$)

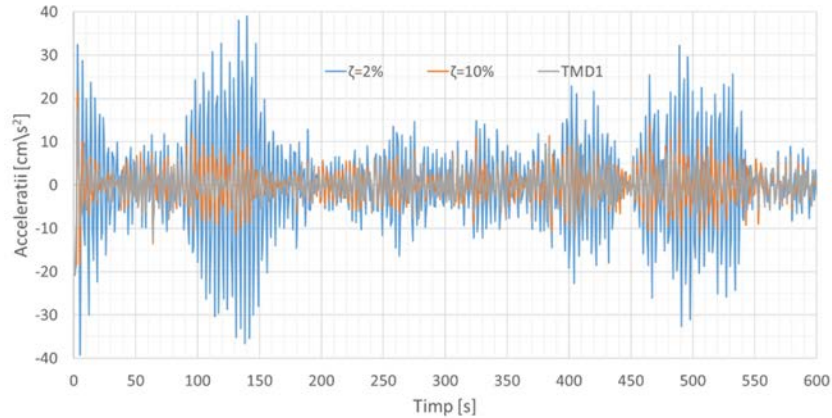


Fig. 7.4. Acceleratii ale ultimului nivel, structura S3, vântul V1

Rezultatele numerice obținute pentru cele trei structuri analizate, acționate de forțe variabile în timp, în multiplele situații de echipare și prezentarea comparativă a acestor rezultate, au permis concluzionări asociate răspunsurilor dinamice (prin diferitele lor componente). Autorul consideră că rezultatele și modul lor de prezentare permit concluzii utile privind răspunsul dinamic exprimat atât prin clasicele deplasări laterale de nivel și forțe tăietoare de bază cât și prin componente de tip accelerații laterale de nivel.

Un alt obiectiv distinct al cercetării este studiul eficienței diferitelor sisteme de protecție pasivă a structurilor acționate de vânt. Acest obiectiv se integrează în mod firesc în analizele dinamice efectuate și, în același timp, constituie o preocupare importantă și actuală atât în componenta sa teoretică cât și în cea practică [123, 124]. Îndeplinirea acestui obiectiv constă în prezentarea comparativă a eficienței amortizării pasive generate de masele adăugate exprimată prin valorile parametrilor răspunsului dinamic (Fig. 7.5÷Fig. 7.7).

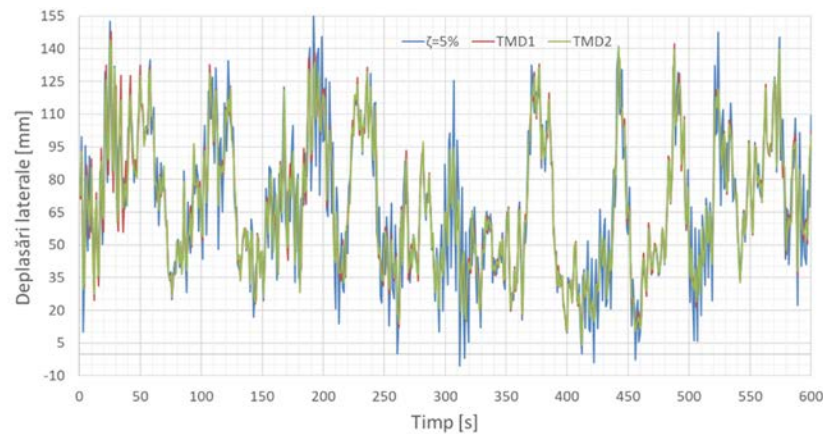


Fig. 7.5. Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S2, vântul V3

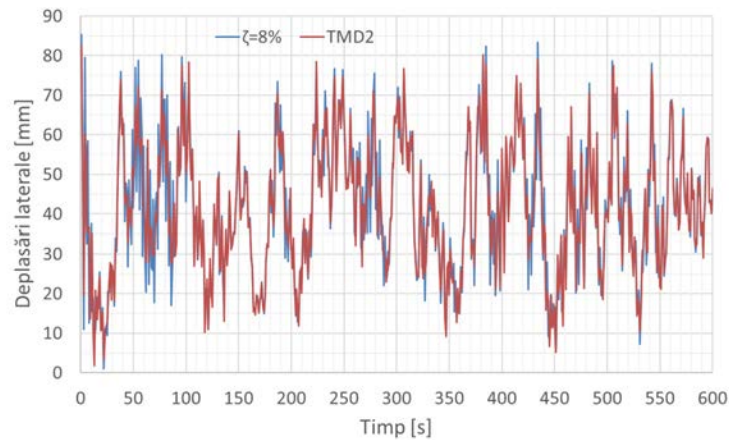


Fig. 7.6. Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S1, vântul V1

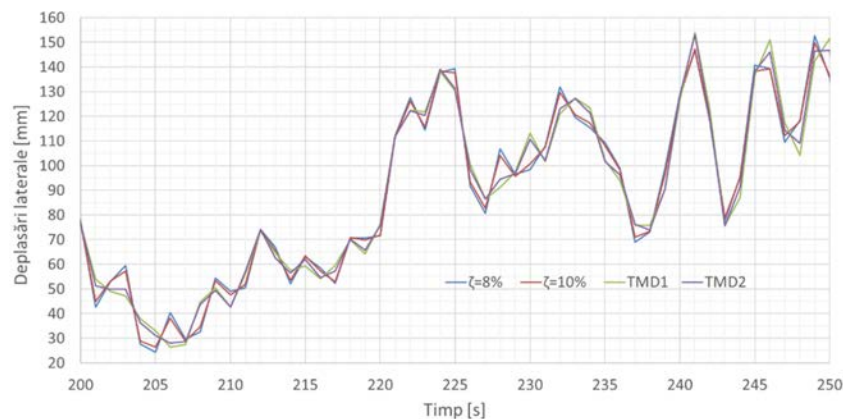


Fig. 7.7. Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S3, vântul V1 ($t \in [200, 250]$)

Răspunsul dinamic în deplasări indică o eficiență a maselor adăugate cvasi-echivalentă cu nivelul de 7%- 8% al valorii fracțiunii de amortizare critică (Fig. 7.6). Această concluzie este consistentă cu echivalări ale eficienței maselor adăugate prin exprimarea în valori ale fracțiunii de amortizare critică prezentate în literatura de specialitate pentru $m=0.04$ [125, 126]. În cercetarea întreprinsă, masele adăugate (reprezentând 4% din masa totală a structurii încărcate asociată combinației adecvate acțiunii vântului) au fost amplasate atât la ultimul nivel cât și la un nivel intermediar (Fig. 6.3, Fig. 6.4). Rezultatele numerice asociate răspunsului dinamic în deplasări ale ultimului nivel evidențiază diferențe relativ ne semnificative între cele două cazuri de amplasare a maselor adăugate (Fig. 7.8, Fig. 7.9).

