

CONTRIBUȚII LA IDENTIFICAREA ȘI CONDUCEREA PROCESELOR METALURGICE

Teză destinată obținerii titlului științific
de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul Automatică
de către

Tirian Gelu Ovidiu

Conducător științific:

Prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean

CUPRINS

ABREVIERI. NOTAȚII.....	5
1. INTRODUCERE.....	9
1.1 Oportunitatea si obiectivele tezei.....	9
1.2 Prezentarea conținutului tezei.....	10
2. PROCESUL DE TURNARE CONTINUĂ.PROBLEME DE IDENTIFICARE ȘI CONDUCERE.....	12
2.1 Stadiul actual și tendințe în turnarea continuă a oțelului.....	12
2.2 Considerații tehnologice privind procesul de turnare continuă.....	15
2.2.1 Structura instalației de turnare continuă.....	15
2.2.2 Parametrii tehnologici ai procesului de turnare continuă și influența lor asupra procesului de solidificare.....	21
2.2.3 Solidificarea oțelului.....	26
2.3 Probleme ale identificării procesului de transfer termic și solidificare a crustei la turnarea continuă.....	36
2.4 Probleme ale conducerii proceselor de turnare continuă a oțelului.....	37
2.4.1 Conducerea instalațiilor de turnare continuă.....	37
2.4.2 Structura sistemului de conducere a procesului de turnare continuă de la A.M. – HD.....	38
2.4.3 Detecția și eliminarea fisurilor în semifabricat la turnarea continuă.....	40
2.5 Concluzii.....	41
3. IDENTIFICAREA ANALITICĂ, SIMULAREA ȘI ANALIZA PROCESULUI DE SOLIDIFICARE A OȚELULUI ÎN CRISTALIZOR.....	43
3.1 Preliminarii.....	43
3.2 Identificarea analitică a procesului de solidificare a semifabricatelor turnate continuu.....	43
3.2.1 Modelarea prin metoda diferențelor finite.....	44
3.2.2 Analiza stabilității soluției ecuațiilor cu diferențe finite.....	48
3.3 Simularea procesului de solidificare și implementarea programului de simulare.....	49
3.4 Rezultatele, analiza simulărilor.....	59
3.5 Concluzii.....	67
4. SISTEM MULTI-NEURONAL PENTRU DETECȚIA FISURILOR ÎN SEMIFABRICAT LA TURNAREA CONTINUĂ.....	69
4.1 Concepția sistemelor de detecție a fisurilor.....	69
4.1.1 Preliminarii.....	69
4.1.2 Principiul de detecție a fisurii.....	72
4.2 Proiectarea arhitecturii sistemului de rețele neuronale pentru detecția fisurilor la turnarea continuă.....	74
4.2.1 Arhitectura sistemului.....	74
4.2.2 Arhitectura RSD.....	75
4.2.3 Arhitectura RS.....	81
4.3. Implementarea sistemului multi-neuronat	84
4.3.1 Preliminarii.....	84
4.3.2 Implementarea software a sistemului multi-neuronat pentru detecția fisurilor din semifabricat la turnarea continuă.....	85

4.4	Date de intrare pentru rețelele RSD și RS concepute.....	91
4.4.1	Date de intrare pentru RSD.....	91
4.4.2	Date de intrare pentru RS.....	98
4.5	Concluzii.....	100
5.	SISTEM FUZZY PENTRU PREDICȚIA ȘI ELIMINAREA FISURILOR ÎN PROCESUL DE TURNARE CONTINUĂ.....	101
5.1	Preliminarii.....	101
5.2	Structura sistemului fuzzy pentru predicția și eliminarea fisurilor.....	102
5.3	Proiectarea SDF.....	105
5.3.1	Proiectarea SDF - 0.....	105
5.3.2	Proiectarea SDF - 1.....	110
5.4	Simularea funcționării sistemului de decizie fuzzy.....	114
5.5	Concluzii.....	120
6.	IMPLEMENTAREA SISTEMELOR DE DETECȚIE, PREDICȚIE ȘI ELIMINARE A FISURILOR ÎN CADRUL PROCESULUI DE TURNARE CONTINUĂ.....	122
6.1.	Preliminarii.....	122
6.2	Implementarea propriu-zisă a RN și a SDF în structura sistemului de conducere a procesului de turnare continuă.....	123
6.3	Simularea funcționării sistemului neuronal și fuzzy pentru detecția și eliminarea fisurilor în procesul de turnare continuă.....	125
6.3.1	Descrierea funcționării sistemului simulat.....	125
6.3.2	Validarea funcționării sistemului simulat.....	126
6.4	Experimentări industriale. Validarea soluțiilor propuse.....	132
6.4.1	Sistem fuzzy pentru eliminarea alunecării semifabricat-rol de tragere.....	135
6.4.1.1	Proiectarea SFA.....	138
6.4.1.2	Simularea sistemului actual de reglare a vitezei.....	141
6.4.1.3	Implementarea și simularea sistemului de reglare a vitezei echipat cu SFA.....	143
6.4.2	Rezultate experimentale.....	145
6.5	Concluzii.....	151
7.	CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	152
7.1	Concluzii.....	152
7.2	Contribuții personale.....	155
7.3	Direcții de cercetare generate de studiile efectuate.....	157
Anexa 1	COMPOZIȚIA CHIMICĂ PENTRU OLT 35k.....	158
Anexa 2	CODUL SURSĂ AL PROGRAMULUI DE SIMULARE „TirSim”.....	159
Anexa 3	CODUL SURSĂ AL APLICAȚIILOR CU RN.....	165
Anexa 4	CODUL SURSĂ AL PROGRAMULUI PENTRU PLC S315-2DP.....	172
Bibliografie.....		176
Anexa 5.	LISTA DE LUCRĂRI PUBLICATE ÎN DOMENIUL TEZEI.....	187
Anexa 6.	LISTA DE LUCRĂRI PUBLICATE ÎN DOMENIUL TEZEI (EXCEPTÂND CELE DIN DOMENIUL TEZEI).....	191

