

Ministerul Educației
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
Facultatea de Hidrotehnică

Student doctorand
Ing. Bogdan-Iulian DOROFTEI

**CONTRIBUȚII NUMERICE PRIVIND INTERACȚIUNEA
VÂNTULUI CU OBSTACOLE PERMEABILE DE PROTECȚIE A
TERENURILOR NISIPOASE**

-TEZĂ DE DOCTORAT-
- REZUMAT -

Conducători științifici
Prof. univ. dr. ing. Mircea DEGERATU
Prof. univ. dr. Georgeta BANDOC

București
2023

CUPRINS

1.	ANALIZA CARACTERISTICILOR DE MEDIU DIN ZONELE CU TERENURI NISIPOASE ...	3
1.1	INTRODUCERE	3
1.2	SITUAȚIA DEGRADĂRII SOLURILOR NISIPOASE ÎN ROMÂNIA	3
1.3	SOLUȚII STUDIATE.....	5
1.4	ELEMENTE DE TEORIE PE CARE SE BAZEAZĂ TEMA ABORDATĂ	5
2.	SIMULAREA NUMERICĂ A MIȘCĂRII AERULUI ÎN PREZENȚA UNOR OBSTACOLE DE TIPUL ECRANELOR DE PROTECȚIE CU DIFERITE GRADE DE PERMEABILITATE	7
2.1	SCĂRILE DE TURBULENȚĂ.....	7
2.2	SIMULĂRILE NUMERICE PENTRU MODELAREA MIȘCĂRII TURBULENTE	7
2.3	VARIANTE DE DIMENSIONARE OPTIMĂ A CELULEI DE CALCUL	8
2.4	REALIZAREA SIMULĂRII NUMERICE ÎN PROGRAMUL DE MODELARE NUMERICĂ COMSOL MULTIPHYSICS.....	15
2.5	SIMULĂRI NUMERICE ALE FENOMENULUI CURGERII AERULUI ÎN VENA EXPERIMENTALĂ A TUNELULUI AERODINAMIC CU DISCONTINUITATE PRIN INTRODUCEREA DE ECRANE DE PROTECȚIE ÎN SISTEM.....	18
3.	TESTE NUMERICE PRIVIND SOLUȚII DE DIMINUARE A EROZIUNII NISIPULUI SUB ACȚIUNEA VÂNTULUI.....	21
3.1	MODELAREA NUMERICĂ A MIȘCĂRII AERULUI DEASUPRA UNUI TEREN NISIPOS PREVĂZUT CU ECRANE DE PROTECȚIE.....	21
3.2	REZULTATELE SIMULĂRILOR NUMERICE	23
3.4.	CONCLUZII PRIVIND TESTELE NUMERICE.....	28
4.	CONTRIBUȚIILE TEZEI LA DOMENIUL INGINERIEI VÂNTULUI.....	31
C.1.	Dimensionarea optimă a celulei de calcul pentru discretizarea domeniului de mișcare.....	33
C.2.	Validarea (calarea) modelului numeric cu cel experimental utilizând simulări numerice RANS și LES	33
C.3.	Realizarea unui model numeric al curgerii aerului peste o serie de ecrane permeabile având la bază modelul validat anterior	34
C.4.	Realizarea unei serii de simulări privind curgerea aerului peste o serie de ecrane permeabile la un vânt de referință cu diferite viteze	34
C.5.	Identificarea cazurilor în care viteza din aval de unul sau mai multe obstacole permeabile scade sub viteza de antrenare a particulelor	35
	BIBLIOGRAFIE SELECTIVA.....	36

1. ANALIZA CARACTERISTICILOR DE MEDIU DIN ZONELE CU TERENURI NISIPOASE

Scopul principal al acestui capitol se referă la studiul interacțiunii particulelor de nisip cu vântul, pentru a stabili o legătură între caracteristicile mediului solid (particulele de nisip) și caracteristicile mediului fluid (aerului) aflat în mișcare, care transportă nisipul prin antrenare, provocând astfel fenomenul de eroziune eoliană.

1.1 INTRODUCERE

Influența omului asupra mediului, fiind foarte puternică în ultimele secole, a condus la apariția unei noi perioade geologice care se numește Antropocen. Perioadă în care omul, prin acțiunile lui, a dus la agravarea unor probleme de mediu printre care și degradarea terenurilor.

Degradarea terenurilor constituie o gravă problemă globală de mediu, având în vedere numeroasele implicații negative de ordin ecologic și socio-economic. La scară globală au fost identificate mai multe regiuni majore afectate de o degradare intensă a terenurilor, respectiv regiunea europeană mediteraneană, Sahel, Mesopotamia și regiunea de loess a Chinei. Principalele probleme de mediu identificate în aceste regiuni sunt legate de degradarea fizică (eroziunea hidrică și eoliană), chimică (salinizarea) și biologică (oxidarea materiei organice de la suprafața solului) a terenurilor, dar și de pierderea / degradarea vegetației (și implicit a capacității de stocare a carbonului), a capacității solului de infiltrare / stocare a apei, a materiei organice, amplificarea prafului în atmosferă s.a.

1.2 SITUAȚIA DEGRADĂRII SOLURILOR NISIPOASE ÎN ROMÂNIA

Una din cauzele degradării solurilor este eroziunea eoliană și acest fenomen ia amploare în zonele lipsite de vegetație înaltă, în special dealungul câmpurilor agricole, unde degradarea solului are un impact devastator asupra culturilor. Solul vegetal fiind îndepărtat treptat treptat, lasă terenul sterp și neproductiv, plantele fiind în imposibilitatea dezvoltării rădăcinilor, astfel generând o scădere în producția de plante cereale și vegetale. Un alt efect cauzat de eroziunea eoliană este ridicarea norilor de praf, acest fenomen, odată dezvoltat în zonele populate, are un impact dăunător asupra sănătății organismului uman datorită inhalării particulelor de praf de către oameni. Aceste particule non-organice, odată inhalate, pot cauza probleme de sănătate plămânilor dar și asupra altor organe precum creierul sau ficatul atunci când particulele mai mici sunt dizolvate în sânge. Norii de praf pot afecta și transportul, particulele aflate în suspensie în vecinătatea unui aeroport, sau a unei autostrăzi, pot îngreuna vizibilitatea și uneori chiar aduce vehiculele în imposibilitatea deplasării datorită deteriorării motoarelor sau a fuselajului acestora. Eroziunea reprezintă un impact socio-economic negativ asupra zonei afectate de acest fenomen, lucru care conduce la diferite studii pentru metode de control ale efectului acesteia.

În România, sudul Olteniei este recunoscut la nivel național pentru stadiul actual accentuat al degradării terenurilor, pe fondul unei sinergii îndelungate a schimbărilor climatice regionale, restrictivității condițiilor hidrologice, pedologice și ecologice, respectiv a presiunilor antropice asupra utilizării / acoperirii terenurilor.

Situația terenurilor nisipoase din România după suprafețele ocupate de acestea [km²]

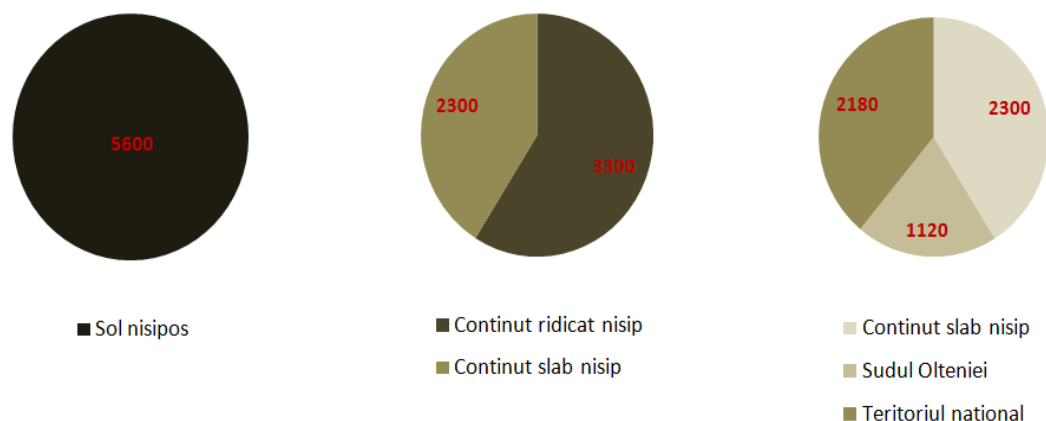


Fig. 1.2.1 - Repartiția solurilor nisipoase pe teritoriul României

Se poate observa că din totalul de 5600 km² de sol nisipos existenți pe teritoriul țării, doar 3300 km² sunt soluri cu conținut foarte ridicat de nisip (cele cu textura nisipoasă și nisipolutoasă), iar din aceștia doar 1120 km² se regăsesc în sudul Olteniei. Astfel se poate considera că 20% din solurile nisipoase de pe teritoriul țării se găsesc în zona sudică, în Oltenia (SRCS; 1980).

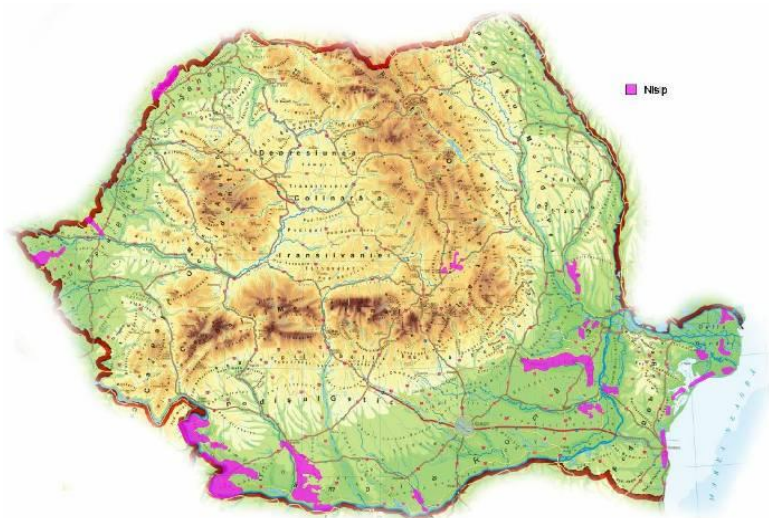


Fig. 1.2.2 - Harta răspândirii solurilor nisipoase în România

Solurile nisipoase și nisipurile apar dispersate în perimetre de dimensiuni diferite în cadrul mai multor unități geomorfologice (Fig. 1.2.2). În ceea ce privește distribuția pe județe, cele mai mari întinderi cu nisipuri și soluri nisipoase cu folosință agricolă apar în județele Dolj, Mehedinți, Tulcea, Brăila, Satu Mare și Galați.

1.3 SOLUȚII STUDIAȚE

Una dintre modalitățile de reducere a fenomenului de eroziune este prin utilizarea ecranelor de protecție amplasate pe direcția de curgere a vântului, în zonele puternic afectate de eroziunea prin vânt a solurilor, pentru reducerea vitezei aerului, care antrenează particulele fine de nisip. Un instrument important în acțiunea de realizare a ecranelor de protecție este utilizarea unei baze de date cartografice și statistice privind regimul vântului. Pentru stabilirea unui model de calcul de la care s-a plecat pentru realizarea acestor bariere a trebuit mai întâi să se studieze curgerea polifazică fluid-solid care antrenează particulele solide, astfel deplasându-le și cauzând efectul de eroziune. Astfel, s-a efectuat o analiză a caracteristicilor de mediu din zonele cu terenuri nisipoase ca bază de pornire pentru prezenta temă de cercetare.

1.4 ELEMENTE DE TEORIE PE CARE SE BAZEAZĂ TEMA ABORDATĂ

Aerul este un mediu de transport al particulelor fine, la viteze mari ale acestuia particulele pot fi din ce în ce mai mari, iar aria de efect ale acestui transport poate să fie din ce în ce mai mare. Astfel ia naștere fenomenul de eroziune al solului prin acțiunea aerului, eroziunea eoliană.

1.4.1 Antrenarea particulelor solide în mișcare

Cât timp viteza curentului de fluid rămâne sub un anumit prag particula solidă se menține în repaus. În momentul în care acea limită este depășită particula intră în mișcare, și este antrenată prin unul din cele trei moduri de transport (Fig. 1.4.8):

- împinsă și târâtă / rostogolită pe fund
- în suspensie
- săltată de pe fund

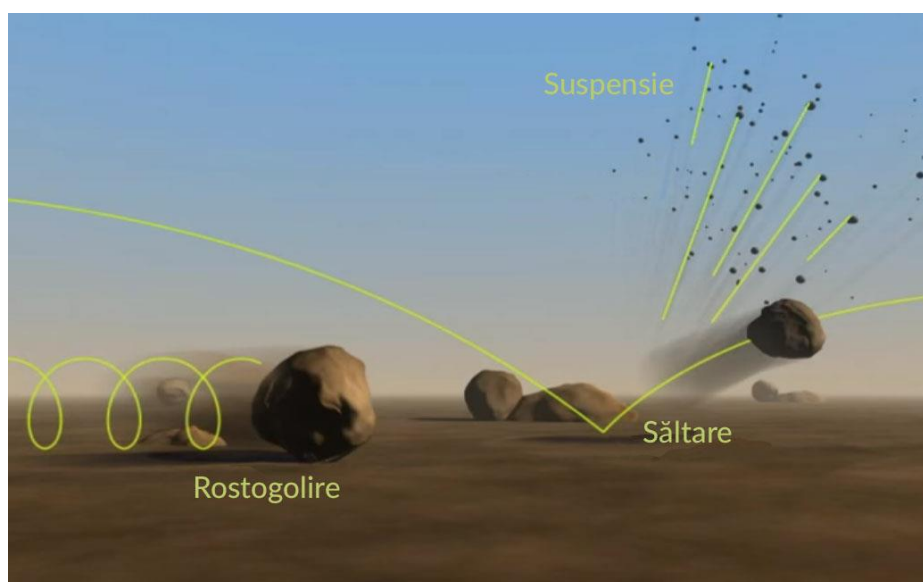


Fig. 1.4.1 - Antrenarea particulelor solide de acțiunea vântului

O dată cu creșterea vitezei fluidului particula începe să se deplaseze în salturi a căror frecvență, amplitudine și lungime cresc cu viteza curentului. Datorită faptului că rezultanta forțelor de presiune dinamică pe care o exercită curentul fluid asupra particulei nu trece prin centrul de greutate al acesteia,

apare un moment care provoacă rotația particulei între punctele de salt. Rotația particulei solide în curentul de fluid produce un efect Magnus care, combinat cu reflexia granulei în punctele de impact, modifică traiectoria acesteia. Când pulsațiile vitezei depășesc anumite valori, particulele sunt deplasate în stare de suspensie.