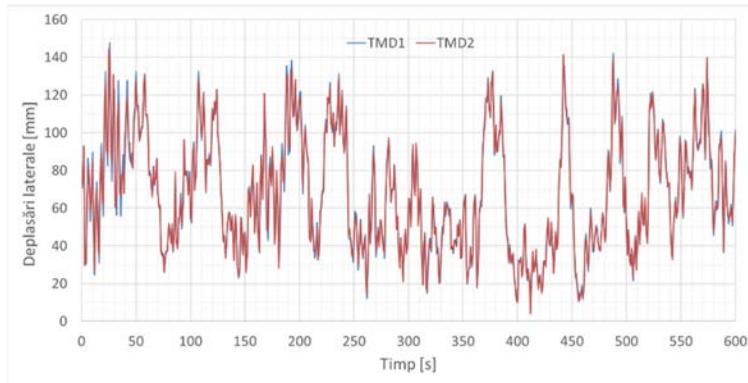


Fig. 7.8. Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S2, vântul V3

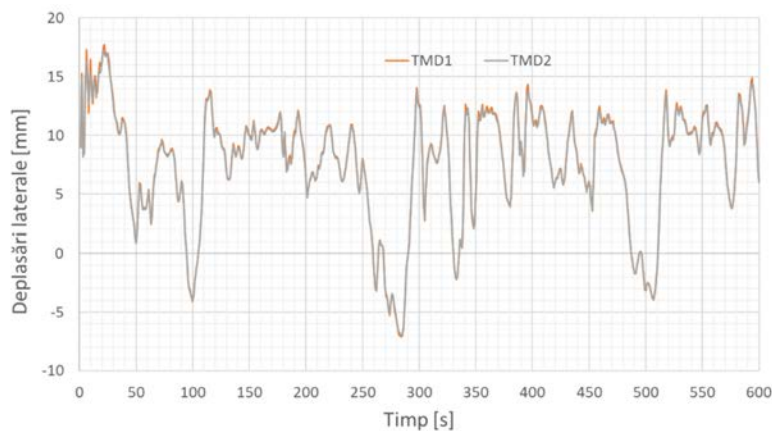


Fig. 7.9. Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S2, vântul CFD

Un alt obiectiv al cercetării întreprinse este cel de extindere a cuprinderii stării mecanice tradiționale asupra stării energetice a structurii. Starea mecanică tradițională alcătuită din starea cinematică (exprimată în Ingineria Civilă prin deplasări și deformații) și starea statică (care include eforturile secționale și cele unitare din secțiuni) guvernează, în mare măsură, activitatea de analiză și sinteză structurală atât în cazul acțiunilor statice cât și în cazul acțiunilor dinamice. Starea mecanică a structurii exprimată prin sub-stările cinematică și, respectiv statică nu poate include starea energetică a structurii acționate dinamic.

De ce - totuși - trebuie inclusă energia asociată structurii acționate dinamic stării mecanice tradiționale? Această întrebare este justificată de faptul că în nicio analiză structurală inginerului proiectant nu i se cere să se încadreze în valori limită ale niciunei componente energetice. Așa cum, de exemplu, i se cere să se încadreze în valori maxime ale eforturilor unitare, ale deplasărilor laterale relative de nivel etc., componenta energetică a stării mecanice este, însă, necesară pentru includerea în analiza structurală a nivelului de amortizare (inerentă / adăugată) a structurii. Energia și amortizarea sunt două fețe inseparabile ale aceluiași fenomen mecanic - mișcarea. Efectul sau chiar eficiența protecției pasive a structurilor la acțiuni dinamice (seism, vânt, etc.) pot fi

evaluate numai prin referiri la starea energetică a structurii respective. În cercetarea întreprinsă, dezvoltarea acestui obiectiv al includerii stării energetice în starea mecanică, este realizat prin referiri la două componente energetice: energia de input E_i și energia disipată E_d prin amortizare adăugată de tip liniar vâcos și, respectiv prin mase adăugate (Fig. 7.10, Fig. 7.11).

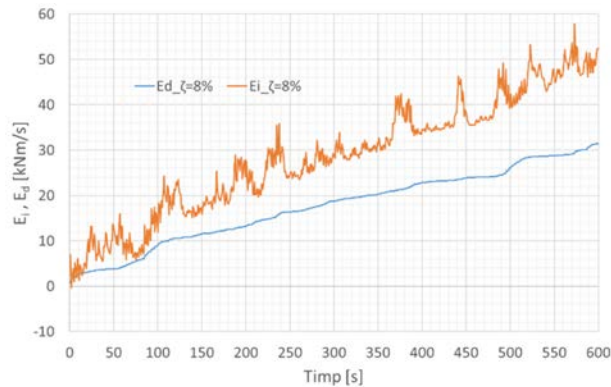


Fig. 7.10. Energie indusă vs energie disipată, structura S1, vântul V3

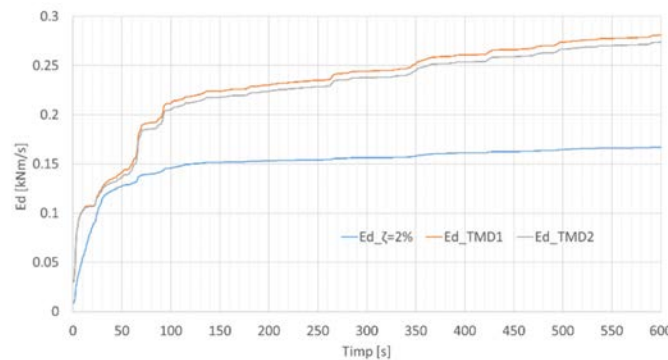


Fig. 7.11. Energie disipată, structura S3, vântul CFD

Implicarea stării energetice - mai ales prin componenta E_d - permite evaluarea simplă a eficienței amortizării pasive la acțiunea dinamică a vântului precum și o comparație rapidă a eficienței diferitelor niveluri de amortizare inclusiv prin mase adăugate (Fig. 7.11).

7.2. Contribuții la dezvoltarea cercetării în domeniu

În prezent, analiza structurilor specifice Ingineriei Civile a atins dezvoltări cuprinzătoare din punct de vedere al tipurilor de structuri și niveluri de profunzime care includ detalii de execuție a elementelor structurale. Această dezvoltare include de multă vreme analize dinamice ale structurilor acționate de astfel de încărcări. Practica proiectării structurilor specifice Ingineriei Civile este dominată de transformarea acțiunilor în forțe. Absolvenții facultăților de construcții din întreaga lume sunt capabili să transforme în forțe mișcarea indusă de cutremur unei construcții. Programele de calcul au capacități imense de analiză și sinteză structurală odată ce li se furnizează geometria generală a structurilor și

încărcările care le acționează. În contrast cu această dezvoltare, de multe ori acțiunile dinamice sunt considerate ca forțe statice afectate de coeficienți / parametrii care să asigure capacitatea structurii de a răspunde la solicitarea dinamică. Cel mai adecvat exemplu îl constituie acțiunea seismică care este transformată în forțe de nivel aplicate static. La fel este soluționată - cel puțin în normativele de proiectare [1, 2, 127] - acțiunea vântului. A considera, în aceste zile, vântul ca acționând static - incluzând parametrii care acoperă efectul de rafală și de flexibilitate a structurii - generează o imagine contrastantă cu efectele neobișnuite și dezastruoase ale acțiunii vântului asupra elementelor naturii (păduri, foc) și a mediului construit.

