

Cuprins

1	Introducere	8
2	Cascada directă de energie și ipotezele Kolmogorov	12
2.1	Cascada de energie	12
2.2	Ipotezele Kolmogorov	14
3	Ecuatiile fundamentale de curgere a unui fluid vâscos	20
3.1	Ecuția de continuitate	20
3.2	Ecuția impulsului	21
3.2.1	Fluide Newtoniene	22
3.2.2	Ecuțiile Navier-Stokes	22
3.3	Ecuția de vorticitate	24
3.3.1	Deformarea vortexului și limita de vorticitate	25
3.3.2	Viteza de deformare și viteza de rotație	26
3.4	Ecuția energiei	26
4	Descriptori statistici ai turbulenței	28
4.1	Funcția densitate de probabilitate	28
4.1.1	Valoarea medie	29
4.1.2	Varianța și deviația standard	30
4.1.3	Standardizare	31
4.1.4	Asimetria (<i>skewness</i>)	31
4.1.5	Platitudinea (<i>kurtosis</i>)	32
4.2	Tipuri de mediere	33
4.2.1	Medierea temporală	33
4.2.2	Medierea spațială	35
4.2.3	Medierea pe ansamblu (Medierea de fază)	35
4.2.4	Medie ponderată de densitate pentru fluide compresibile	37
4.2.5	Medierea condițională (media pe eşantioane)	40
4.3	Funcții de structură	41
4.4	Funcții de corelație	43

4.4.1	Corelații unipunctuale	43
4.4.2	Corelații bipunctuale	44
4.4.3	Scala de lungime integrală	46
4.4.4	Microscalele Taylor	46
5	Ecuatiile fundamentale ale curgerii turbulente	49
5.1	Ecuatiile Navier-Stokes mediate	49
5.1.1	Ecuatia energiei cinetice de curgere medie	51
5.2	Ecuatia mediată a energiei	52
5.3	Ecuatiile pentru mărimile fluctuante	54
5.3.1	Ecuatia pentru \tilde{u}_j	54
5.3.2	Ecuatia pentru \tilde{T}	55
5.4	Ecuatii de transport turbulent	56
5.4.1	Ecuatia de transport pentru momentul de ordin doi $\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$	56
5.4.2	Ecuatia energiei cinetice turbulente medii	58
5.4.3	Ecuatia ratei de disipare	60
5.4.4	Ecuatia fluxului de căldură turbulentă Reynolds	62
5.5	Caracteristicile fluxurilor turbulente simple	63
5.5.1	Fluxuri turbulente libere	63
5.5.2	Stratul limită cu un perete solid	66
5.5.3	Fluxuri turbulente complexe	66
5.6	Problema de închidere și modele de turbulență	67
6	Modele de ordinul întâi	70
6.1	Model zero ecuații - modelul lungimii de mixare	70
6.1.1	Aplicație la stratul de mixare	72
7	Modele de turbulență cu închidere de ordin doi	75
7.1	Postulări ale modelului turbulenței	75
7.1.1	Postulatele Stokes-Fourier (Modelul de fluid vâscos conductor)	76
7.1.2	Postulatele modelelor de turbulență	78
7.2	Modelarea ecuației pentru $\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$	79
7.2.1	Modelarea termenului de difuzie	79
7.2.2	Modelarea termenului de disipație	81
7.2.3	Modelarea termenului presiune-deformare (<i>PD</i>)	82
7.2.4	Ecuatia pentru $\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$ modelată	88
7.3	Modelarea ecuației pentru k și ϵ	88
7.3.1	Modelarea ecuației pentru k	88
7.3.2	Ecuatia de modelare a lui ϵ	89
7.4	Modelarea ecuației pentru $\overline{\tilde{u}_i \tilde{T}}$	93
7.4.1	Ecuatia modelului pentru $\overline{\tilde{u}_i \tilde{T}}$	97