1.4.2 Acțiunea vântului asupra particulelor de nisip

Petrov M.P. (1986), consideră că nisipul își începe mișcarea când viteza vântului la suprafața nisipului este mai mare de 3,5...4,5 m/s, iar granulele care încep să se miște au diametrul 0,25...0,01 mm. Molinkov citat de Moțoc M. (1963) menționează că la viteze de 0,5...3,5 m/s vântul nu antrenează particulele de sol¹. Rezultatele autorului sunt trecute în Tabelul 4.3. De asemenea în acest tabel se regăsesc și valorile elaborate de Sokolov M.I. (1884).

Tabelul 1.4.1 - Valorile vitezei de antrenare a particulelor de nisip în funcție de diametrul granulelor

Autor	Localizare	Viteza [m/s]	Diametru particulă nisip [mm]
Petrov M.P.	la suprafața nisipului	3,5...4,5	0,01...0,25
Molinkov	-	4...7	0,5<
		7...11	0,50...1,00
		11...27	1...2
		17...28	2...5
Sokolov M.I.	suprafața solului	3,5...6,7	0,10...0,25
		11,4...13	1...2

Canarache (1990), analizând fracțiunile granulometrice recoltate pe înălțimea față de suprafața solului cu ajutorul unui aparat special construit pentru captarea acestora a constatat că în intervalul 10...160 cm nisipul grosier este în proporție de 20...22%, cu nisipul fin 70% și argilă fizică 8...10%. De la înălțimea de 160 cm începe să scadă cantitatea de nisip grosier și crește cantitatea de nisip fin, argila fizică și coloidală rămânând aproape constantă.

Debitul sau ritmul de curgere exprimat în mg/cm²/s este cel mai intens în primii 2.5 cm, atât pentru particule deplasate în salturi cât și pentru particulele purtate în suspensie. Apoi pe măsură ce ne ridicăm deasupra solului până la 60 cm debitele scad; mult mai repede cele purtate în salturi și mai încet cele purtate în suspensie.

Din punct de vedere al tipului de soluri, cele mai puternic expuse eroziunii eoliene sunt "nisipurile" apoi "luturile nisipoase" și la urmă "argilele grele".

Reducerea, până la anihilarea completă a fenomenelor de eroziune a stratului de nisip, depinde de factori locali ca vântul, rugozitatea terenului nisipos, distanța între perdelele forestiere (*L*) etc., factori greu de stăpânit. Din aceste motive, rezultatele determinărilor experimentale, la scară naturală, efectuate de diverși cercetători, diferă de la un loc la altul, de la cercetător la cercetător, de la țară la țară, acestea contribuind la existența de diferențe la dimensionarea elementelor constructive.

¹ Moțoc, M. (1963) *Eroziunea solului pe terenurile agricole și combaterea ei*. Editura Agro-Silvică, București

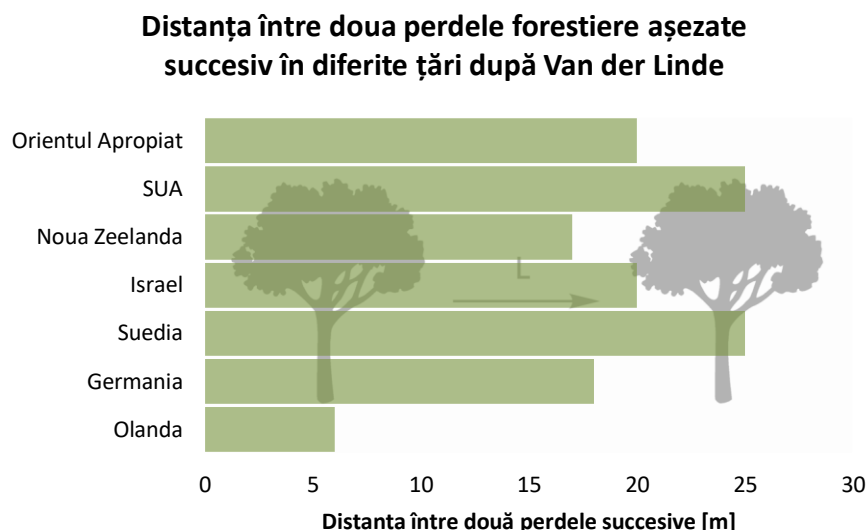


Fig. 1.4.2 - Recomandare așezare perdele forestiere successive

2. SIMULAREA NUMERICĂ A MIȘCĂRII AERULUI ÎN PREZENȚA UNOR OBSTACOLE DE TIPUL ECRANELOR DE PROTECȚIE CU DIFERITE GRADE DE PERMEABILITATE

2.1 SCĂRILE DE TURBULENȚĂ

Energia este transferată (disipată) de la structurile mari (energia conținută de structurile de o anumită scară) către structurile cele mai mici ale turbulenței (Teoria lui Kolmogorov, 1941).

O zonă din curgerea turbulentă de mărime l , care poate fi identificată ca având o prezentare coerentă, poate fi prezentată și introdusă ca o structură turbulentă.

O structură turbulentă de o anumită mărime poate conține alte structuri de mărime mai mică, și poate fi, la rândul ei, conținută într-o structură turbulentă cu o scară mai mare.

Pe lângă scara de lungime l , mai sunt de menționat scările de viteză u_l și de timp τ_l , aflate în relația evidentă:

$$\tau_l = l/u_l \quad (2.1)$$

2.2 SIMULĂRILE NUMERICE PENTRU MODELAREA MIȘCĂRII TURBULENTE

Ecuatiile cu derivate parțiale care guvernează mișcarea fluidelor reale sunt rezolvate numeric și reprezentate prin intermediul tratării numerice a dinamicii fluidelor (simulări CFD). Aceste simulări numerice tratează problema curgerii turbulente.

Progresele legate de dezvoltarea metodelor numerice și crearea algoritmilor de implementare a acestor metode depind în mod direct de dezvoltarea continuă a tehnicii de calcul asistate de calculator (menționând aici atât capacitatea legată de hardware a unui calculator cât și cea legată de software).

În ultimele decenii progresele au fost substanțiale în această ramură, principalul obstacol în CFD rămânând turbulența mișcării fluidelor, și anume specificarea tensiunilor Reynolds, față de tratarea teoretică a problemelor de curgere rezolvate prin ecuațiile Navier-Stokes mediate în timp.

În paragrafele următoare se prezintă metodele cunoscute de "închidere" a ecuațiilor Navier-Stokes, pentru diverse ordine de mediere, menționând faptul că o rezolvare cât mai exactă implică evitarea acestei probleme și căutarea soluțiilor ecuațiilor Navier-Stokes nemediate.

Pentru modelarea numerică a mișcării turbulente se pot folosi trei tipuri de simulări²:

Simularea numerică directă (Direct Numerical Solution - DNS) care permite rezolvarea tuturor fluctuațiilor din curgere cu condiția ca discretizarea modelului să fie foarte fină iar pașii de timp (discretizarea timpului) să fie foarte mici. Aceste două condiții iau amploare din ce în ce mai mult odată cu creșterea numărului Reynold, iar acest lucru poate duce la încetinirea procesului de calcul asistat de calculator, cu care este efectuată modelarea.

Simulările Navier-Stokes mediate Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes - RANS) sunt cele mai uzuale tipuri de modelări folosite în inginerie și de către cercetători. Aceste simulări introduc un set nou de necunoscute, numite tensiunile Reynolds care trebuie modelate adițional pentru închiderea ecuațiilor mișcării.

Simulările cu unități macroscopice³ (Large Eddy Simulations - LES), sunt amplasate între simulările DNS și RANS în termeni de cerințe computaționale de procesare. Aceste tipuri de simulări trebuie realizate pe un model geometric tridimensional în care sunt rezolvate vârtejurile mari (Large Eddy) care apar în curgerea fluidului. Pentru rezolvarea vârtejurilor mici se vor aplica modele de filtre spațiale (Sub Grid Scale - SGS). Astfel simulările LES nu necesită o capacitate de procesare la fel de mare ca cele DNS și implicit discretizarea domeniului nu va fi la fel de fină.

De asemenea, este de menționat și modelul hibrid de simulare a unităților macroscopice desprinse (Detached Eddy Simulation - DES), care este o combinație între LES și RANS, unde zona de contact dintre o suprafață solidă și fluid este rezolvată conform unei simulări RANS iar curgerea fluidului în afara zonei de influență a acestui tip de interacțiune este rezolvată ca o simulare LES.

2.3 VARIANTE DE DIMENSIONARE OPTIMĂ A CELULEI DE CALCUL

Pentru evitarea modelării numerice în DNS și supraaglomerarea procesului computațional de rezolvare a problemei, discretizarea domeniului de mișcare modelat numeric trebuie să fie suficient de rară încât celula de calcul să aibă o dimensiune fizică mai mare decât scara lungimii Kolmogorov, pentru prevenirea modelării vârtejurilor mici. În același timp, celula va trebui astfel dimensionată pentru a putea îngloba vârtejurile mari care vor fi rezolvate prin simularea LES.

Pentru determinarea lungimii Kolmogorov au fost utilizate 2 variante, prezentate în continuare.

² http://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture06-turbulence.pdf

³ McComb W.D. *Turbulenta fluidelor (The Physics of Fluid Turbulence* in Oxford University Press) tradus de Savulescu N. St. 1997, in ed. Tehnica, Bucuresti

2.3.1 Varianta 1 - bazată pe teoria lui Kolmogorov

Teoria lui Kolmogorov (1941) descrie cum energia turbulentă este transferată de la structurile mari către structurile cele mai mici ale turbulenței, energia conținută de structurile de o anumită scară și câtă energie este disipată de structurile cu o anumită scară.

Ipoteza Kolmogorov a izotropiei locale susține că, în curgeri cu numere Reynolds suficient de mari, structurile cu o scară suficient de mică ($l \ll L$) sunt din punct de vedere statistic izotrope, în timp ce structurile turbulente la o scară mai mare rămân anizotrope, L reprezentând lungimea caracteristică a curgerii.

Conform teoriei lui Kolmogorov, parametrii care guvernează structurile turbulente la scară mică sunt cel puțin rata de disipare a energiei unitare ε (m^2/s^3) și vâscozitatea cinematică ν (m^2/s).

Utilizând acești parametri fundamentali, se obține următoarea relație pentru scara lungimii lui Kolmogorov:

$$\eta = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4} \quad (2.19)$$

unde rata de disipare a energiei unitare, egală cu rata de alimentare a energiei unitare are următoarea expresie⁴:

$$\varepsilon = \frac{u_0^3}{L} \quad (2.20)$$

unde:

u_0 - viteza caracteristică, care este de ordinul de mărime al vitezei u_{rms} ;

L - înălțimea secțiunii de intrare în zona experimentală.

Pentru calculul rădăcinii medii pătratică a pulsației vitezei se va folosi următoarea expresie:

$$u_{rms} = UI \quad (2.21)$$

unde:

u_{rms} - abaterea medie patratcă a pulsației vitezei;

I - intensitatea turbulentă inițială;

U - mărimea vitezei inițiale.

Utilizând relațiile (2.19) - (2.21) se poate stabili scara lungimii lui Kolmogorov, corespunzătoare dimensiunilor vârtejurilor foarte mici. Alegerea celulei de calcul se va face pentru o mărime de 6 până la 30 de ori mai mare față de scara lungimii lui Kolmogorov pentru a modela doar vârtejurile mari, specifice simulărilor LES⁵.

⁴ McComb W.D. *Turbulenta fluidelor (The Physics of Fluid Turbulence* in Oxford University Press) tradus de Savulescu N. St. 1997, in ed. Tehnica, Bucuresti

⁵ https://www.researchgate.net/profile/Chitrarth_Lav

2.3.2 Varianta 2 - bazată pe modelul TKE cu scară integrală

În mecanica fluidelor computerizată (CFD) este imposibil să se simuleze numeric turbulența fără să se discretizeze domeniul cu dimensiunile celulei de calcul de mărimea scării lungimii Kolmogorov. Acest lucru va face ca simularea să fie de tipul DNS, lucru care va suprasolicita memoria și capacitatea de calcul a calculatoarelor, astfel se va recurge la folosirea diferitelor tipuri de modele numerice de turbulență. Aceste modele simulează efectul turbulenței, iar unul dintre ele este denumit "Energia cinetică turbulentă" (Turbulent Kinetic Energy - TKE).

Metoda exactă de rezolvare a modelului TKE depinde de modelul de turbulență folosit. De exemplu, modelul $k-\varepsilon$ presupune izotropia turbulenței. Presupunerea aceasta face ca modelarea cantităților de turbulență (k și ε) să fie mai simplistă, dar nu va da randament în situațiile în care turbulența are un caracter anisotropic⁶.

Modelul TKE poate fi cuantificat prin energia cinetică turbulentă:

$$k = \frac{1}{2} [(\overline{u'})^2 + (\overline{v'})^2 + (\overline{w'})^2] \quad (2.22)$$

TKE poate fi produs de tensiunile din fluid, de frecare, a forțelor ascensionale sau datorită forțelor externe la scări de joasă frecvență a turbulenței (scara integrală). Energia cinetică a turbulenței este apoi transferată fluidului din aproape în aproape și este disipată de forțele de vâscozitate când ajung la scara lungimii Kolmogorov. Acest procedeu de producere, transport și disipare are următoarea expresie⁷:

$$\frac{Dk}{Dt} + \nabla \cdot T' = P - \varepsilon \quad (2.23)$$

unde:

$\frac{Dk}{Dt}$ - derivata materială (derivata substanțială) a curgerii TKE;

$\nabla \cdot T'$ - transportul turbulent al TKE

P - producerea TKE

ε - disiparea TKE

Presupunând că densitatea și vâscozitatea sunt constante, forma ecuațiilor TKE este următoarea:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u'_i p'}}{\partial x_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{u'_j u'_j u'_i}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2} - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \nu \frac{\partial \overline{u'_i} \partial \overline{u'_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{g}{\rho} \overline{\rho' u'_i} \delta_{i\varepsilon} \quad (2.24)$$

1
2
3
4
5
6
7
8

⁶ Laurence, D. (2002). "Applications of Reynolds Averaged Navier Stokes Equations to Industrial Flows". In van Beeck, J. P. A. J.; Benocci, C. Introduction to Turbulence Modelling, Held March 18–22, 2002 at Von Karman Institute for Fluid Dynamics. Sint-Genesius-Rode: Von Karman Institute for Fluid Dynamics

⁷ Pope, S. B. (2000). Turbulent Flows. Cambridge: Cambridge University Press

unde:

- 1 - derivata locală;
- 2 - advecție;
- 3 - difuzia presiunii;
- 4 - transportul turbulenței (T);
- 5 - transport molecular vâscos;
- 6 - producție (P);
- 7 - disipare (ϵ);
- 8 - flotabilitatea.