În acest context, autorul consideră că modelarea structurilor multi-etajate acționate de vânt ca sisteme dinamice cu număr finit de grade de libertate - incluzând vântul ca acțiune dinamică - este o contribuție pe cât de modestă pe atât de necesară pentru trecerea de la *static* la *dinamic*.

În acest context, al considerării specificității dinamice a acțiunii, includerea stării energetice - alături de starea cinematică și de cea statică - în starea mecanică a structurii este o întreprindere care realizează consensul între acțiune (vântul considerat dinamic) și răspunsul structurii (exprimat în componente energetice). Starea mecanică tradițională prin care se exprimă răspunsul unei structuri este constituită exclusiv din componente statice: eforturi unitare, eforturi secționale, deplasări, deformații. Niciunul dintre acești parametri nu implică efectul cinematic de mișcare de vibrație indus de acțiunea dinamică a vântului. Energia (prin componentele sale E_i , E_d , E_k , E_s) este entitatea cea mai adecvată pentru exprimarea răspunsului dinamic al structurii. Formularea stării energetice a structurilor multi-etajate acționate de vânt este, astfel, o contribuție la dezvoltarea Mecanicii structurilor de construcții. Abordarea energetică a analizei structurilor de construcții ar fi incompletă în lipsa abordării fenomenului de amortizare. Mișcarea (exprimată prin componente energetice) indusă de acțiunea dinamică a vântului este inexorabil însoțită de amortizarea sa. În studiul întreprins în această teză, analizele structurale, exprimate în ecuații de bilanț energetic, includ amortizarea (Fig. 7.12). Structurile analizate sunt considerate într-o situație de referință exprimată prin valoarea de 2% a fracțiunii de amortizare critică și prin valori superioare ale amortizării adăugate de tip liniar vâscos.

În contextul abordării amortizării, analizele structurale efectuate includ și protecția prin mase adăugate. Efectul favorabil al maselor adăugate asupra amortizării stării de mișcare este conșcut și studiat [128, 129]. Referitor la deplasările laterale de nivel (un parametru al răspunsului structural foarte intuitiv), rezultatele numerice obținute pentru componentele răspunsului la vânt (Fig.7.13) evidențiază eficacitatea crescută a echipării cu contravânturi față de echiparea cu amortizare adăugată.

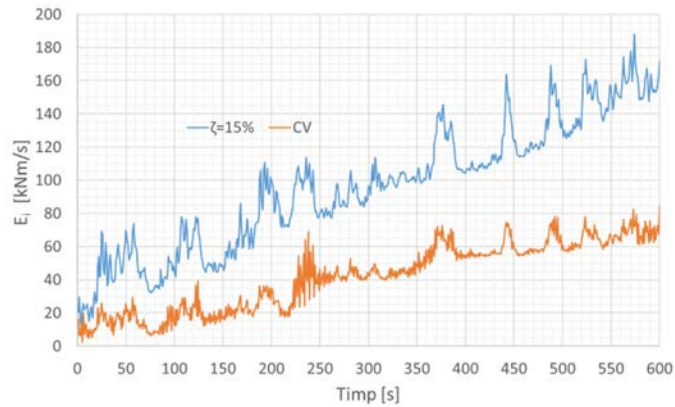


Fig. 7.12. Energie indusă, structura S3, vântul V3

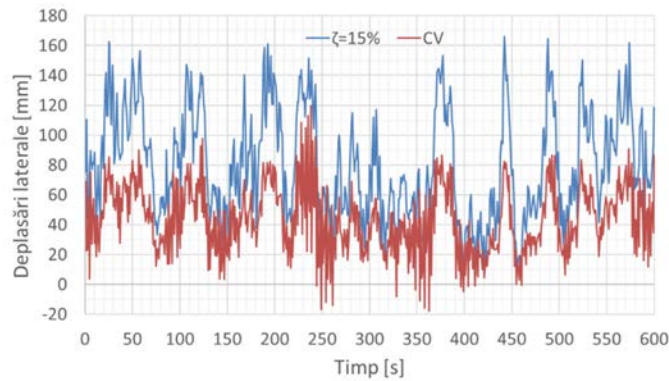


Fig. 7.13. Deplasări laterale ale ultimului nivel, structura S3, vântul V3

Contribuția autorului tezei - în acest context - nu constă în evidențierea reducerii valorilor parametrilor cinematici (deplasări laterale - de exemplu) a structurilor echipate cu amortizare ci în abordarea amortizării în contextul stării energetice a structurii. În același timp, prin valorile unor parametri ai răspunsului structural, efectul de protecție pasivă al masei adăugate este echivalat cu valori ale fracțiunii de amortizare critică. De asemenea, este analizată eficiența amplasării masei adăugate și la alte niveluri ale structurii în afară ultimului nivel. În mod tradițional, eficiența protecției pasive este exprimată prin reducerea valorilor răspunsului dinamic și a duratei stării de vibrație [89, 92, 130]. Abordarea energetică a răspunsului la vânt permite exprimarea eficienței amortizării adăugate (inclusiv prin mase adăugate) prin cantitatea de energie disipată E_d . Considerarea amortizării este - în opinia autorului - o modalitate adecvată de evaluare a eficienței protecției pasive a structurilor acționate dinamic, iar exprimarea acestei eficiențe prin parametrul energie disipată E_d constituie un tablou complex al comportării structurii incluzând (în energia disipată) toți factorii care definesc mișcarea: elasticitatea structurii, starea inerțială a acesteia, nivelul de amortizare, acțiunea dinamică. Preocuparea pentru evidențierea dependenței acestui parametru de sistemul de protecție pasivă este reflectată în numeroasele rezultate obținute din analizele structurale efectuate.

Vântul și structura asupra căreia acționează formează un sistem inter-activ. În prevederile normative de proiectare, interacțiunea vânt-structură este luată în considerare printr-un coeficient C_d [2] care depinde preponderent de flexibilitatea laterală a structurii. În studiile întreprinse în teză interacțiunea vânt-formă structurală este abordată prin analize specifice Mecanicii Fluidelor. Dependența acțiunii vântului de structura asupra căreia acționează nu se manifestă doar prin flexibilitatea laterală a stucturii ci și prin geometria generală a stucturii și vecinătățile cu alte structuri. Abordarea interacțiunii vânt-formă structurală-vecinătăți prin cadrul oferit de Mecanica Fluidelor permite o modelare în elemente finite a amplasamentului și considerarea unui tunel virtual prin care acționează vântul în acest amplasament. În acest fel, rezultatele obținute evidențiază diferențele dintre rezultatele obținute prin abordarea cvasi-staționară și cele obținute prin abordarea CFD: în abordarea cvasi-staționară presiunea exercitată de vânt asupra clădirii este direct proporțională cu viteza vântului (Fig. 7.14) în timp ce în abordarea CFD variația presiunii vântului nu mai este afină cu variația vitezei acestuia (Fig. 7.15).