ABREVIERI. NOTAȚII

Abrevieri:

SDF- sistem de decizie fuzzy

SFA – sistem fuzzy adaptiv

SDF-0- sistem de decizie fuzzy cu baza de reguli „0”

SDF-1- sistem de decizie fuzzy cu baza de reguli „1”

RN – rețea neuronală

RNA – rețele neuronale artificiale

A.M.-HD – Arcelor Mittal Hunedoara

MLP – Multilayer perceptron (perceptron multistrat)

LM – algoritm Levenberg Marquardt

BP – algoritm de propagare a erorii înapoi (backpropagation)

RT – risc tehnologic

PLC – Programmable Logic Controller

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

PROFIBUS – Process Field Bus

Notații:

a – difuzivitatea termică

λ - conductivitatea termică

τ – variabila de timp

H – entalpia

c – căldura specifică

\varnothing – temperatura redusă

q – debitul apei de răcire primară

v – viteza de turnare

T – temperatura din distribuitor

Δv – corecție viteza de turnare

Δq – corecție debit apă răcire primară

v^* - valoare impusă existentă de viteză

q^* - valoare impusă existentă de debit

v_c - valoare impusă corectată de viteză

q_c - valoare impusă corectată de debit

1. INTRODUCERE

1.1. Oportunitatea și obiectivele tezei

Automatica este unul din domeniile cu cele mai spectaculoase evoluții în ultimul timp, legate în special de dezvoltarea sistemelor de calcul și respectiv a unor noi echipamente, a unor noi concepții și abordări în conducerea proceselor. Aceste evoluții s-au produs în paralel cu creșterea complexității, preciziei, calității și economicității proceselor tehnologice.

În prezent, turnarea continuă asigură cea mai mare parte a semifabricatelor din industria metalurgică. Procesul este unul deosebit de complex, de mare productivitate, dar, datorită unor probleme tehnologice, poate genera rebuturi prin fisurarea crustei semifabricatului și curgerea oțelului nesolidificat încă, din interior. Prezența rebuturilor conduce la diminuarea productivității instalației și implicit la pierderi economice importante.

Obiectivul principal al prezentei teze îl constituie sinteza, dezvoltarea și implementarea unor structuri de conducere a procesului de turnare continuă care să conducă practic la eliminarea fisurilor din semifabricat, cu consecințele menționate anterior. În contextul acestui obiectiv sunt dezvoltate următoarele direcții de cercetare:

- modelarea matematică a procesului de solidificare a oțelului în vederea cunoașterii mai exacte a fenomenului de formare a fisurilor;
- dezvoltarea unei structuri de rețele neuronale care să detecteze în timp real apariția unei fisuri;
- sinteza și dezvoltarea unor soluții de conducere a procesului de turnare continuă bazate pe logica fuzzy, care să permită eliminarea fisurilor detectate de rețeaua neuronală și totodată să prevină formarea unor potențiale fisuri;
- simularea și implementarea în practică a rezultatelor cercetării.

Soluțiile moderne de conducere bazate pe utilizarea rețelelor neuronale și respectiv pe logica fuzzy, permit rezolvarea unor probleme imposibil de abordat prin soluții clasice (cum este cazul de față). Indiferent de soluția adoptată, fără suportul tehnologic performant oferit de dezvoltarea microinformaticii și microelectronicii, implementarea în practică a multor strategii de conducere ar fi rămas un deziderat greu de realizat.

1.2. Prezentarea conținutului tezei

Conținutul lucrării este dezvoltat pe parcursul a șapte capitole.

În primul capitol sunt prezentate obiectivele principale ale lucrării și modul de structurare al acesteia, funcție de obiectivele și problematica abordată.

În capitolul 2 se prezintă stadiul actual și tendințe în procesul de turnare continuă, considerații tehnologice privind procesul de turnare continuă precum și probleme ale identificării și conducerii automate a procesului de turnare continuă.