Pentru aflarea disipării energiei TKE se propun următoarele ecuații⁸:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (2.25)$$

unde:

- I - intensitatea turbulentă inițială;
- U - mărimea vitezei inițială.

$$\epsilon = c_\mu^{\frac{3}{2}} k^{\frac{3}{2}} l^{-1} \quad (2.26)$$

unde:

- l - scara lungimilor turbulenței;
- c_μ - coeficient cu valoarea uzuală de 0,09.

$$I = 0,16 Re^{-\frac{1}{8}} \quad (2.27)$$

Scara lungimilor turbulenței poate fi estimată astfel:

$$l = 0,07L \quad (2.28)$$

⁸ Laurence, D. (2002). "Applications of Reynolds Averaged Navier Stokes Equations to Industrial Flows". In van Beeck, J. P. A. J.; Benocci, C. *Introduction to Turbulence Modelling, Held March 18–22, 2002 at Von Karman Institute for Fluid Dynamics*. Sint-Genesius-Rode: Von Karman Institute for Fluid Dynamics. Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge: Cambridge University Press. Flórez Orrego; et al. (2012). "Experimental and CFD study of a single phase cone-shaped helical coiled heat exchanger: an empirical correlation". *Proceedings of ECOS 2012 – The 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, June 26–29, 2012, Perugia, Italy. ISBN 978-88-6655-322-9. Boussinesq, J. V. (1877). "Théorie de l'Écoulement Tourbillant". *Mem. Présentés par Divers Savants Acad. Sci. Inst. Fr.* 23: 46–50. Baldocchi, D. (2005), Lecture 16, Wind and Turbulence, Part 1, Surface Boundary Layer: Theory and Principles, Ecosystem Science Division, Department of Environmental Science, Policy and Management, University of California, Berkeley, CA: USA. https://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence_kinetic_energy

unde:

L - lungime caracteristică.

$$\eta = (v^3/\varepsilon)^{1/4} \quad (2.29)$$

Utilizând relațiile (2.25) - (2.29) se poate stabili scara lungimii lui Kolmogorov, corespunzătoare dimensiunilor vârtejurilor foarte mici. Alegerea celulei de calcul se va face pentru o mărime de 6 până la 30 de ori mai mare față de scara lungimii lui Kolmogorov pentru a modela doar vârtejurile mari, specifice simulărilor LES⁹.

2.3.3 Domeniul de mișcare modelat numeric și determinarea scării lungimii Kolmogorov

În continuare, s-a urmărit realizarea simulărilor numerice în vederea modelării mișcării aerului din vena experimentală a tunelului aerodinamic cu discontinuitate TAD aflat în dotarea Laboratorului de Aerodinamică și Ingineria Vântului din Universitatea Tehnică de Construcții București ale cărui dimensiuni geometrice sunt reprezentate în figura următoare (Fig. 2.3.1):

2.3.4 Geometria domeniului de mișcare modelat și caracteristicile acestuia

Zona de interes, a cărei mișcare a fost modelată numeric este denumită "Zona experimentală", având dimensiunile în mm: 1600 x 200 x 400, 200 mm fiind înălțimea venei experimentale (Fig. 2.3.1).

Zona experimentală este alimentată la partea ei superioară printr-un confuzor profilat având secțiunea de 100 x 400 mm, 100 mm fiind înălțimea secțiunii de ieșire din confuzor (Fig. 2.3.1).

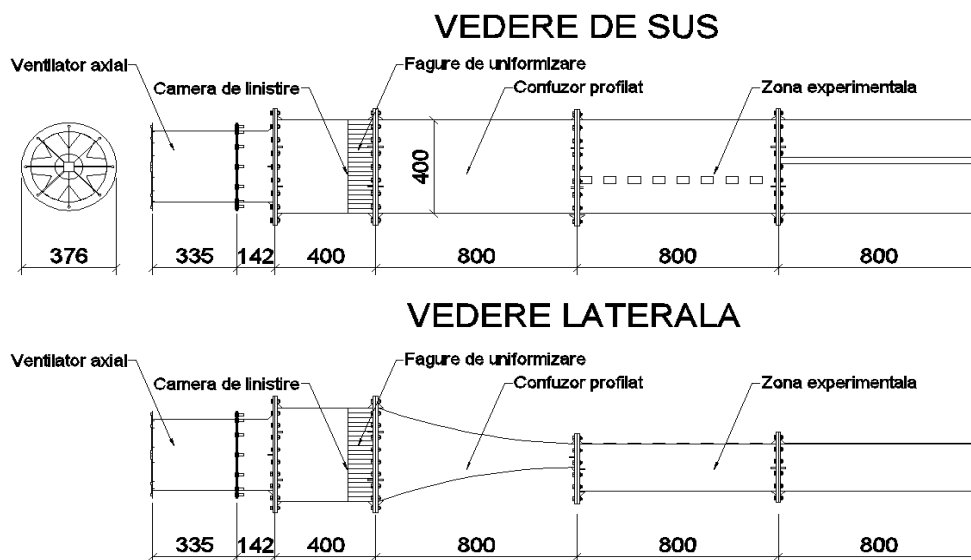


Fig. 2.3.1 - Dimensiunile geometrice ale tunelului aerodinamic cu discontinuitate (TAD)

Viteza aerului la intrarea în zona experimentală (viteza aerului în secțiunea de ieșire a confuzorului) poate fi considerată constantă pe secțiune și egală cu $U = 17$ m/s, vâscozitatea cinematică a aerului este $\nu = 1.5 \cdot 10^{-5}$ m²/s, iar lungimea caracteristică este $L = 0,1$ m, fiind egală cu înălțimea secțiunii de ieșire din confuzor, la rândul ei egală cu înălțimea treptei de expansiune.

⁹ https://www.researchgate.net/profile/Chitrarth_Lav

2.3.5 Calculul scării lungimii a lui Kolmogorov conform variantei 1

Conform măsurărilor din tunelul aerodinamic cu discontinuitate, în secțiunea de intrare în vena experimentală (Fig. 2.3.2) privind distribuțiile de viteză și intensitate turbulentă s-a considerat o distribuție uniformă a vitezei și anume $U = 17$ m/s precum și o distribuție uniformă a intensității turbulente $I = 0,02^{10}$.

Conform testelor experimentale efectuate în tunel, în secțiunea de intrare s-au obținut următoarele valori pentru distribuțiile vitezei medii și intensității turbulente reprezentate în figura de mai jos:

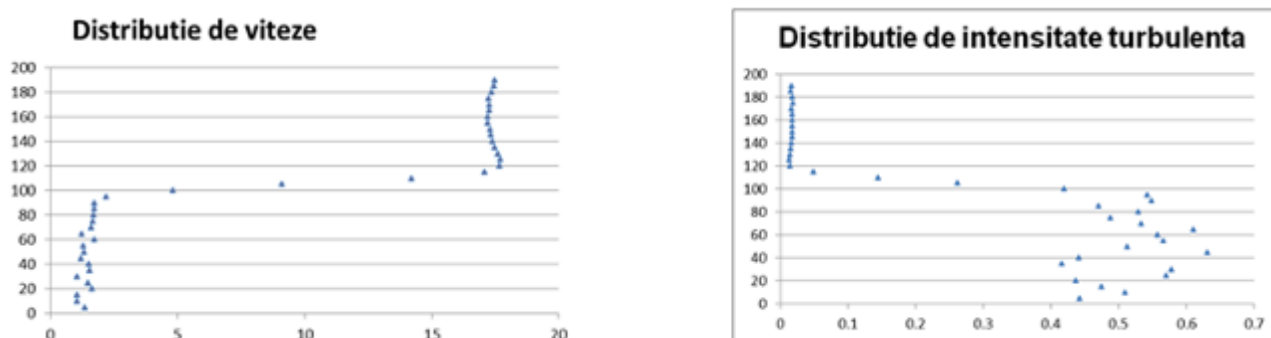


Fig. 2.3.2 - Rezultatele măsurărilor experimentale în secțiunea de la intrarea în zona experimentală a tunelului aerodinamic cu discontinuitate

Conform expresiilor (2.19) - (2.21), valorile mărimilor caracteristice sunt următoarele:

$$u_{rms} = UI = 17 \cdot 0,02 = 0,34 \text{ m/s}$$

$$\varepsilon = \frac{u_{rms}^3}{L} = \frac{0,34^3}{0,1} = 0,4 \text{ m}^2/\text{s}^3$$

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} = ((1,5 \cdot 10^{-5})^3 / 0,4)^{1/4} = 0,00030 \text{ m}$$

2.3.6 Calculul scării lungimii lui Kolmogorov conform variantei 2

Utilizând valoarea vitezei inițiale menționate mai sus, s-au rezolvat ecuațiile (2.25) – (2.28) pentru aflarea valorii disipării TKE, care s-a introdus în ecuația (2.29) pentru calculul scării lungimii lui Kolmogorov.

$$L = 0,1 \text{ m}$$

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{17 \cdot 0,1}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 113333,33$$

$$l = 0,07L = 0,07 \cdot 0,1 = 0,007 \text{ m}$$

¹⁰ Vladuț C. V. *Modelarea numerică și experimentală a mișcărilor atmosferice la scară medie peste insula Bolund*, Teza de doctorat, 2015, București

$$I = 0,16Re^{-\frac{1}{8}} = 0,16 \cdot 113333,33^{-\frac{1}{8}} = 0,038$$

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 = \frac{3}{2}(17 \cdot 0,038)^2 = 0,63 \text{ m}^4/\text{s}^3$$

$$\varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}} l^{-1} = 0,09^{\frac{3}{4}} \cdot 0,63^{\frac{3}{2}} \cdot 0,007^{-1} = 11,82 \text{ m}^2/\text{s}^3$$

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} = ((1,5 \cdot 10^{-5})^3 / 11,82)^{1/4} = 0,00015 \text{ m}$$

Remarcă: diferența dintre valoarea scării lungimii lui Kolmogorov calculată cu varianta 1 și valoarea calculată cu varianta 2, se datorează modului diferit de calcul a ratei de disipare a energiei turbulente unitare ε .

2.3.7 Alegerea dimensiunii celulei în raport cu scara lungimii lui Kolmogorov

Pentru realizarea simulării LES se va alege o celulă cu dimensiunea cuprinsă între limitele valorilor regăsite în practica simulărilor numerice, adică de 6 ori până la de 30 de ori mai mare decât scara lungimii Kolmogorov¹¹.

O altă recomandare este aceea de a se aplica un factor asupra scării lungimii Kolmogorov, cu o valoare de minim 3. Acest lucru previne realizarea unei simulări DNS de tipul aflării proprietăților statistice ale intervalului inerțial, care are ca element definitoriu dimensionarea celulei $\Delta x \leq 3\eta$ ¹².

Pentru realizarea simulării LES se va alege o celulă cu dimensiunea cuprinsă între limitele valorilor de 6 ori până la de 30 de ori mai mare decât scara lungimii Kolmogorov, deoarece acesta transmite o informație din practica simulărilor numerice.

În cazul rezultatelor anterior obținute pentru scara lungimii lui Kolmogorov, acest interval al dimensiunii celulei de calcul este cuprins între 0,3 mm x 6 = 1,80 mm și 0,3 mm x 30 = 9,00 mm pentru varianta 1 și între 0,15 mm x 6 = 0,9 mm și 0,15 mm x 30 = 4,5 mm pentru varianta 2. Aceste intervale, corespunzătoare celor două variante de calcul al scării lungimii Kolmogorov, verifică și recomandarea ca dimensiunea celulei de calcul Δx să fie mai mare de 3η (între 3 x 0,15 mm = 0,45 mm și 3 x 0,3 mm = 0,9 mm).

Reprezentarea grafică a concluziei se poate observa în figura următoare (Fig. 2.3.3):

¹¹ https://www.researchgate.net/profile/Chitrarth_Lav

¹² Kurien S., Taylor M.A., 2005. *Direct Numerical Simulations of Turbulence-Data Generation and Statistical Analysis*, în: Los Alamos Science, vol. 29, pp. 142-151

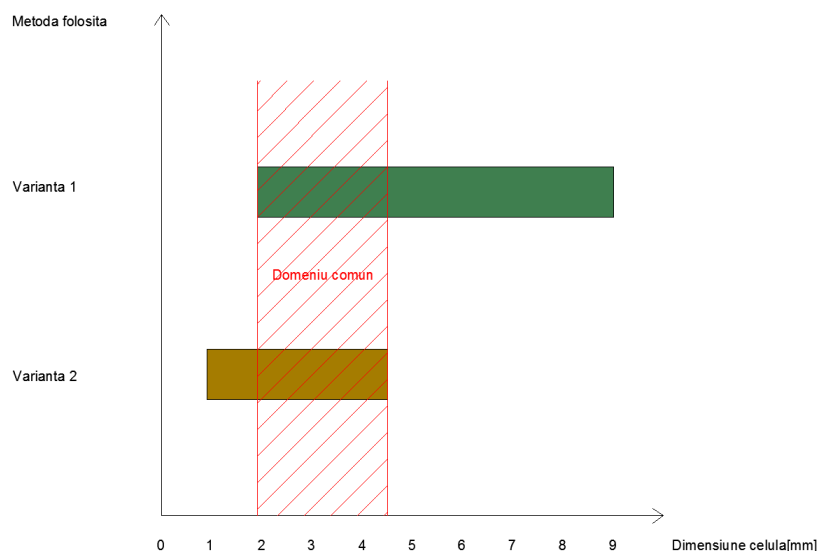


Fig. 2.3.3 - Rezultatele dimensionării celulei conform celor 2 variante

Prin urmare, din suprapunerea domeniilor corespunzătoare variantelor 1 și 2 și din recomandările din practică, rezultă că domeniul comun al dimensiunii celulei de calcul este cuprins între 1,8 mm și 4,5 mm.