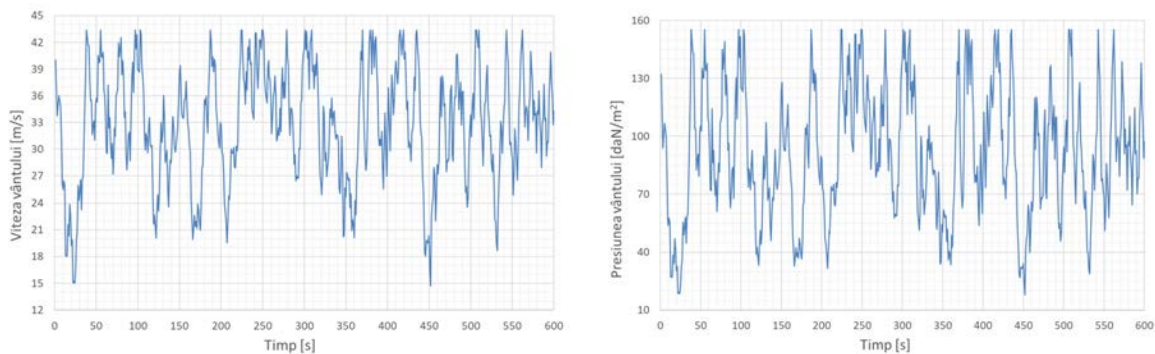


Fig. 7.14. Viteză vs presiune în abordarea cvasi-staționară, structura S1, vântul V1, $z=30,0$ m

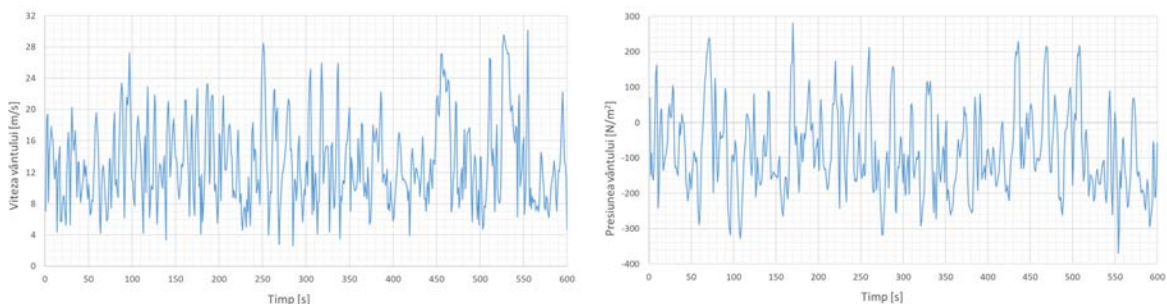


Fig. 7.15. Viteză vs presiune în abordarea CFD, Structura S1, vântul CFD, $z=32,8$ m

Analizele structurilor efectuate în acest context (CFD) constituie o contribuție a studiului întreprins la creșterea gradului de modelare virtuală a acțiunii vântului.

În practica proiectării structurilor multi-etajate acționate de vânt, echiparea structurilor cu contravântuiri este un loc comun. În analizele structurale întreprinse în teză, este cuprinsă o evaluare a influenței rigidității laterale a structurii echipate cu contravântuiri

asupra răspunsului structural la vânt. Se constată că răspunsul în accelerații laterale de nivel al structurilor mai rigide - prin echipare cu contravântuiri - este caracterizat de valori ridicate ale acestui parametru (accelerații) al răspunsului structural. Includerea accelerațiilor laterale de nivel între parametrii tradiționali ai răspunsului structural constituie o abordare recentă în acest domeniu [131-133]. Accelerațiile laterale de nivel influențează nu atât răspunsul structural propriu-zis cât, mai ales, echipamentele specifice funcțiunii clădirii și confortul ocupanților. Rezultatele obținute prin analizele structurale referitoare la influența rigidității laterale asupra accelerațiilor de nivel este, de asemenea, o contribuție la dezvoltarea analizei structurilor.

În acest context al studierii accelerațiilor laterale de nivel induse de acțiunea dinamică a vântului, autorul tezei evidențiază lipsa din normativele de proiectare a prevederilor referitoare la relația rigiditate laterală-accelerații.

Forța tăietoare seismică de bază și componentele sale de nivel sunt parametrii populari și bine-cunoscuți în analiza seismică a structurilor multi-etajate. Calculul și evidențierea forței tăietoare de bază în cazul acțiunii vântului nu are o continuitate în descompunerea sa în componente de nivel. Totuși, analizele structurale și rezultatele numerice asociate includ forța tăietoare de bază în spectrul parametrilor statici ai răspunsului structural. În acest fel, se poate concluziona că echiparea cu contravântuiri (în general, creșterea rigidității laterale a structurii) generează forțe tăietoare de bază din vânt mai mici (Fig. 7.16) spre deosebire de cazul acțiunii seismice când creșterea rigidității laterale conduce la creșterea forței tăietoare seismice de bază (Fig. 7.17). De asemenea, se constată că - din punct de vedere al forței tăietoare de bază - echiparea cu contravântuiri și echiparea cu mase adăugate sunt cvasi-echivalente (Fig. 6.59).

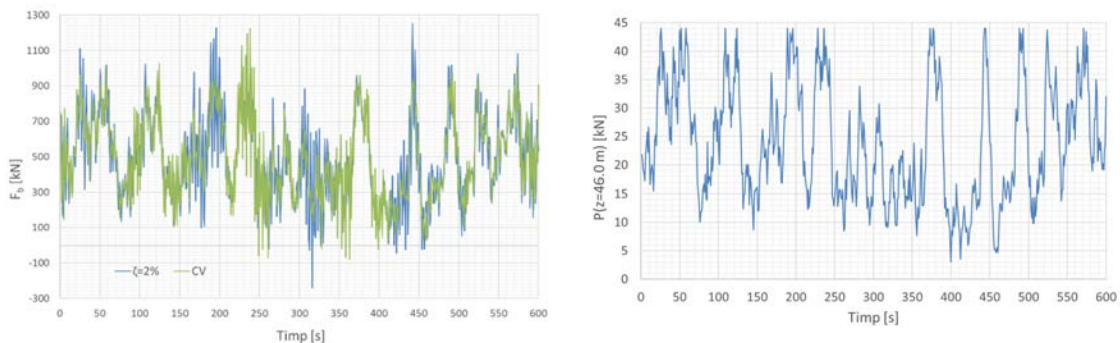


Fig. 7.16. Forța tăietoare de bază vs acțiunea vântului V3 la $z=46.0$ m, structura S3

