

**ION POPA**

**MIRCEA DEGERATU**

**SIMULAREA STRATULUI LIMITĂ  
ATMOSFERIC ÎN TUNEL AERODINAMIC**

**Editura Academiei Oamenilor de Știință din România  
București, 2019**

Referent științific: **Prof. univ. dr. ing. Anton ANTON**

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României**  
**POPA, ION**

**Simularea stratului limită atmosferic în tunel aerodinamic / Ion Popa, Mircea Degeratu. - București : Editura Academiei Oamenilor de Știință din România, 2019**

Conține bibliografie

ISBN 978-606-8636-65-8

I. Degeratu, Mircea

551.55

62

© **Editura Academiei Oamenilor de Știință din România, 2019**

## PREFAȚĂ

Prezenta lucrare se referă la stratul limită atmosferic fiind tratate atât probleme teoretice privind caracteristicile acestuia cât și probleme legate de simularea lui în tunel aerodinamic cu strat limită atmosferic simulat.

Stratul limită atmosferic reprezintă acea zonă din atmosfera terestră în care se resimte influența suprafeței Pământului atât din punct de vedere dinamic cât și din punct de vedere termic. În zona stratului limită atmosferic se produc fenomene complexe, specifice ingineriei vântului, dintre care pot fi enumerate acțiunea vântului pe structuri cu și fără răspuns dinamic, acțiunea combinată a vântului și zăpezii cu urmărirea aglomerărilor de zăpadă, dispersia poluanților gazoși în atmosferă, aerodinamica zonelor construite cu urmărirea confortului pietonal, captarea energiei eoliene etc.

Ingineria vântului cuprinde, în obiectul ei de studiu, întreaga fenomenologie a stratului limită atmosferic, de la fizica acestuia până la problemele de difuzie și dispersie în atmosferă precum și interacțiunea dintre curentul de aer din zona stratului limită atmosferic și corpurile solide cu care vine în contact, pentru studiul acesteia utilizându-se atât metode aferente aerodinamicii cât și metode proprii ingineriei vântului.

Lucrarea își propune, în prima parte, să prezinte o descriere matematică a stratului limită atmosferic, din punct de vedere atât al câmpului de viteze cât și al structurii turbulente aferente acestuia, iar în a doua parte să prezinte un studiu experimental privind stratul limită dezvoltat, în condiții de laborator, în tunelul aerodinamic cu rugozitate variabilă TASL1-M, în vederea calibrării acestuia cu scopul extrapolării rezultatelor cercetării experimentale pentru situația reală a stratului limită ce se dezvoltă în atmosferă.

Această lucrare este destinată, în primul rând, studenților de la Facultatea de Hidrotehnică, specializarea Ingineria Mediului, care au ca disciplină de studiu, la licență, *Ingineria vântului* precum și studenților de la Facultatea de Ingineria Instalațiilor, care au ca discipline de studiu, la master, *Captarea și conversia energiei vântului și valurilor* și *Confort urban*. De asemenea, lucrarea se adresează și doctoranzilor din Universitatea Tehnică de Construcții București (UTCb) care elaborează teze de doctorat în domeniul ingineriei vântului.

Totodată, lucrarea se dorește a fi utilă unei largi categorii de specialiști în fizica atmosferei, meteorologie, oceanografie, ingineria vântului, aerodinamică industrială și urbană etc., cadre didactice sau cercetători, care au preocupări științifice fundamentale sau ingineresti legate de mișcarea aerului din zona stratului limită atmosferic sau de aerodinamica experimentală.

Autorii doresc să aducă mulțumiri colectivului de specialiști din cadrul Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului de pe lângă Catedra de Hidraulică și Protecția Mediului din UTCB, pentru rezultatele diferitelor cercetări în domeniul stratului limită atmosferic incluse în această carte.