2.4 REALIZAREA SIMULĂRII NUMERICE ÎN PROGRAMUL DE MODELARE NUMERICĂ COMSOL MULTIPHYSICS

Similar modelului anterior menționat, prin intermediul programului de modelare numerică COMSOL Multiphysics, s-a realizat o simulare numerică a experimentului fizic din tunelul aerodinamic cu discontinuitate. Rezultatele obținute în urma simulării numerice au fost comparate cu cele rezultate din experimentul fizic pentru calarea modelului, apoi comparate cu rezultatele obținute în simularea prin metoda LES.

Calculul numeric utilizând metoda $k-\varepsilon$ s-a realizat prin simularea bi-dimensională a venei experimentale a tunelului aerodinamic cu discontinuitate, având dimensiunile înălțimii de 200 mm și lungimii de 1600 mm.

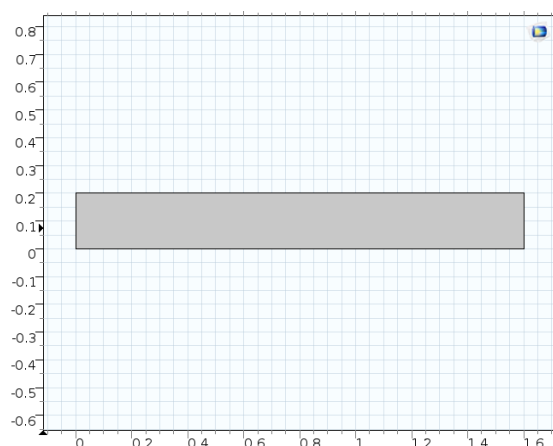
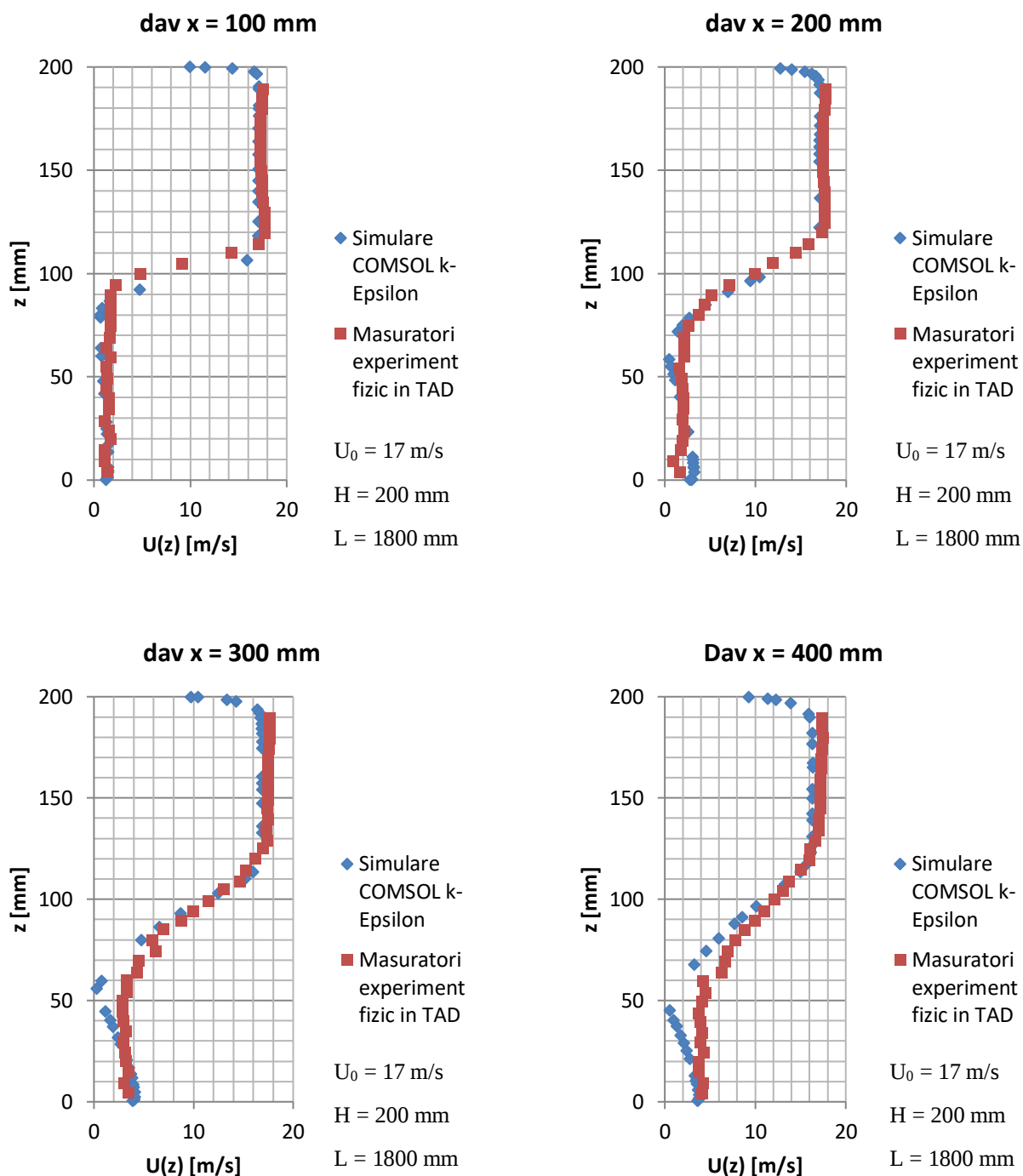
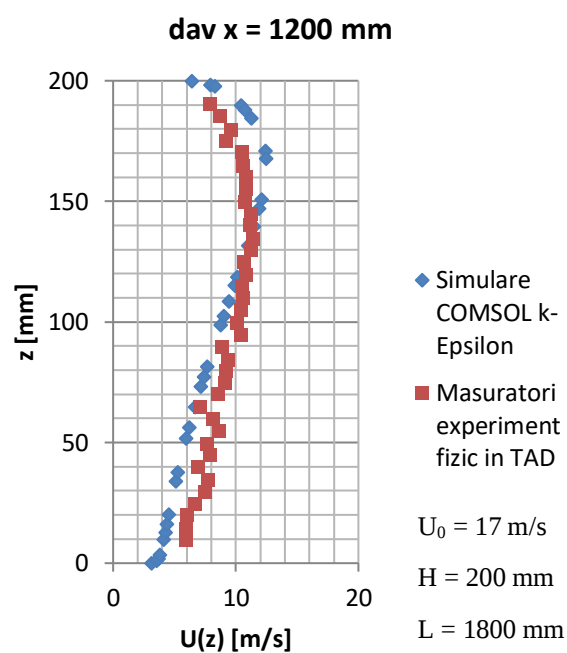
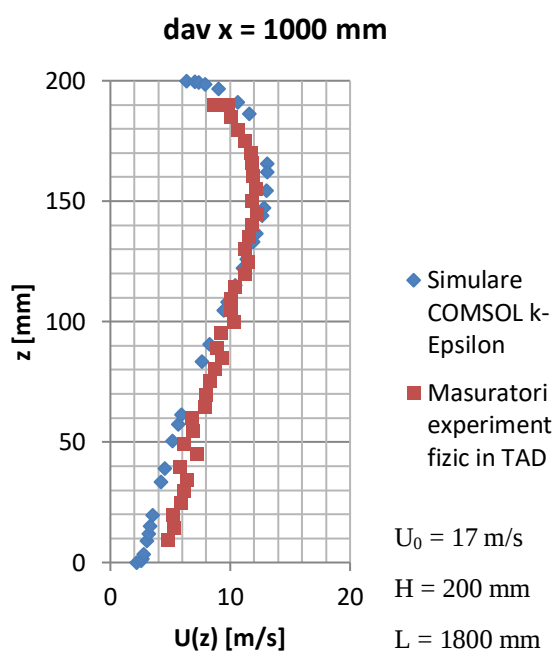
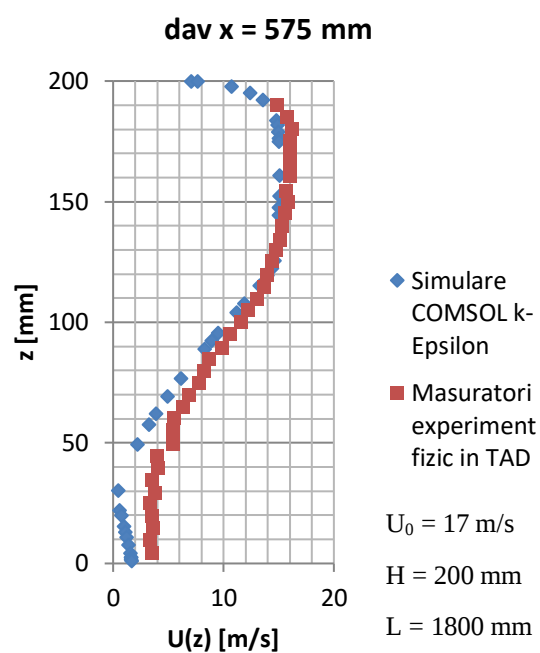
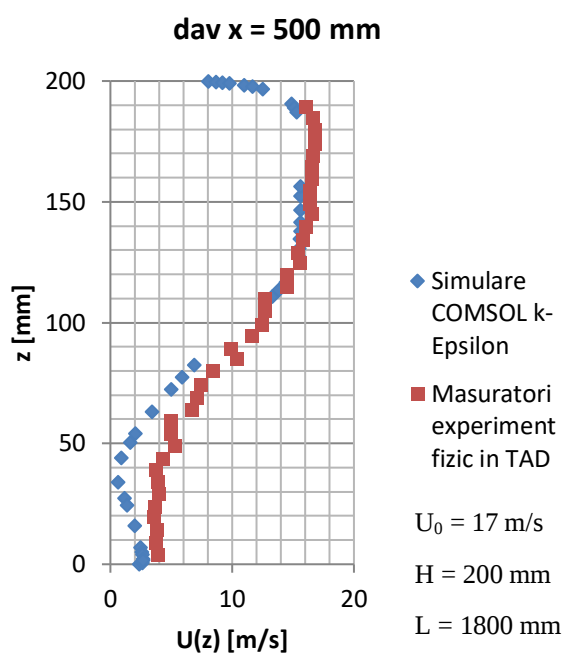


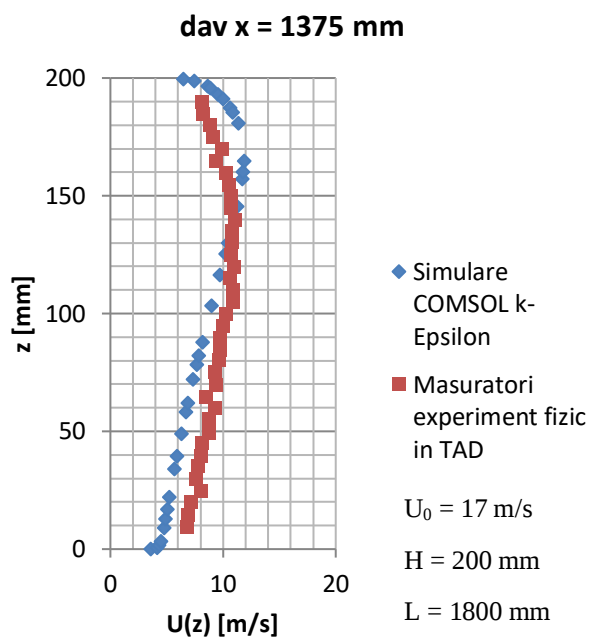
Fig. 2.4.1 – Geometria domeniului de calcul

2.4.1 Simulări și comparații între metodele de determinare a intensității vitezei. Validarea modelelor numerice utilizate

2.4.1.1 Comparație între profilele de viteză medie în secțiunile $x = 100, 200, 300, 400, 500, 575, 1000, 1200, 1375$ mm din vena TAD obținute prin simulare numerică COMSOL k- ϵ și prin teste experimentale







Rezultate:

Comparațiile dintre profilele de viteză prezentate în graficele anterioare au fost obținute prin simulare numerică $k - \varepsilon$ în programul de modelare în element finit COMSOL Multiphysics™ și teste experimentale realizate în tunelul aerodinamic cu discontinuitate (TAD). Măsurătorile au fost efectuate cu sonda Pitot-Prandtl, racordată la un traductor de presiune diferențială piezoelectric.

Pe abscisă se regăsesc valorile pentru viteza reală, iar pe ordonată valorile pentru înălțimea la care s-a înregistrat viteza respectivă.

Se poate observa că profilele se suprapun în proporție foarte mare, lucru care duce la validarea unei foarte bune potriviri, privind rezultatele, dintre experimentul realizat prin modelare numerică și experimentul fizic realizat în tunelul aerodinamic cu discontinuitate.

2.5 SIMULĂRI NUMERICE ALE FENOMENULUI CURGERII AERULUI ÎN VENA EXPERIMENTALĂ A TUNELULUI AERODINAMIC CU DISCONTINUITATE PRIN INTRODUCEREA DE ECRANE DE PROTECȚIE ÎN SISTEM

După realizarea simulării numerice a curgerii în tunelul aerodinamic cu discontinuitate și implicit calarea modelului numeric după cel fizic, s-a propus introducerea în domeniul de calcul a unor ecrane de protecție.

Acestea vor avea rolul de a reduce viteza vântului în imediata apropiere a solului, lucru care presupune reducerea antrenării materiilor în suspensie.

2.5.1 Alegerea caracteristicilor ecranului de protecție tip 1 pentru experimentul numeric

Pentru modelarea ecranului de protecție din interiorul tunelului s-a utilizat un obstacol permeabil. Această condiție de margine va fi atribuită unui segment amplasat în interiorul tunelului simulat.

Ecranul de protecție este de tip ecran cu perforații distribuite "wire gauze" (sită impletită) și poate fi modelat ca o condiție de margine. Acest lucru permite o implementare economică a ecranului, în care detaliile obstacolului nu trebuie rezolvate. Influența generală a ecranului de protecție asupra câmpului de curgere este o pierdere a componentei momentului, o schimbare de direcție a curgerii vântului, o atenuare a energiei cinetice turbulente și o păstrare a scării de lungime turbulente.