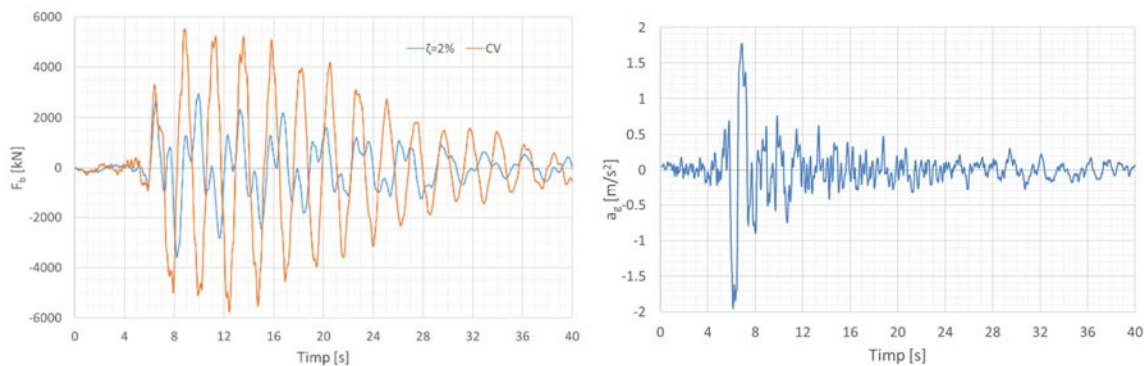


Fig. 7.17. Forța tăietoare de bază vs acțiunea seismică Vrancea 1977, structura S3

7.3. Direcții de cercetare viitoare

Experiența acumulată de autorul tezei în decursul cercetării întrprinse, rezultatele obținute în modelarea CFD dar, mai ales, tendința actuală de abordare - modelarea CFD - a acțiunilor dinamice ale fluidelor (vânt [134], gaz [135], tsunami [136]) asupra structurilor din domeniul Inginerie Civile și a interacțiunii acestora cu structurile sunt factorii care îndreaptă obiectivul continuării și dezvoltării cercetării înspre acest domeniu.

În cazul acțiunii vântului asupra structurilor multietajate, atât acțiunea în sine (vântul) cât și răspunsul dinamic (de exemplu, deplasări laterale de nivel) sunt mișcări de *vibrații nestabilizate* [137]. Un astfel de fenomen dinamic poate fi modelat mai realist prin abordarea CFD incluzând starea de elasticitate (flexibilitate / rigiditate), de amortizare și geometria spațială a structurilor.

Înțelegerea mecanismului de interacțiune între corpul în mișcare (structura 3D - în acest caz) și mediul înconjurător (aerul în mișcare într-un mediu 3D construit) este încă o provocare în domeniul ingineriei structurale. Mecanismul de interacțiune este cunoscut - în mod popular - ca Interacțiunea Fluid-Structură *FSI (Fluid Structure Interaction)* și se limitează încă la cuantificarea efectului dinamic generat de interacțiunea structurii cu un fluid turbulent cum este fenomenul de bătaie (fluttering) al structurilor flexibile sau al suprastructurilor podurilor suspendate.

O caracteristică principală a abordării FSI este interdependența formulării CFD de formularea specifică calculului din Mecanica Solidelor (*Computational Solid Mechanics - CSM*). Interdependența se manifestă prin faptul că structura se deformează sub acțiunea fluidului iar deformarea structurii modifică geometria curgerii acestuia. Rezultatul este, printre altele, o modificare a distribuției încărcărilor, ceea ce reprezintă o abordare care implică atât acțiunea cât și structura. Trebuie menționat, totuși, că interacțiunea dintre un fluid și structurile masive ale Inginerie Civile este slabă, caz în care această interacțiune este abordată ca o problema FSI într-un singur sens (de la fluid la structură). Există, însă, și cazuri în care interacțiunea are “dublu sens” ceea ce creează necesitatea unei modelări mecanice și matematice complexe [138].

Aceste considerații se constituie într-o platformă de start a dezvoltării acestui prim obiectiv de continuare a cercetării întreprinse.

Un al doilea obiectiv este cuprinderea în acțiunea dinamică a vântului a unor situații complexe de vecinătate a structurii analizate. În multe cazuri, o astfel de structură este amplasată într-un ansamblu de structuri, ceea ce conduce la modificări semnificative ale distribuției presiunii (de fapt, ale ambelor componente presiune / suucțiune ale acesteia) datorită fenomenului de rugozitate manifestat odată cu acțiunea simultană a vântului și asupra celorlalte structuri [119, 139, 140].

Bibliografie

- [1] SR-EN 1991-1-4/2006. "Acțiuni asupra construcțiilor. Acțiuni generale. Acțiuni ale vântului." ASRO, 2006.
- [2] CR 1-1-4/2012. "Cod de proiectare. Evaluarea acțiunii vântului asupra construcțiilor." ASRO, 2012.
- [3] P100-1/2013. "Cod de proiectare seismică. Partea I. Prevederi de proiectare pentru clădiri." UTCB, 2013.
- [4] P100-3/2018. "Cod de proiectare seismică. Partea a III-a. Prevederi pentru evaluarea seismică a clădirilor existente." UTCB, 2018.
- [5] <http://www.windaction.org/>
- [6] <https://www.popularmechanics.com/adventure/sports/a6449/how-the-dallas-cowboys-field-house-collapsed/>
- [7] https://en.m.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_%281940%29
- [8] Shellard, H. C. "Collapse of cooling towers in a gale, Ferrybridge, 1 November 1965." *Weather* 22, no. 6 (1967): 232-240.
- [9] Bamu, P. C., and A. Zingoni. "Damage, deterioration and the long-term structural performance of cooling-tower shells: A survey of developments over the past 50 years." *Engineering structures* 27, no. 12 (2005): 1794-1800.
- [10] STAS 10101/20-90. "Acțiuni în construcții. Încărcări date de vânt." IRS, 1990.
- [11] NP-082-2004. "Cod de proiectare. Bazele proiectării și acțiuni asupra construcțiilor. Acțiunea vântului." ASRO, 2004.
- [12] Holmes, John D. *Wind loading of structures*. CRC press, (2015).
- [13] Simiu, Emil. "Equivalent static wind loads for tall building design." *Journal of the Structural Division* 102.4 (1976): 719-737.
- [14] Davenport, Alan G. "Gust loading factors." *Journal of the Structural Division* 93.3 (1967): 11-34.
- [15] Bielecka, M., Barszcz, T., Bielecki, A. and Wójcik, M. "Fractal modelling of various wind characteristics for application in a cybernetic model of a wind turbine." *International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing* (2012): 531-538.
- [16] Bielecki, A., Barszcz, T. and Wójcik, M. "Modelling of a chaotic load of wind turbines drivetrain." *Mechanical Systems and Signal Processing* 54 (2015): 491-505.
- [17] Barszcz, T., Bielecka, M., Bielecki, A. and Wójcik, M. "Wind speed modelling using Weierstrass function fitted by a genetic algorithm." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 109 (2012): 68-78.
- [18] Kitagawa, T. and Nomura, T. "A wavelet-based method to generate artificial wind fluctuation data." *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 91, no. 7 (2003): 943-964.
- [19] Carassale, L. and Solari, G. "Monte Carlo simulation of wind velocity fields on complex structures." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94, no. 5 (2006): 323-339.
- [20] Chen, L., and C. W. Letchford. "Numerical simulation of extreme winds from thunderstorm downbursts." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 95, no. 9-11 (2007): 977-990.