7.4.2	Ecuția modelului pentru varianța scalară $\overline{T^2}$	97
7.5	Determinarea coeficienților de model	98
7.5.1	Observații generale	98
7.5.2	Determinarea coeficientului $C_{\epsilon 2}$	98
7.5.3	Determinarea coeficientului C_1	100
8	Discuția modelelor de turbulență	102
8.1	Versiuni ale modelelor de turbulență de ordin doi	102
8.1.1	Modelul diferențial (RSM)	102
8.1.2	Modelul algebric al tensiunii (ASM)	103
8.1.3	Modelul de vâscozitate turbulentă	106
8.1.4	Modelul $k - \epsilon$ de tensiune Reynolds neliniară	107
8.1.5	Modele multiscală	109
8.1.6	Modelul uni-ecuație	111
8.2	Predicții pentru curgerea turbulentă cu forfecare liberă	111
8.2.1	Model diferențial (RSM bidimensional)	112
8.2.2	Modelele $k-\epsilon-A$ și $k-\epsilon-E$	114
8.2.3	Predicția curgerilor turbulente de forfecare liberă cu modele de turbulență anizotropă	116
8.3	Funcția problemei	118
8.3.1	Folosirea unei funcții a problemei	118
8.3.2	Model zero-ecuații (Funcția lungime de mixare)	118
8.3.3	Modelul $k - \epsilon$	119
8.4	Modelul de turbulență de ordin doi bi-scală	120
8.4.1	Modelarea bi-scală a ecuației pentru ϵ	121
9	Turbulența în vecinătatea peretelui	123
9.1	Analiza de similaritate și distribuția vitezei	123
9.2	Distribuția de temperatură	126
9.3	Funcții de perete	127
9.3.1	Viteza fluidului lângă perete	127
9.3.2	Temperatura lângă perete	133
9.3.3	Ecuția tensiunii Reynolds lângă perete	136
9.3.4	Energia cinetică k și tensiunea Reynolds în turbulența de lângă perete	139
9.3.5	Funcția de disipare ϵ lângă perete	140
9.3.6	Deficiențe ale abordării prin funcții de perete	141
9.3.7	Modificări pentru modele cu număr Reynolds mic	142

10 Simulări numerice directe (DNS)	143
10.1 Probleme numerice în DNS	144
10.1.1 Discretizarea spațială	144
10.1.2 Rezoluția spațială	145
10.1.3 Discretizarea temporală	146
10.1.4 Condiții de frontieră	148
10.2 Modelarea DNS a turbulenței	148
11 Simulări de vârtej mare (LES)	150
11.1 Filtrarea spațială a ecuațiilor Navier-Stokes nestaționare	151
11.1.1 Funcții de filtrare	151
11.1.2 Ecuațiile Navier-Stokes nestaționare filtrate	154
11.2 Modelarea scalei subgrid	156
11.2.1 Modelul SGS al lui Smagorinsky	156
11.2.2 Modelul SGS Smagorinsky-Lilly	157
11.2.3 Modele SGS diferențiale	158
11.2.4 Modele SGS avansate	160
11.3 Probleme numerice în LES	162
11.3.1 Avansarea temporală în LES	162
11.3.2 Discretizarea spațială	163
11.3.3 Conservarea	163
11.3.4 Condiții de frontieră	164
11.3.5 Condiții inițiale	166
11.4 Modele ale tensiunii de echilibru în problema peretelui	167
11.4.1 Modelul Deardorff	167
11.4.2 Modelul Schumann-Grotzbach (SG)	168
11.4.3 Modelul instantaneu	169
12 Metodologia computațională	171
12.1 Metode numerice aplicate în LES	171
12.2 Practicile de discretizare	173
12.2.1 Discretizarea domeniului	173
12.2.2 Discretizarea spațială	174
12.2.3 Integrarea temporală	180
12.3 Implementarea modelării pentru modelul energie turbulentă uniecuatie	183
12.4 Prescripții impuse	185
12.4.1 Condiții de frontieră	185
12.4.2 Proprietăți turbulente ale pereților	188
12.5 Convecția și difuzia staționară unidimensională	190
12.5.1 Schema diferențierii finite centrate	192
12.5.2 Proprietățile schemelor de discretizare	200

12.5.3	Schema de discretizare în amonte (ascendentă)	203
12.5.4	Schema mixtă de diferențe finite	209
12.5.5	Schema de diferențe finite pătratică în amonte (QUICK)	210
A	Exemple de funcții de distribuție de probabilitate	216
A.1	Distribuția normală (Gauss)	216
A.2	Distribuția Cauchy	219
A.3	Distribuția Maxwell	220
A.4	Distribuție compusă	222
B	Soluții probleme	224
	Bibliografie	246