Modelul de calcul al programului COMSOL Multiphysics™ necesită introducerea parametrilor :

K - rezistența ecranului;

σ_s - soliditatea (raportul dintre aria blocată și aria totală a ecranului);

$$K = 0,98 \times ((1 - \sigma_s)^{-2} - 1)^{1,09} \quad (2.30)$$

η - coeficientul de refracție;

$$\eta = \sqrt{\frac{K^2}{16} + 1} - \frac{K}{4} \quad (2.31)$$

Pentru alegerea parametrilor optimi ai ecranului de protecție, s-a ținut cont de faptul că d_{av} a venei experimentale nu trebuie blocată pe un procent mai mare de 10% din aceasta.

Astfel, s-a ales o sită, utilizată ca ecran de protecție, cu diametrul sârmei $d = 0,08$ mm și lungimea și lățimea golului $d_{ochi} = 0,13$ mm.

Aria liberă, care reprezintă permeabilitatea ecranului s-a calculat cu următoarea formulă:

$$A_{liberă} = \frac{d_{ochi}^2}{(d_{ochi} + \frac{d}{2})^2} = 0,58 \quad (2.32)$$

Aria venei experimentale a tunelului aerodinamic cu lățimea $l_{tunel} = 400$ mm și înălțimea $h_{tunel} = 200$ mm s-a calculat cu următoarea formulă:

$$A_{venă} = l_{tunel} \times h_{tunel} = 0,08m^2 \quad (2.33)$$

Permeabilitatea secțiunii venei experimentale a tunelului aerodinamic, ținând cont de restricția de trecere de 10% este următoarea:

$$A_{permeabil}^{10\%} = 0,9 \times A_{venă} = 0,072m^2 \quad (2.34)$$

Înălțimea propusă a ecranului, $h_{obstacol}$ a fost calculată utilizând relația:

$$A_{permeabil}^{10\%} = (h_{tunel} - h_{ecran}) \times l_{tunel} + h_{ecran} \times l_{tunel} \times A_{liberă} \quad (2.35)$$

Din ecuație rezultă că $h_{ecran} = 50$ mm, corespunzând unui ecran cu dimensiunile de 400 mm x 50 mm constituit dintr-o sită cu diametrul sârmei $d = 0,08$ mm și lungimea și lățimea golului $d_{ochi} = 0,13$ mm.

După stabilirea înălțimii ecranului s-a calculat aria totală a acestuia:

$$A_{ecran} = l_{ecran} \times h_{ecran} = 0,02m^2 \quad (2.36)$$

Permeabilitatea totală a ecranului s-a calculat cu formula:

$$\sigma_{liber} = A_{liberă} \times A_{obstacol} = 0,012m^2 \quad (2.37)$$

Iar aria blocată a ecranului de protecție s-a calculat scăzând din aria totală a ecranului A_{ecran} permeabilitatea acestuia σ_{liber} .

$$\sigma_{blocat} = A_{ecran} - \sigma_{liber} = 0,008m^2 \quad (2.38)$$

Cunoscând aceste valori s-au calculat parametrii necesari pentru modelarea ecranului în programul de modelare numerică COMSOL Multiphysics™, începând cu soliditatea acestuia:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{blocat}}{A_{ecran}} = 0,42 \quad (2.39)$$

Rezistența ecranului de protecție, calculată conform formulei (2.30) anterior menționate:

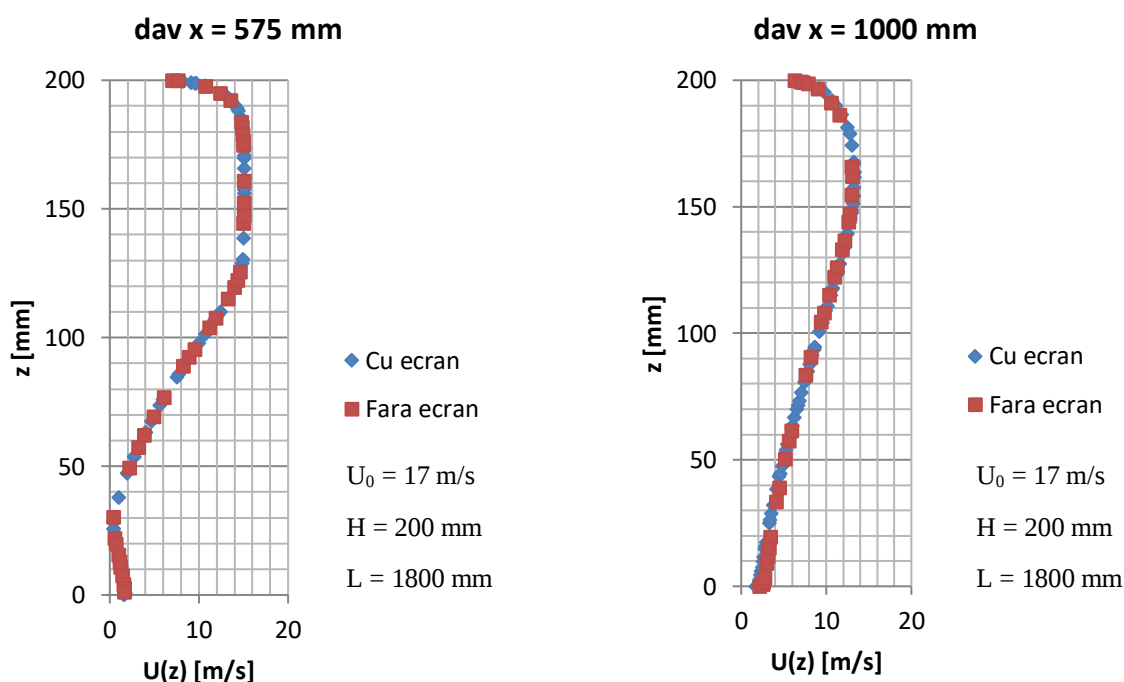
$$K = 0,98 \times ((1 - \sigma_s)^{-2} - 1)^{1,09} = 2,00 \quad (2.40)$$

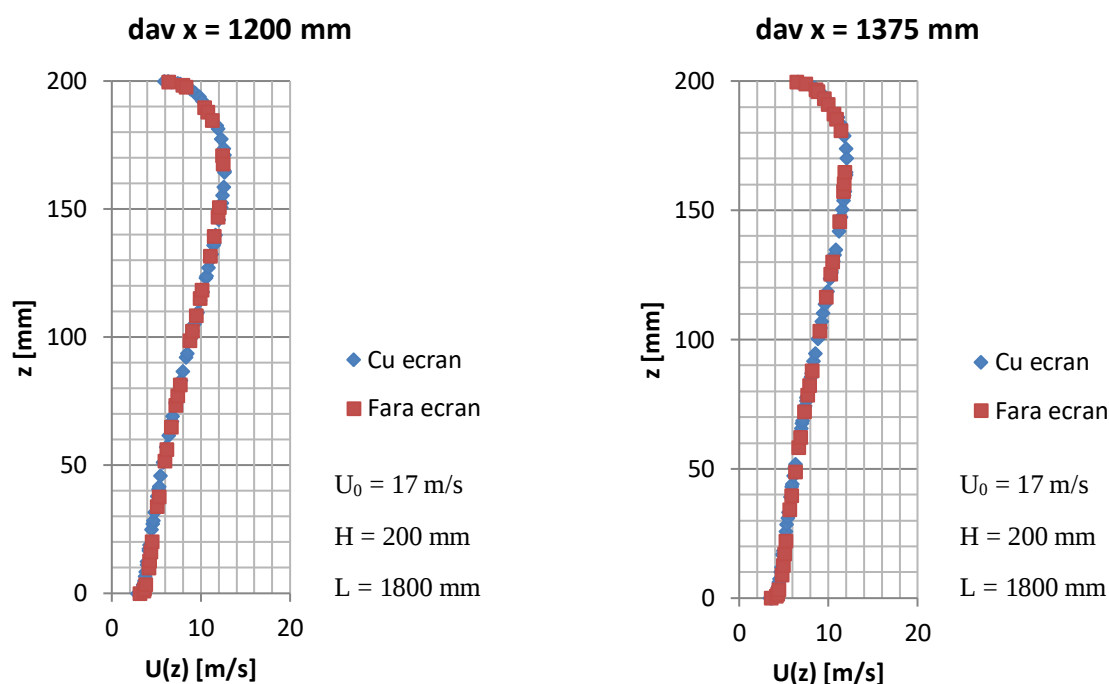
Coeficientul de refracție, calculat conform formulei (2.31) anterior menționate:

$$\eta = \sqrt{\frac{K^2}{16} + 1} - \frac{K}{4} = 0,62 \quad (2.41)$$

În urma realizării simulării numerice, s-au realizat graficele pentru viteză aferentă secțiunilor 575, 1000, 1200 și 1375 mm. Ecranul de protecție propriu-zis a fost introdus la o distanță față de intrarea în vena experimentală de 900 mm.

2.5.1.1 Comparatie între profilele de viteză medie în secțiunile $x = 575, 1000, 1200, 1375$ mm din vena TAD, cu ecran de protecție, obținute prin simulare numerică COMSOL k- ϵ și fără ecran





Rezultate:

Se poate observa faptul că în imediata apropiere a secțiunii în care a fost introdus ecranul de protecție viteza scade, anume în profilele aferente secțiunii $x = 1000 \text{ mm}$.

3. TESTE NUMERICE PRIVIND SOLUȚII DE DIMINUARE A EROZIUNII NISIPULUI SUB ACȚIUNEA VÂNTULUI

3.1 MODELAREA NUMERICĂ A MIȘCĂRII AERULUI DEASUPRA UNUI TEREN NISIPOS PREVĂZUT CU ECRANE DE PROTECȚIE

În cadrul cercetărilor prezentate în capitolul anterior s-au comparat simulările numerice $k - \varepsilon$ în programul de modelare în element finit COMSOL Multiphysics cu rezultatele testelor experimentale efectuate în același tunel aerodinamic cu treaptă de expansiune. Și în acest caz simulările numerice COMSOL au condus la rezultate foarte apropiate, în ceea ce privește profilele de viteză, cu testele experimentale, considerându-se, astfel, modelul numeric ca fiind validat experimental.

Datorită acestui fapt, s-a considerat că tratarea numerică a problemelor studiate și deci testele numerice aferente, pot să fie rezolvate, cu o foarte bună aproximație, prin utilizarea metodei de modelare în element finit COMSOL Multiphysics.

În simulările numerice s-au introdus ca profile de viteză incidentă, rezultatele calculelor anterioare, culegea puterii, pentru vitezele la înălțimea de referință $U(10) = 8 \text{ m/s}$, $U(10) = 12 \text{ m/s}$ și $U(10) = 16 \text{ m/s}$. Aceste 3 profile de viteză ale vântului incident sunt prezentate grafic în figurile următoare.

În figura 3.1.1 se prezintă profilul de viteză a vântului incident din amonte de ecranele de protecție pentru exponentul $\alpha=0,16$ și viteza de referință $U(10) = 8 \text{ m/s}$

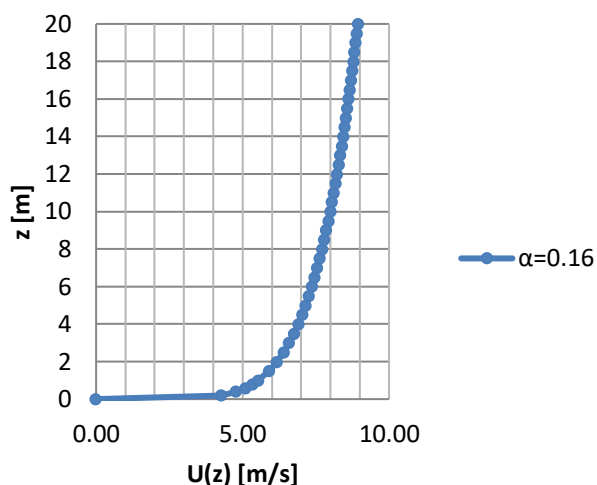


Fig. 3.1.1 - Profilul de viteză a vântului incident din amonte de ecranele de protecție pentru exponentul $\alpha=0,16$ și viteza de referință $U(10)=8\text{m/s}$

În figura 3.1.2 se prezintă profilul de viteză a vântului incident din amonte de ecranele de protecție pentru exponentul $\alpha=0,16$ și viteza de referință $U(10) = 12 \text{ m/s}$

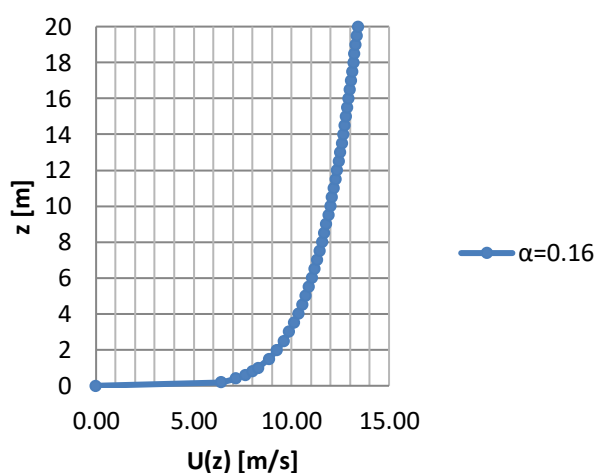


Fig. 3.1.2 - Profilul de viteză a vântului incident din amonte de ecranele de protecție pentru exponentul $\alpha=0,16$ și viteza de referință $U(10)=12\text{m/s}$

În figura 3.1.3 se prezintă profilul de viteză a vântului incident din amonte de ecranele de protecție pentru exponentul $\alpha=0,16$ și viteza de referință $U(10) = 16 \text{ m/s}$.