- [21] Davenport, Alan Garnett. "The application of statistical concepts to the wind loading of structures." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 19, no. 4 (1961): 449-472.
- [22] Davenport, Alan Garnett. "Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 28, no. 2 (1964): 187-196.
- [23] Solari, Giovanni. "The role of analytical methods for evaluating the wind-induced response of structures." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, no. 12-15 (2002): 1453-1477.
- [24] Zhou, Yin, and Ahsan Kareem. "Gust loading factor: New model." *Journal of Structural Engineering* 127.2 (2001): 168-175.
- [25] Kelly, Mark. "From standard wind measurements to spectral characterization: turbulence length scale and distribution." *Wind Energy Science* 3, no. 2 (2018): 533-543.
- [26] Mann, Jakob. "Wind field simulation." *Probabilistic engineering mechanics* 13, no. 4 (1998): 269-282.
- [27] Kijewski, T., and A. Kareem. "Dynamic wind effects: a comparative study of provisions in codes and standards with wind tunnel data." *Wind Struct Int J* 1, no. 1 (1998): 77-109.
- [28] Davenport, Alan G. "Past, present and future of wind engineering." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90, no. 12-15 (2002): 1371-1380.
- [29] Baker, Bill, and James Pawlikowski. "The design and construction of the world's tallest building: The Burj Khalifa, Dubai." *Structural Engineering International* 25, no. 4 (2015): 389-394.
- [30] Spurr, Henry Vose. *Wind bracing: the importance of rigidity in high towers*. McGraw-Hill Book Company, Incorporated, (1930).
- [31] Hasama, T., Saka, T., Itoh, Y., Kondo, K., Yamamoto, M., Tamura, T. and Yokokawa, M. "Evaluation of aerodynamic instability for building using fluid-structure interaction analysis combined with multi-degree-of-freedom structure model and large-eddy simulation." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 197 (2020): 104052.
- [32] Andre, Michael, Máté Péntek, Kai-Uwe Bletzinger, and Roland Wüchner. "Aeroelastic simulation of the wind-excited torsional vibration of a parabolic trough solar collector." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 165 (2017): 67-78.
- [33] Ding, Fei, Ahsan Kareem, and Jiawei Wan. "Aerodynamic tailoring of structures using computational fluid dynamics." *Structural Engineering International* 29, no. 1 (2019): 26-39.
- [34] Kwon, Dae Kun, and Ahsan Kareem. "Generalized gust-front factor: A computational framework for wind load effects." *Engineering structures* 48 (2013): 635-644.
- [35] Balderrama, J. A., F. J. Masters, and K. R. Gurley. "Peak factor estimation in hurricane surface winds." *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 102 (2012): 1-13.
- [36] Hwang, Jae-Seung, Ahsan Kareem, and Hongjin Kim. "Wind load identification using wind tunnel test data by inverse analysis." *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 99, no. 1 (2011): 18-26.

- [37] An, Liqiang, Jiong Wu, Zhiqiang Zhang, and Ronglun Zhang. "Failure analysis of a lattice transmission tower collapse due to the super typhoon Rammasun in July 2014 in Hainan Province, China." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 182 (2018): 295-307.
- [38] Stathopoulos, Ted. "Wind loads on low buildings: in the wake of Alan Davenport's contributions." *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 91, no. 12-15 (2003): 1565-1585.
- [39] Isyumov, Nicholas. "Alan G. Davenport's mark on wind engineering." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104 (2012): 12-24.
- [40] Stathopoulos, Ted, and Hatem Alrawashdeh. "Wind loads on buildings: A code of practice perspective." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 206 (2020): 104338.
- [41] Kaimal, Jagadish Chandran, and John J. Finnigan. *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*. Oxford university press, 1994.
- [42] Davenport, Alan Gamett. "Wind loading of structures." *National Research Council of Canada, Division of Building Research, 1960, Technical Paper No 88* (1960).
- [43] Cook, N. J. "Simulation techniques for short test-section wind tunnels: roughness, barrier and mixing-device methods." In *Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications*, pp. 126-136. 1982.
- [44] Ueda, H., K. Hibi, Y. Tamura, and K. Fujii. "Multi-channel simultaneous fluctuating pressure measurement system and its applications." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 51, no. 1 (1994): 93-104.
- [45] Hui, Yi, Yukio Tamura, and Qingshan Yang. "Analysis of interference effects on torsional moment between two high-rise buildings based on pressure and flow field measurement." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 164 (2017): 54-68.
- [46] Murakami, S., A. Mochida, Y. Hayashi, and S. Sakamoto. "Numerical study on velocity-pressure field and wind forces for bluff bodies by κ - ϵ , ASM and LES." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 44, no. 1-3 (1992): 2841-2852.
- [47] Llaguno-Munitxa, Maider, Elie Bou-Zeid, and Marcus Hultmark. "The influence of building geometry on street canyon air flow: validation of large eddy simulations against wind tunnel experiments." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 165 (2017): 115-130.
- [48] Yan, B. W., and Q. S. Li. "Inflow turbulence generation methods with large eddy simulation for wind effects on tall buildings." *Computers & Fluids* 116 (2015): 158-175.
- [49] Bao, Wen Bo, Yu Yong Hu, and Yang Cui. "Wind Loads Simulation of Tall Building Structure Subjected to Wind-Structure Interaction." In *Advanced Materials Research*, vol. 163, pp. 4286-4289. Trans Tech Publications Ltd, 2011.
- [50] Huang, Shenghong, Rong Li, and Q. S. Li. "Numerical simulation on fluid-structure interaction of wind around super-tall building at high reynolds number conditions." *Struct. Eng. Mech* 46, no. 2 (2013): 197-212.
- [51] Li, S. Y., M. Liu, H. X. Li, Y. Hui, and Z. Q. Chen. "Effects of structural damping on wind-induced responses of a 243-meter-high solar tower based on a novel elastic test model." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 172 (2018): 1-11.