*Autorii*

# CUPRINS

<b>A. STRATUL LIMITĂ ATMOSFERIC</b>	
<b>– CARACTERISTICI ȘI POSIBILITĂȚI DE SIMULARE EXPERIMENTALĂ</b>	<b>9</b>
1. DESCRIEREA MATEMATICĂ A STRATULUI LIMITĂ ATMOSFERIC	10
1.1. Ecuațiile stratului limită atmosferic	10
1.2. Închiderea sistemului de ecuații a SLA	13
2. STRUCTURA STRATULUI LIMITĂ ATMOSFERIC	15
3. DISTRIBUȚII DE VITEZĂ LOCALĂ MEDIE TEMPORALĂ	
ÎN STRATUL LIMITĂ ATMOSFERIC	18
3.1. Modelul <i>spirală EKMAN</i>	20
3.2. Legea lui Prandtl (legea logaritmică generală)	21
3.3. Legea lui Davenport (legea puterii)	24
4. LEGI SPECIALIZATE ÎN DESCRIEREA PROFILULUI DE VITEZĂ MEDIE	
ÎN ZONA STRATULUI LIMITĂ ATMOSFERIC DE DEASUPRA MĂRII	27
4.1. Legea logaritmică a lui Schlichting	27
4.1.1. Relații pentru calculul vitezei de frecare $U_*$	28
4.1.2. Calculul rugozității echivalente a suprafeței mării $K_S$	29
4.1.3. Reprezentarea grafică a legii logaritmice a lui Schlichting	30
4.2. Legea logaritmică a lui Suzanne	30
4.2.1. Relații pentru calculul vitezei de frecare $U_*$	31
4.2.2. Calculul rugozității echivalente a suprafeței mării $K'_S$	32
4.2.3. Reprezentarea grafică a legii logaritmice a lui Suzanne	32
5. ELEMENTE DE TURBULENȚA CURGERII ÎN STRATUL LIMITĂ ATMOSFERIC	33
5.1. Proprietățile generale ale turbulenței atmosferice	35
5.2. Caracterul fluctuant al vitezei vântului	36
5.3. Alegerea intervalului de mediere temporală. Spectrul de putere	
al lui Van der Hoven	37
5.4. Distribuția de viteză medie temporală și mărimi caracteristice turbulenței	
din stratul limită atmosferic	38
5.4.1. Variația componentei de rafală	38
5.4.2. Ecartul tip al componentei de rafală	39
5.4.3. Intensitatea adimensională a turbulenței	42
5.4.4. Momentul de corelație al pulsațiilor de viteză	43
5.4.5. Coeficientul de corelație al pulsațiilor de viteză	43
5.4.6. Lungimea de corelație	43

5.4.7. Spectrul de putere al turbulenței .....	44
5.4.8. Distribuția de probabilitate .....	46
5.4.9. Spectrul de corelație transversală .....	46
5.4.10. Coerența .....	46
<b>6. POSIBILITĂȚI DE SIMULARE A STRATULUI LIMITĂ ATMOSFERIC ÎN TUNEL AERODINAMIC .....</b>	<b>48</b>
6.1. Simularea stratului limită atmosferic dinamic în tunel aerodinamic cu strat limită .....	49
6.2. Simularea stratului limită atmosferic în tunele aerodinamice cu venă scurtă (tunele aerodinamice cu strat limită dinamic artificial) .....	50
6.3. Simularea stratului limită atmosferic în tunele aerodinamice cu venă lungă (tunele aerodinamice cu strat limită dinamic natural) .....	56
6.4. Similitudinea caracteristicilor de turbulență pentru mișcările din stratul limită atmosferic .....	65
6.4.1. Turbulența la scară mică pentru un strat limită cu structură termică neutră .....	66
6.4.2. Turbulența la scară mare pentru un strat limită cu structură termică neutră .....	66
 <b>B. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ÎN VENA TUNELULUI AERODINAMIC CU STRAT LIMITĂ ATMOSFERIC SIMULAT TASL1-M .....</b>	<b>67</b>
<b>7. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR DE INGINERIA VÂNTULUI ÎN STRAT LIMITĂ ATMOSFERIC SIMULAT. DOMENII DE CERCETĂRI ÎN TUNEL AERODINAMIC .....</b>	<b>68</b>
<b>8. TUNELUL AERODINAMIC CU RUGOZITATE VARIABILĂ TASL1-M .....</b>	<b>70</b>
8.1. Ventilatorul cu sistem de protecție și acționare cu turație variabilă .....	72
8.2. Sistemul de rugozitate variabilă .....	73
<b>9. SISTEMUL DE MĂSURĂ LDA 3D (LASER DOPPLER ANEMOMETRY) .....</b>	<b>75</b>
9.1. Principiul de măsură “Laser Doppler Anemometry “ .....	76
9.1.1. Sursa de lumină coerentă LASER .....	76
9.1.2. Efectul Doppler .....	78
9.1.3. Modelul franjelor luminoase .....	81
9.1.4. Volumul de măsură .....	81
9.2. Back-scatter versus forward-scatter în tehnica de măsură LDA .....	82
9.2.1. Forward-scatter LDA .....	83
9.2.2. Back-scatter LDA .....	83
9.3. Schimbarea frecvenței pentru un fascicul LASER. Celula Bragg .....	84
9.4. Recepția semnalului. ....	86
9.5. Însămânțarea particulelor trasoare .....	86
9.6. Însămânțarea particulelor trasoare ce urmăresc curgerea .....	87
9.7. Teoria Lorenz-Mie a împrăștierii luminii .....	87