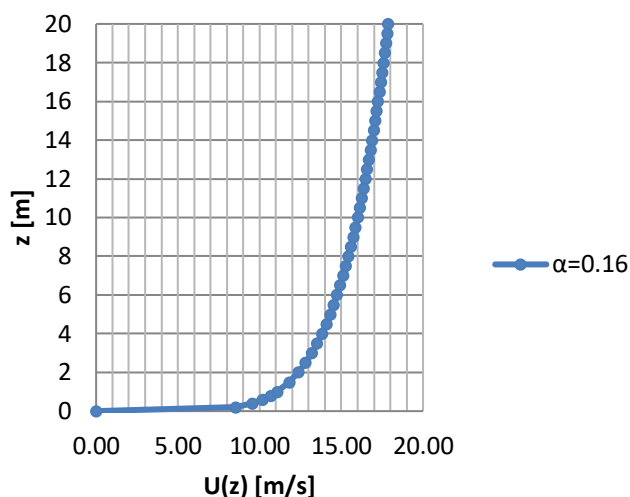


Fig. 3.1.3- Profilul de viteză a vântului incident din amonte de ecranele de protecție pentru exponentul $\alpha=0,16$ și viteza de referință $U(10)=16\text{m/s}$

3.2 REZULTATELE SIMULĂRILOR NUMERICE

În acest capitol, se prezintă o parte din testele numerice efectuate pentru 3 viteze de referință ale vântului incident ($U(10)=8\text{ m/s}$, $U(10)=12\text{ m/s}$, $U(10)=16\text{ m/s}$), pentru 4 tipuri de ansambluri de ecrane de protecție ($n=1, 2, 3, 4$ ecrane) și pentru 4 secțiuni din aval de ecrane ($d_{av}=2H$, $d_{av}=4H$, $d_{av}=6H$, $d_{av}=8H$).

3.2.1 Testarea numerică pentru categoriile de teste CT1 ($U(10)=8\text{m/s}$)

3.2.1.1 Testarea numerică pentru grupul de teste GT1,3 ($n=3$ ecrane) din categoria de teste CT1 ($U(10)=8\text{ m/s}$)

Aceste teste numerice au fost realizate pentru situațiile cuprinse în grupul de teste numerice GT1,3 care se referă la mișcarea aerului peste un teren nisipos prevăzut cu 3 rânduri de ecrane permeabile de protecție ($n=3$), grup care aparține categoriei de teste numerice CT1 referitoare la o viteză de referință din amonte de ecranul de protecție ($U(10)=8\text{ m/s}$).

Domeniul de calcul corespunzător grupului de teste numerice GT1,3 are o lungime de 100 m ($10H$) și o înălțime de 20 m. La distanța $2H=20\text{ m}$ față de secțiunea de intrare în domeniul de calcul se află 3 ecrane de protecție cu permeabilitatea de 40% și cu înălțimea $H=10\text{ m}$.

În figura 3.2.1 se prezintă schema domeniului de calcul din domeniul de mișcare pentru cazul amplasării a $n=3$ ecrane de protecție (CT1, GT1,3, **CB:40-10-4-2H**).

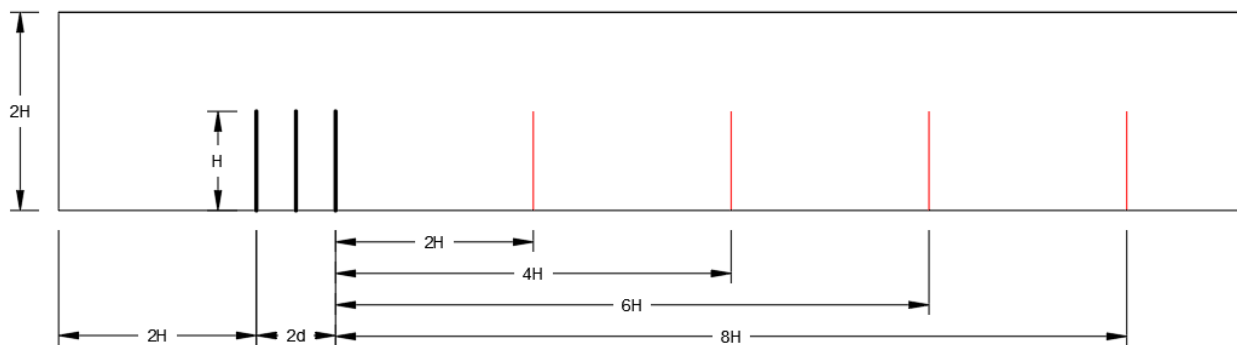


Fig. 3.2.1 – Schema domeniului de mișcare pentru cazul amplasării a $n=3$ ecrane de protecție (CT1, GT1,3, CB:40-10-4-2H)

Domeniul de calcul din domeniul de mișcare astfel stabilit, a fost discretizat, generându-se rețeaua de calcul, cu programul COMSOL Multiphysics la un nivel de discretizare care să asigure obținerea unui câmp de viteze, pe domeniul de mișcare, cu o aproximație convenabilă.

În figura 3.2.2 se prezintă discretizarea domeniului de mișcare în zona ecranelor de protecție, pentru un număr de ecrane de protecție $n=3$ (CT1, GT1,3, CB:40-10-4-2H).

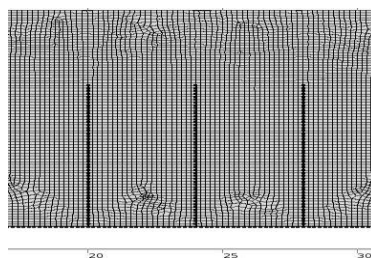


Fig. 3.2.2 - Discretizarea domeniului de mișcare în zona ecranelor de protecție, pentru un număr de ecrane de protecție $n=3$ (CT1, GT1,3, CB:40-10-4-2H)

Aplicând, pe domeniul de mișcare, modelul cu element finit COMSOL Multiphysics, se obține câmpul de viteze din acest domeniu de calcul.

În figura 3.2.3 se prezintă câmpul de viteze în domeniul de mișcare pentru viteza de referință $U(10)=8 \text{ m/s}$ și număr de ecrane de protecție $n=3$ (CT1,GT1,3, CB:40-10-4-2H).

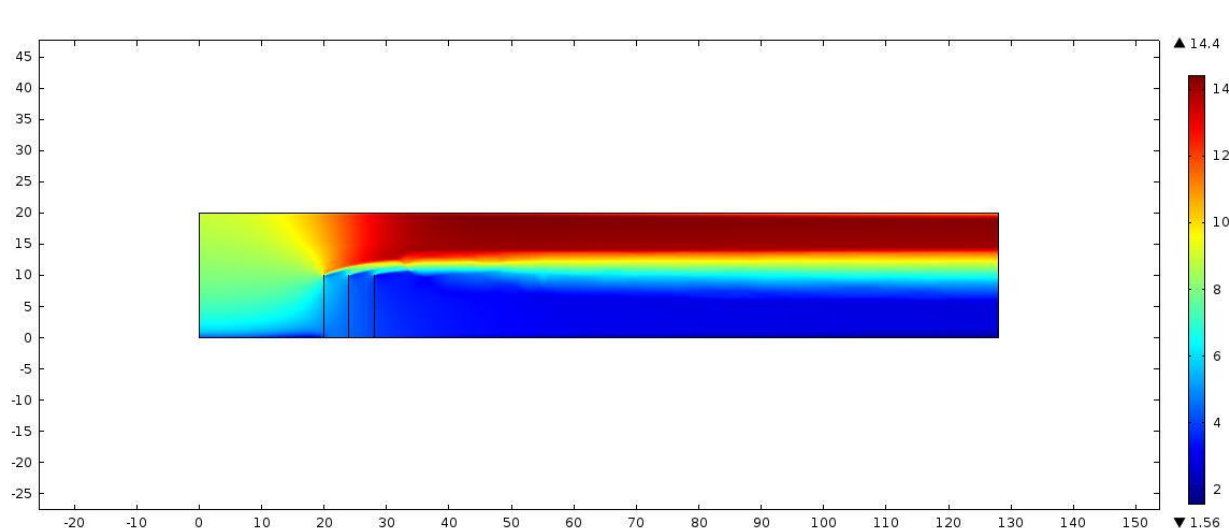


Fig. 3.2.3 - Câmpul de viteze în domeniul de mișcare pentru viteza de referință $U(10)=8$ m/s și număr de ecrane de protecție $n=3$ (CT1,GT1,3, CB:40-10-4-2H)

Din câmpul de viteze aferent grupului de teste GT1,3, din categoria de teste CT1, s-au extras profilele de viteză din 4 secțiuni situate la distanțele din aval față de ecranele de protecție, $d_{av}=2H$, $d_{av}=4H$, $d_{av}=6H$, $d_{av}=8H$. Aceste profile de viteză au fost reprezentate până la înălțimea $z=10$ m, deoarece, pentru prezenta cercetare, interesează doar vitezele la înălțimile $z_1=0,20$ m, $z_2=1,00$ m și $z_3=2,00$ m, înălțimi la care se produce fenomenul de antrenare a nisipului.

Profilele de viteză din cele 4 secțiuni din aval de ecranele de protecție ($d_{av}=2H$, $d_{av}=4H$, $d_{av}=6H$, $d_{av}=8H$), rezultate prin reducerea vitezei vântului incident, au fost comparate cu profilul de viteză de tip legea puterii din amonte de ecranele de protecție și anume la înălțimile $z_1=0,20$ m, $z_2=1,00$ m și $z_3=2,00$ m.

În figurile 3.2.4, 3.2.5, 3.2.6, 3.2.7 se prezintă profilele de viteză $U(z)$ din aval de ecrane, pentru viteza de referință $U(10)=8$ m/s și număr de ecrane de protecție $n=3$, la distanțele $d_{av}= 2H$ (CT1,GT1,3, TN1,3,1,CB:40-10-4-2H, CT:8-3-2H), $d_{av}= 4H$ (CT1,GT1,3, TN1,3,2,CB:40-10-4-2H, CT:8-3-4H), $d_{av}= 6H$ (CT1,GT1,3, TN1,3,3, CB:40-10-4-2H, CT:8-3-6H), $d_{av}= 8H$ (CT1,GT1,3, TN1,3,4,CB:40-10-4-2H, CT:8-3-8H), comparativ cu profilul vitezei vântului incident.

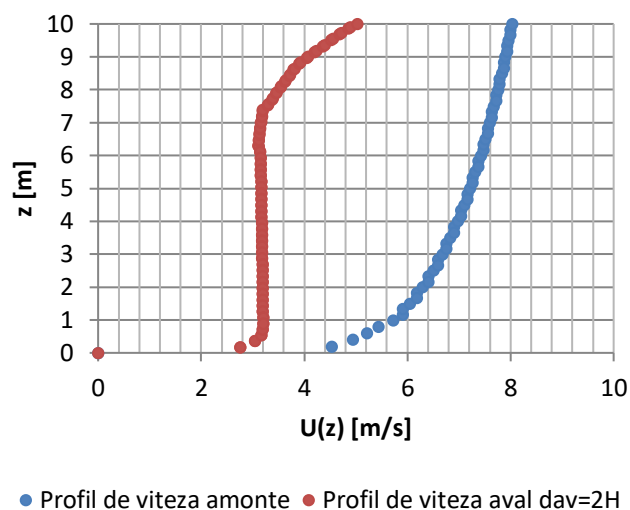


Fig. 3.2.4 - Profilul de viteză $U(z)$ din aval de ecrane, pentru viteza de referință $U(10)=8$ m/s și număr de ecrane de protecție $n=3$, la distanța $d_{av}= 2H$ (CT1,GT1,3, TN1,3,1,CB:40-10-4-2H, CT:8-3-2H). Comparare cu profilul vitezei vântului incident

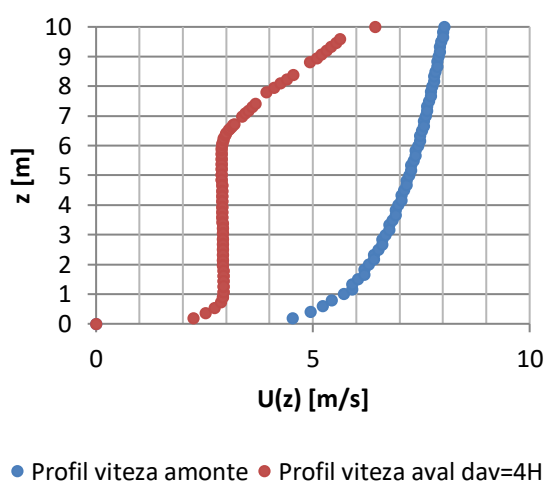


Fig. 3.2.5 - Profilul de viteză $U(z)$ din aval de ecrane, pentru viteza de referință $U(10)=8$ m/s și număr de ecrane de protecție $n=3$, la distanța $d_{av}= 4H$ (CT1,GT1,3, TN1,3,2,CB:40-10-4-2H, CT:8-3-4H). Comparare cu profilul vitezei vântului incident.

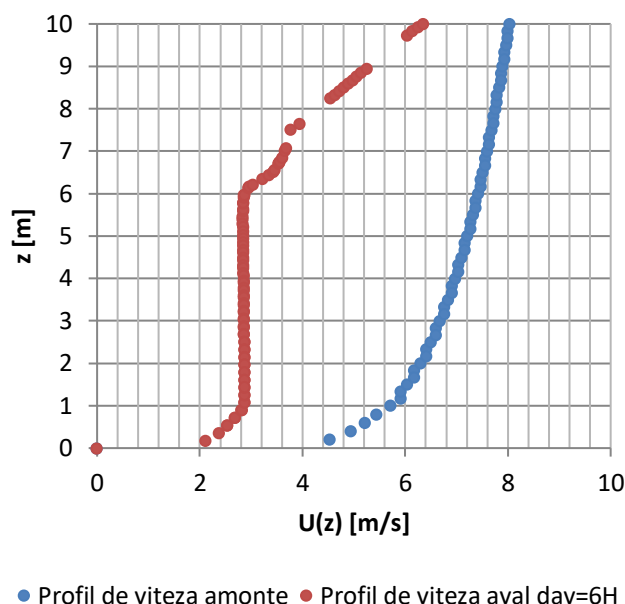


Fig. 3.2.6 - Profilul de viteză $U(z)$ din aval de ecrane, pentru viteza de referință $U(10)=8$ m/s și număr de ecrane de protecție $n=3$, la distanța $d_{av}= 6H$ (CT1,GT1,3, TN1,3,3, CB:40-10-4-2H, CT:8-3-6H). Comparare cu profilul vitezei vântului incident.