- [52] Kim, Y. C., Y. L. Lo, and C. H. Chang. "Characteristics of unsteady pressures on slender tall building." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 174 (2018): 344-357.
- [53] <https://www.britannica.com/science/Navier-Stokes-equation>
- [54] Alfonsi, Giancarlo. "Reynolds-averaged Navier–Stokes equations for turbulence modeling." (2009): 040802.
- [55] Jackson, Derek, and Brian Launder. "Osborne Reynolds and the publication of his papers on turbulent flow." *Annu. Rev. Fluid Mech.* 39 (2007): 19-35.
- [56] Spalart, Philippe, and Steven Allmaras. "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows." In *30th aerospace sciences meeting and exhibit*, p. 439. 1992.
- [57] Launder, Brian Edward, and Dudley Brian Spalding. "The numerical computation of turbulent flows." In *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*, pp. 96-116. Pergamon, 1983.
- [58] Murakami, Shuzo. "Overview of turbulence models applied in CWE–1997." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74 (1998): 1-24.
- [59] Wilcox, David C. "Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models." *AIAA journal* 26, no. 11 (1988): 1299-1310.
- [60] Menter, Florian R. "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications." *AIAA journal* 32, no. 8 (1994): 1598-1605.
- [61] Ansys, I. C. E. M. "CFD." *ICEM CFD theory guide, Ansys inc* (2012).
- [62] Franke, J., Ch Hirsch, A. G. Jensen, H. W. Krüs, M. Schatzmann, P. S. Westbury, S. D. Miles, J. A. Wisse, and N. G. Wright. "Recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment." In *Cost action C*, vol. 14. 2004.
- [63] Hall, R. C. "Evaluation of modelling uncertainty-CFD modelling of nearfield atmospheric dispersion." *EU Project EV5V-CT94-0531, Final Report. WS Atkins Consultants Ltd., Woodcote Grove, Ashley Road, Epsom, Surrey KT18 5BW, UK* (1997).
- [64] Baetke, Frank, Heinrich Werner, and Hans Wengle. "Numerical simulation of turbulent flow over surface-mounted obstacles with sharp edges and corners." *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics* 35 (1990): 129-147.
- [65] Liu, Sumei, Wuxuan Pan, Hao Zhang, Xionglei Cheng, Zhengwei Long, and Qingyan Chen. "CFD simulations of wind distribution in an urban community with a full-scale geometrical model." *Building and Environment* 117 (2017): 11-23.
- [66] Zhang, Xiaodong. *CFD simulation of neutral ABL flows*. Risø DTU-National Laboratory for Sustainable Energy, 2009.
- [67] Ansys, I. C. E. M. "CFD." *ICEM CFD theory guide, Ansys inc* (2015).
- [68] Hu, Peng, Y. L. Li, C. S. Cai, H. L. Liao, and G. J. Xu. "Numerical simulation of the neutral equilibrium atmospheric boundary layer using the SST k- ω turbulence model." *Wind and Structures* 17, no. 1 (2013): 87-105.
- [69] Elkhoury, M. "Assessment of turbulence models for the simulation of turbulent flows past bluff bodies." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 154 (2016): 10-20.
- [70] Sun, D., J. S. Owen, and N. G. Wright. "Application of the k- ω turbulence model for a wind-induced vibration study of 2D bluff bodies." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97, no. 2 (2009): 77-87.

- [71] Kaimal, J. C., J. C. J. Wyngaard, Y. Izumi, and O. R. Coté. "Spectral characteristics of surface-layer turbulence." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 98, no. 417 (1972): 563-589.
- [72] Von Karman, Theodore. "Progress in the statistical theory of turbulence." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 34, no. 11 (1948): 530.
- [73] Simiu, Emil, and Robert H. Scanlan. "Wind effects on structures: fundamentals and applications to design." (1996).
- [74] Welch, Peter. "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms." *IEEE Transactions on audio and electroacoustics* 15, no. 2 (1967): 70-73.
- [75] Andre, Michael Sean. "Aeroelastic Modeling and Simulation for the Assessment of Wind Effects on a Parabolic Trough Solar Collector." PhD diss., Technische Universität München, 2018.
- [76] Flamand, Olivier. "Scale questions in wind engineering experimentation." *Czasopismo Techniczne* (2015).
- [77] Choi, Chang-Koon, and Dae-Kun Kwon. "Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behavior of bluff body." *WIND STRUCT INT J* 1, no. 4 (1998): 351-364.
- [78] ASCE. "Wind tunnel testing for buildings and other structures." American Society of Civil Engineers, 2012.
- [79] Stathopoulos, Ted, and D. Surry. "Scale effects in wind tunnel testing of low buildings." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 13, no. 1-3 (1983): 313-326.
- [80] Penzien, Joseph. *Dynamics of structures*. McGraw-Hill, 1993.
- [81] Craig Jr, Roy R., and Andrew J. Kurdila. *Fundamentals of structural dynamics*. John Wiley & Sons, 2006.
- [82] De Silva, Clarence W., ed. *Vibration damping, control, and design*. CRC Press, 2007.
- [83] Adhikari, Sondipon, and Jim Woodhouse. "Identification of damping: part 1, viscous damping." *Journal of Sound and vibration* 243, no. 1 (2001): 43-61.
- [84] Adhikari, Sondipon. "Qualitative dynamic characteristics of a non-viscously damped oscillator." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 461, no. 2059 (2005): 2269-2288.
- [85] Bârsan, G. M. *Dinamică și stabilitatea construcțiilor*. EDP București, 1979.
- [86] Marin, C. *Vibrațiile structurilor mecanice*. Editura Impuls București, 2003.
- [87] Chopra, A. K. *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall International, 1995.
- [88] Tamura, Yukio. "Damping in buildings and estimation techniques." In *Advanced Structural Wind Engineering*, pp. 347-376. Springer, Tokyo, 2013.
- [89] Lădar Ioana. "Răspunsul seismic al structurilor metalice multietajate. O abordare energetică." Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2013.
- [90] Irwin, Peter A. "Bluff body aerodynamics in wind engineering." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, no. 6-7 (2008): 701-712.
- [91] Allsop, Andrew, Pat Dallard, and Brendon McNiven. "The Singapore Flyer and design of giant observation wheels, Singapore." *Structural engineering international* 19, no. 1 (2009): 12-16.

- [92] Delia Suciu. "Structuri metalice multietajate echipate cu masă adăugată. O abordare energetică." Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2014.
- [93] Febowitz, Joshua C. "Confusing The Wind: The Burj Khalifa, Mother Nature, and the Modern Skyscraper." *Inquiries Journal* 2, no. 01 (2010).
- [94] <https://www.taylordevices.com/products/fluid-viscous-dampers/>
- [95] <https://www.motioneering.ca/432-park>
- [96] CR 0-2012. "Cod de proiectare. Bazele proiectării construcțiilor." ASRO, 2012.
- [97] Sadek, Fahim, Bijan Mohraz, Andrew W. Taylor, and Riley M. Chung. "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 26, no. 6 (1997): 617-635.
- [98] Snaebjörnsson, J., and D. A. Reed. "Wind-induced Accelerations of a Building: A case study." *Engineering Structures* 13, no. 3 (1991): 268-280.
- [99] Longarini, Nicola, Luigi Cabras, Marco Zucca, Suvash Chapain, and Aly Mousaad Aly. "Structural improvements for tall buildings under wind loads: comparative study." *Shock and Vibration* 2017 (2017).
- [100] Wang, Qinhua, Haoshuai Qiao, Dario De Domenico, Zhiwen Zhu, and Zhuangning Xie. "Wind-induced response control of high-rise buildings using inerter-based vibration absorbers." *Applied Sciences* 9, no. 23 (2019): 5045.
- [101] Buzdugan, Gh. *Izolarea Antivibratorie a Mașinilor*. Editura Academiei Republicii Socialiste România, 1980.
- [102] Harris, C.M, Crede, C.E. *Șocuri și vibrații* (traducere din limba engleză). Editura Tehnică București, 1968.
- [103] VDI 2057-1 : 2017. "Human exposure to mechanical vibrations - whole-body vibration." Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 2017.
- [104] Chopra, Anil K. *Dynamics of structures*. Pearson Education India, 2007.
- [105] Wilson, Edward L. "Three-dimensional static and dynamic analysis of structures." *Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA* (1996).
- [106] SAP2000, C. S. I. "Analysis reference manual." *Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA* (2003).
- [107] Akbas, B., J. Shen, and H_ Hao. "Energy approach in performance-based seismic design of steel moment resisting frames for basic safety objective." *The structural design of tall buildings* 10, no. 3 (2001): 193-217.
- [108] Ordaz, Mario, Benjamin Huerta, and Eduardo Reinoso. "Exact computation of input-energy spectra from Fourier amplitude spectra." *Earthquake engineering & structural dynamics* 32, no. 4 (2003): 597-605.
- [109] Uang, Chia-Ming, and Vitelmo Victorio Bertero. *Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design*. Vol. 88. Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1988.
- [110] Chou, Chung-Che, and Chia-Ming Uang. "Evaluating distribution of seismic energy in multistory frames." In *13th World Conference on Earthquake Engineering*. 2004.
- [111] Bertero, Vitelmo V., and Amador Terán Gilmore. "Use of energy concepts in earthquake-resistant analysis and design: Issues and future directions." In *Memorias: Seminario latinoamericano de ingeniería sísmo resistente, 8 y primeras jornadas andinas de ingeniería estructural*, pp. 1-39. 1993.