9.8. Tipo-dimensiunile particulelor trasoare .....	88
9.9. Procesarea semnalului .....	89
9.10. Procesarea datelor .....	92
<b>10. TESTE EXPERIMENTALE UNIDIMENSIONALE</b>	
EFECTUATE ÎN VENA EXPERIMENTALĂ A TASL1-M .....	95
10.1. Metodologia de realizare a testelor experimentale din vena experimentală a TASL1-M .....	95
10.1.1. Axele tunelului aerodinamic cu rugozitate variabila TASL1-M .....	97
10.1.2. Secțiunea de măsură .....	97
10.2. Viteze măsurate la intrarea în tunelul aerodinamic cu rugozitate variabilă TASL1-M .....	99
10.3. Prezentarea generală a măsurătorilor de viteză obținute cu metoda non-intrusivă Laser Doppler Anemometry .....	101
10.4. Prelucrarea rezultatelor. Adimensionalizarea distribuțiilor de viteză axială măsurate. ....	104
10.5. Curbe teoretice în stratul limită explorat. ....	107
10.6. Caracteristici turbulente ale vitezelor măsurate .....	113
10.6.1. Densitatea de probabilitate .....	115
10.6.2. Reșantionarea semnalelor luminoase (viteza instantanee) obținute .....	116
10.6.3. Scara lungimii turbulente .....	116
10.6.4. Spectrul de putere .....	117
10.7. Considerații privind testele unidimensionale .....	119
<b>11. TESTE EXPERIMENTALE TRIDIMENSIONALE UTILIZÂND TEHNICA DE MĂSURĂ     LASER DOPPLER ANEMOMETRY, ÎN STRATUL LIMITĂ DEZVOLTAT ÎN TASL1-M .</b>	121
11.1. Metodologia de realizare a testelor experimentale tridimensionale .....	122
11.1.1. Axele tunelului aerodinamic cu rugozitate variabilă TASL1-M .....	122
11.1.2. Secțiunea de măsură .....	122
11.2. Viteze axiale „ $u$ ” adimensionalizate înregistrate în tunelul aerodinamic cu rugozitate variabilă TASL1-M .....	124
11.3. Componenta orizontală „ $v$ ” adimensionalizată înregistrată în tunelul aerodinamic cu rugozitate variabilă TASL1-M .....	127
11.4. Componenta verticală „ $w$ ” adimensionalizată înregistrată în tunelul aerodinamic cu rugozitate variabilă TASL1-M .....	129
11.5. Curbe teoretice în stratul limită explorat. ....	132
<b>12. CONCLUZII PRIVIND TESTELE EXPERIMENTALE     ÎN TUNELUL AERODINAMIC TASL1-M</b> .....	138
<b>BIBLIOGRAFIE</b> .....	142