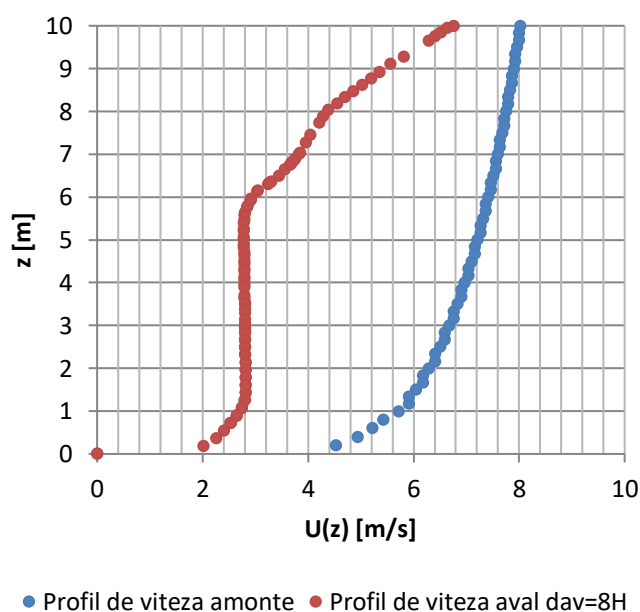


Fig. 3.2.7 - Profilul de viteză $U(z)$ din aval de ecrane, pentru viteza de referință $U(10)=8$ m/s și număr de ecrane de protecție $n=3$, la distanța $d_{av}= 8H$ (CT1,GT1,3, TN1,3,4,CB:40-10-4-2H, CT:8-3-8H). Comparare cu profilul vitezei vântului incident.

În continuare, au fost determinate vitezele vântului la înălțimile $z_1=0,20$ m, $z_2=1,00$ m și $z_3=2,00$ m din profilele de viteză corespunzătoare secțiunilor din aval de ecranele de protecție situate la distanțele $d_{av}=2H$, $d_{av}=4H$, $d_{av}=6H$, $d_{av}=8H$.

În figura 3.2.8 este prezentată variația vitezelor $U(z)$ la înălțimile $z_1=0,20\text{m}$, $z_2=1\text{m}$ și $z_3=2\text{m}$, funcție de distanța aval d_{av} pentru viteza de referință $U(10)=8\text{ m/s}$ și număr de ecrane de protecție $n=3$ (CT1,GT1,3, CB:40-10-4-2H).

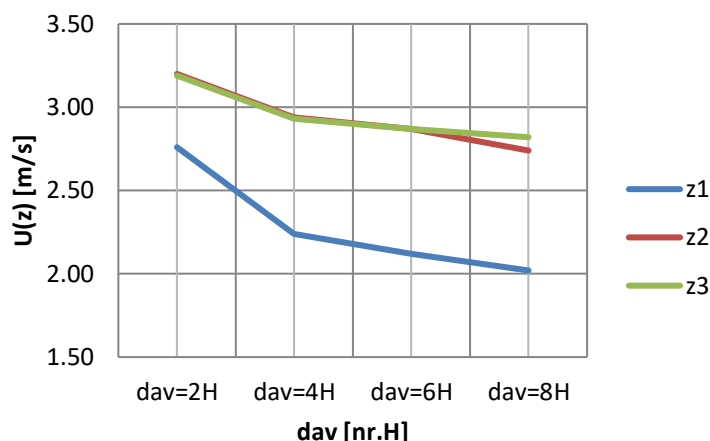


Fig. 3.2.8 - Variația vitezelor $U(z)$ la înălțimile $z_1=0,20\text{m}$, $z_2=1\text{m}$ și $z_3=2\text{m}$, funcție de distanța aval d_{av} pentru viteza de referință $U(10)=8\text{ m/s}$ și număr de ecrane de protecție $n=3$ (CT1,GT1,3, CB:40-10-4-2H)

Apoi, pentru înălțimile $z_1=0,20\text{ m}$, $z_2=1,00\text{ m}$ și $z_3=2,00\text{ m}$, pentru secțiunile din aval de ecranele de protecție situate la distanțele $d_{av}=2H$, $d_{av}=4H$, $d_{av}=6H$, $d_{av}=8H$, s-au făcut diferențele dintre vitezele de pe profilul de viteză amonte situat la $d_{am}=2H$ și vitezele din punctele omoloage de pe profilele de viteză aval, adică $\Delta U=U(z)_{am}-U(z)_{av}$.

În figura 3.2.9 este prezentată variația scăderii de viteză $\Delta U=U(z)_{am}-U(z)_{av}$ la înălțimile $z_1=0,20\text{m}$, $z_2=1\text{m}$ și $z_3=2\text{m}$, funcție de distanța aval d_{av} pentru viteza de referință $U(10)=8\text{ m/s}$ și număr de ecrane de protecție $n=3$ (CT1,GT1,3, CB:40-10-4-2H).

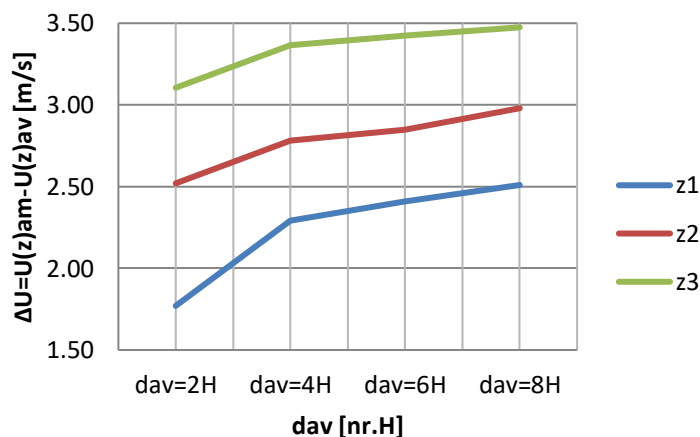


Fig. 3.2.9 - Variația scăderii de viteză $\Delta U=U(z)_{am}-U(z)_{av}$ la înălțimile $z_1=0,20\text{m}$, $z_2=1\text{m}$ și $z_3=2\text{m}$, funcție de distanța aval d_{av} pentru viteza de referință $U(10)=8\text{ m/s}$ și număr de ecrane de protecție $n=3$ (CT1,GT1,3, CB:40-10-4-2H)

3.4. CONCLUZII PRIVIND TESTELE NUMERICE

Având în vedere rezultatele cercetărilor numerice reprezentate grafic în paragrafele capitolului 3, se pot trage o serie de concluzii prezentate în cele ce urmează.

Din graficele prezentate în capitolul 3, se remarcă faptul că, în ceea ce privește viteza la nivelul solului, notată cu $U(z_1)$, aceasta scade odată cu creșterea distanței din aval de ecranele de protecție, notată cu d_{av} .

Considerând viteza minimă de antrenare a nisipului la nivelul solului, $U(z_1)_{\min}$, ca fiind de 4 m/s, funcție de această viteză s-au realizat două tabele și anume tabelul 3.4.1 prezentând efectul vântului la nivelul solului funcție de numărul de ecrane de protecție, de viteza de referință și de distanța aval pentru $U(z_1) < 4$ m/s și tabelul 3.4.2 prezentând efectul vântului la nivelul solului funcție de numărul de ecrane de protecție, de viteza de referință și de distanța aval pentru $U(z_1) > 4$ m/s.

Această viteză minimă de antrenare a nisipului la nivelul solului, $U(z_1)_{\min}$, a fost stabilită pe baza studiului lui Molinkov, prezentat în lucrarea lui Moțoc M. din 1963. În acest studiu se arată că la viteze cuprinse între 0,5 m/s și 4 m/s vântul la nivelul solului nu antrenează granulele de nisip, însă, la viteze cuprinse între 4 m/s și 7 m/s vântul la nivelul solului antrenează granule de nisip cu diametrul sub 0,5 mm, la viteze cuprinse între 7 m/s și 11 m/s antrenează granule de nisip cu diametrul cuprins între 0,5 mm și 1 mm, la viteze cuprinse între 11 m/s și 17 m/s antrenează granule de nisip cu diametrul cuprins între 1 mm și 2 mm, iar la viteze cuprinse între 17 m/s și 28 m/s antrenează granule de nisip cu diametrul cuprins între 2 mm și 5 mm.

Tabelul 3.4.1. - Efectul vântului la nivelul solului funcție de numărul de ecrane de protecție, de viteza de referință și de distanța aval pentru $U(z_1) < 4$ m/s

Număr ecrane de protecție - n	Viteză de referință – $U(10)$ [m/s]	Distanța aval - d_{av} [nr. H]	Efectul vântului la nivelul solului – la z_1
$n = 1$ ecran	$U(10) = 8$ m/s	$d_{av} = 4H - 8H$	Nu antrenează nisip- $U(z_1) < 4$ m/s
$n = 2$ ecrane	$U(10) = 8$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Nu antrenează nisip- $U(z_1) < 4$ m/s
$n = 3$ ecrane	$U(10) = 8$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Nu antrenează nisip- $U(z_1) < 4$ m/s
	$U(10) = 12$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Nu antrenează nisip- $U(z_1) < 4$ m/s
$n = 4$ ecrane	$U(10) = 8$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Nu antrenează nisip- $U(z_1) < 4$ m/s
	$U(10) = 12$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Nu antrenează nisip- $U(z_1) < 4$ m/s

Tabelul 3.4.2 - Efectul vântului la nivelul solului funcție de numărul de ecrane de protecție, de viteza de referință și de distanța aval pentru $U(z_1) > 4$ m/s

Număr ecrane de protecție - n	Viteză de referință – $U(10)$ [m/s]	Distanța d_{av} [nr. H]	Efectul vântului la nivelul solului – la z_1
$n = 1$ ecran	$U(10) = 8$ m/s	$d_{av} = 0H - 4H$	Antrenează nisip sub 0,5 mm- $U(z_1) > 4$ m/s
	$U(10) = 12$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Antrenează nisip sub 0,5 mm- $U(z_1) > 4$ m/s
	$U(10) = 16$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Antrenează nisip sub 0,5 mm- $U(z_1) > 4$ m/s
$n = 2$ ecrane	$U(10) = 12$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Antrenează nisip sub 0,5 mm- $U(z_1) > 4$ m/s
	$U(10) = 16$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Antrenează nisip sub 0,5 mm- $U(z_1) > 4$ m/s
$n = 3$ ecrane	$U(10) = 16$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Antrenează nisip sub 0,5 mm- $U(z_1) > 4$ m/s
$n = 4$ ecrane	$U(10) = 16$ m/s	$d_{av} = 0H - 8H$	Antrenează nisip sub 0,5 mm- $U(z_1) > 4$ m/s

Testele numerice au pus în evidență faptul că protecția la antrenare de nisip, prin ecrane de protecție, la diferite viteze ale vântului incident, are loc în următoarele situații:

- Pentru $U(10) = 8$ m/s :
 - $n = 1$ ecran de protecție, se asigura protecția la distanțele aval $d_{av} = 4H - 8H$,
 - $n = 2$ ecrane de protecție, se asigura protecția la distanțele aval $d_{av} = 0H - 8H$,
 - $n = 3$ ecrane de protecție, se asigura protecția la distanțele aval $d_{av} = 0H - 8H$,
 - $n = 4$ ecrane de protecție, se asigura protecția la distanțele aval $d_{av} = 0H - 8H$.
- Pentru $U(10) = 12$ m/s :
 - $n = 3$ ecrane de protecție, se asigura protecția la distanțele aval $d_{av} = 0H - 8H$,
 - $n = 4$ ecrane de protecție, se asigura protecția la distanțele aval $d_{av} = 0H - 8H$.
- Pentru $U(10) = 16$ m/s : nicio grupare de ecrane de protecție ($n=1, 2, 3, 4$) nu asigură protecția la antrenarea nisipului.

Prin urmare, pentru $n = 1$ ecran de protecție și $n = 2$ ecrane de protecție, la viteze ale vântului $U(10) = 12$ m/s și $U(10) = 16$ m/s, vântul la nivelul solului ($U(z_1) > 4$ m/s) antrenează nisip sub 0,5 mm, iar pentru $n = 3$ ecrane de protecție și $n = 4$ ecrane de protecție, la viteze ale vântului, $U(10) = 16$ m/s, vântul la nivelul solului ($U(z_1) > 4$ m/s) antrenează nisip sub 0,5 mm. Pentru reducerea vitezei la nivelul solului în cazurile de antrenare a nisipului prezentate mai sus, se poate acționa prin creșterea numărului de ecrane permeabile de protecție sau prin scăderea permeabilității ecranelor de protecție, fie ele naturale sau artificiale.

Tot din graficele prezentate în capitolul 3, se remarcă faptul că, în ceea ce privește vitezele la nivelurile $z_2=1$ m și $z_3=2$ m deasupra solului, notate cu $U(z_2)$ și respectiv $U(z_3)$, acestea scad odată cu creșterea distanței din aval de ecranele de protecție, notată cu d_{av} . Aceste două viteze, care sunt aproximativ egale, variază funcție de d_{av} , cu valori cuprinse între 0,1 m/s și 0,8 m/s, așa cum se prezintă în tabelul 3.4.3.

Tabelul 3.4.3. - Variația vitezelor $U(z_2) = U(z_3)$ pentru $d_{av}=2H$ și $d_{av}=8H$

Categorii de teste	CT1				CT2				CT3			
Grupuri de teste	GT 1,1	GT 1,2	GT 1,3	GT 1,4	GT 2,1	GT 2,2	GT 2,3	GT 2,4	GT 3,1	GT 3,2	GT 3,3	GT 3,4
$[U(z_2)=U(z_3)]$ la $d_{av}=2H$ - $[U(z_2)=U(z_3)]$ la $d_{av}=8H$	0,10 m/s	0,15 m/s	0,20 m/s	0,40 m/s	0,25 m/s	0,30 m/s	0,60 m/s	0,60 m/s	0,30 m/s	0,40 m/s	0,80 m/s	0,60 m/s

Cercetările numerice efectuate în prezenta lucrare de doctorat, având ca scop urmărirea protecției la fenomenul de antrenare a nisipului din zonele cu terenuri nisipoase, sub acțiunea vântului natural, prin utilizarea de ecrane de protecție naturale sau artificiale echivalente, au pus în evidență faptul că, pentru o bună parte dintre vitezele vântului și pentru cea mai mare parte dintre ansamblurile de ecrane de protecție alese pentru studiu, s-a obținut o puternică scădere a vitezei vântului în aval de ecrane, până la nivelul la care curentul de aer nu mai antrenează nisip.