- [112] López, O. A. "Plastic energy dissipated during an earthquake as a function of structural properties and ground motion characteristics." *Engineering structures* 22, no. 7 (2000): 784-792.
- [113] Ricciardelli, Francesco, Antonio Occhiuzzi, and Paolo Clemente. "Semi-active tuned mass damper control strategy for wind-excited structures." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 88, no. 1 (2000): 57-74.
- [114] Lu, Zheng, Jiawei Zhang, and Dianchao Wang. "Energy analysis of particle tuned mass damper systems with applications to MDOF structures under wind-induced excitation." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 218 (2021): 104766.
- [115] Popescu Adina. "Structuri metalice acționate seismic. Rigiditate laterală vs. amortizare adăugată." Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2015.
- [116] SR EN 1993-1-1. "Proiectarea structurilor de oțel. Reguli generale și reguli pentru clădiri." ASRO, 2006.
- [117] CR 1-1-3/2012. "Cod de proiectare. Evaluarea acțiunii zăpezii asupra construcțiilor." MDRT, 2012.
- [118] SR EN 1991-1-1. "Acțiuni asupra construcțiilor. Acțiuni generale. Greutăți specifice, greutăți proprii, încărcări utile pentru clădiri." ASRO, 2004.
- [119] Gough, H., M-F. King, P. Nathan, C. S. B. Grimmond, A. Robins, C. J. Noakes, Z. Luo, and J. F. Barlow. "Influence of neighbouring structures on building façade pressures: Comparison between full-scale, wind-tunnel, CFD and practitioner guidelines." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 189 (2019): 22-33.
- [120] Sun, Ying, Zhiyuan Li, Xiaoying Sun, Ning Su, and Shitao Peng. "Interference effects between two tall chimneys on wind loads and dynamic responses." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 206 (2020): 104227.
- [121] Goh, S. L., M. Chen, D. H. Popović, K. Aihara, D. Obradovic, and D. P. Mandic. "Complex-valued forecasting of wind profile." *Renewable Energy* 31, no. 11 (2006): 1733-1750.
- [122] Solari, Giovanni. "Thunderstorm response spectrum technique: theory and applications." *Engineering Structures* 108 (2016): 28-46.
- [123] Longarini, Nicola, Luigi Cabras, Marco Zucca, Suvash Chapain, and Aly Mousaad Aly. "Structural improvements for tall buildings under wind loads: comparative study." *Shock and Vibration* 2017 (2017).
- [124] Huang, Haoyu, and Wen-Shao Chang. "Re-tuning an off-tuned tuned mass damper by adjusting temperature of shape memory alloy: Exposed to wind action." In *Structures*, vol. 25, pp. 180-189. Elsevier, 2020.
- [125] Jerome, J. Cannon. "Introduction to structural motion control." *Prentice Hall Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey* 7458 (2002): 217-285.
- [126] Zhang, Qingwen, and Tianjian Ji. "Optimum design parameters for a tuned-mass-damper to maximise the equivalent damping ratio." *J Vib Eng Technol* 11, no. 4 (2012): 349-360.
- [127] ASCE 7-10. "Minimum design loads for buildings and other structures." American Society of Civil Engineers, 2013.
- [128] Lu, Zheng, Jiawei Zhang, and Dianchao Wang. "Energy analysis of particle tuned mass damper systems with applications to MDOF structures under wind-induced

- excitation." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 218 (2021): 104766.
- [129] Morales, César A. "A new approach to inertial damper design to control base displacement in isolated buildings." *Journal of Vibration and Control* (2021): 10775463211035903.
- [130] Prodan, O., I. Ladar, and P. Alexa. "Effectiveness of passive seismic control of steel structures." *WIT Transactions on Information and Communication Technologies* 43 (2010): 283-294.
- [131] Chan, C-M., and J. K. L. Chui. "Wind-induced response and serviceability design optimization of tall steel buildings." *Engineering Structures* 28, no. 4 (2006): 503-513.
- [132] Zeng, Xiaoshu, Yongbo Peng, and Jianbing Chen. "Serviceability-based damping optimization of randomly wind-excited high-rise buildings." *The structural design of tall and special buildings* 26, no. 11 (2017): e1371.
- [133] Pozos-Estrada, Adrian, H. P. Hong, and J. K. Galsworthy. "Serviceability design factors for wind-sensitive structures." *Canadian Journal of Civil Engineering* 37, no. 5 (2010): 728-738.
- [134] Sauca, Ana Camelia, Tudor Milchiş, and Ferdinand-Zsongor Gobesz. "Wind loading on solar panels." *Műszaki Tudományos Közlemények* 10, no. 1 (2019): 73-78.
- [135] Burghel, B. D., M. Botoş, S. Beldean-Galea, A. Cucu, T. Catalina, T. Dicu, G. Dobrei et al. "Comprehensive survey on radon mitigation and indoor air quality in energy efficient buildings from Romania." *Science of The Total Environment* 751 (2021): 141858.
- [136] Rauter, Matthias, L. Hoße, Ryan P. Mulligan, W. A. Take, and Finn Løvholt. "Numerical simulation of impulse wave generation by idealized landslides with OpenFOAM." *Coastal Engineering* 165 (2021): 103815.
- [137] Anantharamu, Sreevatsa. "Parallel numerical methods and data-driven analysis techniques for turbulent fluid-structure interaction." PhD diss., University of Minnesota, 2021.
- [138] Zorrilla, Rubén, Riccardo Rossi, Roland Wüchner, and Eugenio Oñate. "An embedded Finite Element framework for the resolution of strongly coupled Fluid-Structure Interaction problems. Application to volumetric and membrane-like structures." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 368 (2020): 113179.
- [139] An, Karl, Jimmy Chi Hung Fung, and Steve HL Yim. "Sensitivity of inflow boundary conditions on downstream wind and turbulence profiles through building obstacles using a CFD approach." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 115 (2013): 137-149.
- [140] Piroozmand, Pasha, Gianluca Mussetti, Jonas Allegrini, Mohammad Haji Mohammadi, Ehsan Akrami, and Jan Carmeliet. "Coupled CFD framework with mesoscale urban climate model: Application to microscale urban flows with weak synoptic forcing." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 197 (2020): 104059.