Prin urmare, având la bază rezultatele obținute în cadrul prezentei teze, se poate realiza o foarte bună protecție a terenurilor nisipoase la fenomenul de antrenare a nisipului de către vânt prin amplasarea, pe direcția vântului dominant, de ecrane de protecție naturale (perdele forestiere de protecție) sau de ecrane de protecție artificiale cu coeficienți de permeabilitate echivalenți. Numărul de ecrane de protecție și dimensiunile acestora se vor stabili având la bază rezultatele testelor numerice efectuate în această lucrare de doctorat.

4. CONTRIBUȚIILE TEZEI LA DOMENIUL INGINERIEI VÂNTULUI

Scopul acestei teze este, în principal, de a studia posibilitatea reducerii semnificative a eroziunii solurilor nisipoase prin utilizarea obstacolelor de protecție permeabile pentru reducerea vitezei vântului incident, studii realizate prin metode numerice efectuând o serie de simulări numerice a fenomenelor specifice atât la scară redusă cât și la scară naturală, utilizându-se diferite obstacole permeabile (obstacole naturale constând în perdele forestiere sau obstacole artificiale constând în ecrane de tip plase echivalente).

Prezenta teză de doctorat este organizată pe patru capitole care prezintă modul prin care se realizează antrenarea și transportul particulelor de nisip sub acțiunea vitezei vântului și, mai ales, simulările numerice privind modalități de reducere a acestui fenomen.

Capitolul 1 intitulat *Analiza caracteristicilor de mediu din zonele cu terenuri nisipoase*, abordează problema economică și socio-economică a degradării solurilor, la nivel internațional, prezentând anumite zone afectate de eroziunea eoliană, din punct de vedere istoric și geografic, dar și zone din România care au suferit și/sau suferă de acest fenomen.

De asemenea, în cadrul acestui prim capitol se prezintă matematic cele trei modalități de antrenare a particulelor și anume rostogolirea, săltarea sau suspensia, și un studiu prin care se prezintă valorile vitezei de antrenare a particulelor de nisip în funcție de diametrul granulelor pe care le antrenează, ceea ce a stat la baza rezultatelor căutate în simulările din capitolele următoare prin căutarea obstacolelor pentru care reducerea vitezei în aval de acestea, în zona terenului, va fi până la o viteză sub viteza limită superioară admisă de 4 m/s.

În urma stabilirii soluției de reducere a vitezei vântului în apropierea solului până la sub 4 m/s, prin utilizarea obstacolelor permeabile, s-a realizat următorul pas și anume prezentarea unui model de calcul simplificat în care se relatează, pe scurt, modalitatea de simulare numerică utilizată în următoarele capitole, rezultatul căutat fiind acela de reducere a vitezei sub limita impusă menționată anterior, în aval de grupul de obstacole permeabile.

Capitolul 2 denumit *Simularea numerică a mișcării aerului în prezența unor obstacole cu diferite grade de permeabilitate*, prezintă o serie de simulări numerice ale mișcării aerului în prezența unor obstacole cu diferite grade de permeabilitate și începe cu o introducere asupra scărilor de turbulență și a modului de calcul a acestora, concentrându-se pe scara lungimii lui Kolmogorov.

În urma dimensionării celei de calcul s-au realizat două simulări numerice ale unor teste experimentale efectuate în Tunelul Aerodinamic cu Discontinuitate pentru care au existat date legate de profilul vitezelor în nouă secțiuni distincte din suflerie. O simulare a fost realizată cu ajutorul programului de modelare în element finit ANSYS Fluent, iar altă simulare a fost realizată în programul COMSOL Multiphysics.

După calibrarea modelului numeric, s-au introdus, în aval de intrarea în domeniul de calcul, o serie de obstacole permeabile pentru a reduce viteza din aval de acestea până la o viteză admisibilă de sub 4 m/s în zona cea mai apropiată de sol.

Rezultatele au arătat că, prin așezarea succesivă și cu înălțimi variabile, crescătoare de la mic la mare și de la mare la mic, a obstacolelor permeabile, viteza în aval de acestea s-a redus sub valoarea limită admisă de 4 m/s.

Atât rezultatele obținute și prezentate cât și calibrarea modelului numeric au stat la baza întocmirii **capitolului 3** denumit *Teste numerice privind soluții de diminuare a eroziunii nisipului sub acțiunea vântului*, în care s-au realizat o serie de simulări numerice în programul de modelare în element finit COMSOL Multiphysics, la scară naturală, pentru un domeniu de calcul de 20 m înălțime și 120 de m lungime, pentru diferite categorii de viteze ale vântului de referință ($U(10) = 8$ m/s, 12 m/s, 16 m/s) și pentru diferite grupe de protecție caracterizate prin numărul de ecrane de protecție ($n=1, 2, 3, 4$ ecrane).

Deoarece au fost realizate un număr de 48 de simulări numerice pentru 3 viteze de referință ale vântului, pentru 4 tipuri de ansambluri de ecrane de protecție și pentru 4 secțiuni din aval de grupul de ecrane, s-a realizat o codificare a acestora pentru ușurința identificării testelor respective.

La finalul simulărilor s-au desprins concluziile cercetării în **sub-capitolul 3.4** numit *Concluzii privind testele numerice*, în care sunt extrase și apoi prezentate sub formă tabelară situațiile în care, prin utilizarea obstacolelor permeabile, viteza din aval de acestea scade sub viteza limită superioară de 4 m/s, iar în cadrul **capitolului 4** purtând numele *Contribuțiile tezei la domeniul ingineriei vântului*, s-au identificat contribuțiile prezentei teze de doctorat în domeniul ingineriei vântului cu urmărirea

fenomenului de stopare al eroziunii solurilor nisipoase prin utilizarea obstacolelor permeabile artificiale echivalente, prin gradul de permeabilitate, perdelelor naturale forestiere.

Teza de doctorat *Contribuții numerice privind interacțiunea vântului cu obstacole permeabile de protecție a terenurilor nisipoase* conține o serie de contribuții, acestea fiind puse în evidență și dezvoltate pe tot parcursul stagiului doctoral. Cele mai importante contribuții, numerotate cu **C1**, **C2**, **C3**, **C4** și **C5** se referă la:

C.1. Dimensionarea optimă a celulei de calcul pentru discretizarea domeniului de mișcare

Aceasta a presupus o serie de etape, fiecare având caracter de contribuție:

C.1.1. Utilizarea a două metode de calcul pentru dimensionarea celulei de calcul

Pentru a evita supraaglomerarea procesului computațional de rezolvare a simulării în primă fază s-au utilizat două metode de calcul pentru dimensionarea celulei de calcul pentru discretizare. Prima metodă se bazează pe teoria lui Kolmogorov iar a doua metodă pe utilizarea modelului de turbulență Turbulent Kinetic Energy – TKE.

C.1.2. Realizarea unui interval maxim și minim la alegerea mărimii celulei de calcul

În faza a doua, dimensiunea celulei de calcul, rezultată în urma calculelor folosind cele două metode, a fost marită de 6 până la 30 de ori pentru ambele rezultate. Aceasta, pentru a realiza un interval maxim și minim al celulei, în vederea alegerii mărimii optime a celulei de calcul, pentru prevenirea efectuării unei simulări DNS.

C.1.3. Alegerea dimensiunii optime a celulei de calcul

După obținerea rezultatelor, s-a ales dimensiunea celulei ținând cont ca valoarea acesteia să se regăsească pe ambele intervale maxime și minime indiferent de metoda de calcul folosită, și ca dimensiunea celulei de calcul să aibă o valoare care se validează prin ambele metode de calcul.

Acest lucru poate fi considerat ca o strategie eficientă pentru stabilirea dimensiunilor minime și maxime ale elementelor finite pentru discretizarea domeniului de calcul astfel încât să ușureze procesul de rezolvare al diferitelor simulări numerice realizate cu ajutorul unor programe specializate.

C.2. Validarea (calarea) modelului numeric cu cel experimental utilizând simulări numerice RANS și LES

Aceasta a presupus o serie de etape, fiecare având caracter de contribuție:

C.2.1. Realizarea unui model numeric al TAD

După dimensionarea celulei de calcul a fost realizat un model numeric, la scară naturală, al tunelului aerodinamic cu discontinuitate (TAD) și al unui experiment fizic realizat în acesta, pentru care s-a dispus de date despre profilele de viteză rezultate în anumite secțiuni din tunel. Simulările numerice au fost realizate cu două programe distincte, de calcul în element finit COMSOL Multiphysics și de calcul în volum finit ANSYS Fluent.

C.2.2. Simularea cu COMSOL-k-ε și cu ANSYS-LES

Datorită metodelor diferite de calcul computațional al celor două programe, simularea cu ajutorul COMSOL Multiphysics a fost realizată utilizând metoda k-ε, iar simularea cu ajutorul ANSYS Fluent a fost realizată utilizând metoda LES.

C.2.3. Calarea testelor numerice pe baza testelor experimentale

În ambele simulări s-au obținut rezultate asemănătoare cu cele obținute în urma experimentului fizic, astfel încât, prin simularea corectă a fenomenului curgerii aerului în vena experimentală, s-a reușit validarea rezultatelor obținute.

Acest lucru s-a materializat prin realizarea graficelor de comparație a profilelor de viteză pentru experimentul fizic și pentru cele două simulări numerice în aceleași secțiuni ale tunelului, menționate anterior.

C.3. Realizarea unui model numeric al curgerii aerului peste o serie de ecrane permeabile având la bază modelul validat anterior

Aceasta a presupus o serie de etape, fiecare având caracter de contribuție:

C.3.1. Realizarea unui model numeric COMSOL pe un model la scară naturală privind curgerea aerului peste un teren nisipos

După calarea modelului numeric cu cel experimental, s-a realizat o nouă serie de simulări în programul COMSOL Multiphysics, de data aceasta pe un model la scară naturală, care simulează curgerea aerului peste un teren nisipos, sensibil la eroziune.

Modelul este alcătuit dintr-un domeniu de calcul cu înălțimea de 20 m și lungimea de 120 m la care s-au adăugat câte 4 m, distanța dintre două ecrane permeabile succesive, ecranele având o înălțime de 10 m.

C.3.2. Simularea unui teren sensibil la eroziune

Condiția considerată pentru ca terenul studiat în simulare să se comporte ca un teren sensibil la eroziune este ca antrenarea particulelor nisipului aflate în banda substratului limită laminar se va realiza pentru o viteză din imediata apropiere a solului de peste 4 m/s.

Această valoare a vitezei minime de antrenare a nisipului la nivelul solului a fost stabilită pe baza studiului lui Molinkov, prezentat în lucrarea lui Moțoc M. din 1963.

C.4. Realizarea unei serii de simulări privind curgerea aerului peste o serie de ecrane permeabile la un vânt de referință cu diferite viteze

Aceasta a presupus o serie de etape, fiecare având caracter de contribuție:

C.4.1. Stabilirea profilelor de viteză medie ale vântului de referință

Plecând de la premiza cunoașterii valorii vitezei vântului de referință $U(10) = 8 \text{ m/s}$, 12 m/s și 16 m/s , s-au realizat trei grafice pentru variația câmpului vitezelor aferente acestuia, care s-au utilizat pentru introducerea vântului incident în secțiunea de calcul.

C.4.2. Efectuarea de teste numerice pentru unul, două, trei sau patru ecrane permeabile și pentru un vânt de referință cu diferite viteze

Astfel, au fost realizate 3 categorii de teste, fiecare având în componență unul, două, trei, sau patru ecrane permeabile.

S-au realizat câte patru simulări pentru fiecare caz al vântului de referință, funcție de numărul de ecrane permeabile amplasate în aval de secțiunea de intrare a domeniului de calcul, urmărindu-se repartițiile verticale ale vitezei în 4 secțiuni situate în aval de grupul de ecrane permeabile de protecție. În urma simulărilor s-au realizat grafice pentru valorile câmpului de viteze cu scopul de a observa în ce situații viteza din banda substratului limită laminar scade sau depășește valoarea de referință de 4 m/s.

C.5. Identificarea cazurilor în care viteza din aval de unul sau mai multe obstacole permeabile scade sub viteza de antrenare a particulelor

După realizarea graficelor cu valorile câmpurilor de viteză din aval de ecranele permeabile, au fost identificate și selectate situațiile pentru care amplasarea unuia sau a mai multor ecrane scade viteza aerului din aval de acestea sub viteza limită superioară de 4 m/s.

Acest lucru ajută la înțelegerea mai bună asupra fenomenului de eroziune a solurilor nisipoase situate în aval de unul sau mai multe ecrane permeabile și implicit în stabilirea unor soluții de alegere și amplasare a acestor ecrane în calea vântului care afectează zone sensibile la antrenarea particulelor de nisip din zonele studiate.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

- [1]. Lupe I., Influența perdelelor forestiere asupra umezelii solului. (Analele ICAS, 12 (1): 217–234, 1951.).
- [2]. Traci C., Împadurirea terenurilor degradate. (Ed. Ceres, București, Romania, 1985).
- [3]. Neșu I., Perdele forestiere de protecție a câmpului (Editura Star Tipp. Slobozia, Romania 1999).
- [4]. Nuță S., Caracteristici structurale și funcționale ale perdelelor forestiere de protecție a câmpului agricol din sudul Olteniei. (Analele ICAS, 48:161–169, 2005).
- [5]. Costăchescu C., Dănescu F., Mihăila E., Perdele forestiere de protecție. (Editura Silvică, București, Romania, 2010).
- [6]. Wilcox, D. C., Turbulence Modeling for CFD, Third edition, DCW Industries, (United States of America by Birmingham Press, Inc., San Diego, California, 2006).
- [7]. Vladut C. V., Modelarea numerica si experimentală a mișcărilor atmosferice la scară medie peste insula Bolund, (Teza de doctorat, Bucuresti, Romania, 2015)
- [8]. Davenport, A.G., Wind Loads on Structures. (Ottawa: Technical Paper No. 88 of the Division of Building Research, 1960).
- [9]. Moțoc, M., Eroziunea solului pe terenurile agricole și combaterea ei. (Editura Agro-Silvică, București, Romania, 1963)
- [10]. Doroftei, B.I., Degeratu, M., Bandoc, G., Iordache, O.G., Moga, C.I., Researches on the use of textile materials for protection against soil erosion, (Industria Textila, nr. 2/2020, pg. 163-167, București, Romania)