În capitolul 3 este dezvoltat un model matematic al procesului de solidificare și formare a crustei la turnarea continuă, folosind metoda diferențelor finite. În vederea validării modelului, a fost conceput un program de simulare realizat în limbajul C++. Metoda de modelare și simulare propusă permite o analiză suficient de precisă a fenomenului de formare a crustei de solidificare și deci de formare a eventualelor fisuri. Deși ea nu poate fi folosită decât în regim off-line, se obțin astfel informații esențiale necesare concepției și dezvoltării în capitolele următoare, a unor sisteme de predicție, detecție și eliminare a fisurilor în semifabricat.

În capitolul 4 s-a conceput, dezvoltat și implementat un sistem de detecție a fisurilor din semifabricat, utilizând o serie de senzori de temperatură montați pe peretele cristalizorului, ale căror semnale sunt analizate de un sistem multi – neuronal care interpretează datele primite de la senzorii de temperatură și furnizează la ieșire un semnal „0” logic în cazul inexistenței fisurii și un semnal „1” logic în cazul apariției unei fisuri. Sistemul a fost implementat și validat folosind mediul Matlab.

În capitolul 5 s-a conceput, dezvoltat și implementat o soluție fuzzy originală care grefată pe structura existentă a sistemului de conducere a turnării continue elimină fisurile apărute în materialul turnat în cristalizor și de asemenea reduce posibilitatea formării de fisuri primare. În acest scop a fost concepută structura unui sistem fuzzy cu două baze de reguli care analizând o serie de mărimi preluate din proces, produce modificări ale debitului apei de răcire și ale vitezei de turnare astfel încât să fie realizat dezideratul menționat. O bază de reguli este utilizată atunci când rețeaua neuronală din amonte a detectat deja fisura, iar cealaltă bază de reguli asigură predicția în sensul eliminării posibilității de apariție a unor fisuri. Implementarea și validarea sistemului fuzzy s-a realizat folosind fuzzy toolbox și mediul Simulink din Matlab.

În capitolul 6 se propune o metodă de implementare a sistemului de predicție, detecție și eliminare a fisurilor din semifabricatul turnat. Acesta conține, în principal, o rețea neuronală pentru detecția fisurilor și un sistem de decizie fuzzy care elaborează, pe baza unor date din proces, corecții corespunzătoare pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire primară, în vederea realizării dezideratului menționat. Implementarea propriu-zisă se poate efectua, cu modificări minime, pe orice instalație în funcțiune, la un preț de cost care permite amortizarea cheltuielilor în câteva luni de zile (prin eliminarea rebuturilor de turnare).

Datorită faptului că sistemul de eliminare a fisurilor produce corecții de viteză care se aplică sub formă de treaptă, s-a constatat apariția alunecării între bara turnată și rolele de tragere. Pentru eliminarea acestei alunecări, care poate

compromite reglajul de viteză, s-a conceput și dezvoltat un sistem fuzzy adaptiv.

Experimentările industriale realizate în cadrul acestui capitol au pus în evidență faptul că, pentru aplicația considerată (conducerea procesului de turnare continuă în sensul eliminării rebuturilor) metodele abordate, bazate pe sisteme neuronale și sisteme fuzzy constituie soluții sigure, eficiente și performante de predicție, detecție și eliminare a fisurilor.

Capitolul 7 prezintă concluziile generale, rezultate din studii efectuate, principalele contribuții originale ale autorului precum și direcțiile viitoare de cercetare.

Teza se întinde pe 197 de pagini și conține 129 figuri, 28 tabele, 77 relații matematice și 220 referințe bibliografice. O foarte mare parte din contribuții a fost validată prin publicarea a 27 lucrări științifice, dintre care 21 ca prim autor, după cum urmează:

- 10 lucrări publicate în reviste și volumele unor conferințe indexate ISI
- 5 lucrări publicate în reviste și volumele unor conferințe indexate BDI
- 11 lucrări publicate în reviste și conferințe naționale și internaționale din țară și străinătate
- 1 capitol publicat în E-book

Autorul multumește în mod deosebit conducătorului științific, domnul Prof.dr.ing Octavian Proștean pentru îndrumarea competentă, permanentă, extrem de eficientă și plină de înțelegere acordată de-a lungul perioadei de elaborare a tezei. De asemenea, autorul multumește domnului Prof.dr.ing. Ștefan Gârlaşu pentru sprijinul acordat, precum și colectivului Catedrei de Automatică din Facultatea de Automatică și Calculatoare a UPT, în special domnului Prof.dr.ing. Ioan Filip pentru sfaturile competente acordate în procesul de elaborare a tezei!

Nu în ultimul rând, multumesc familiei și colectivului tehnic de la SC Arcelor – Mittal SA Hunedoara, Secția Turnare continuă, care mi-a acordat încrederea și mi-a facilitat efectuarea cercetărilor experimentale.

Autorul

2. PROCESUL DE TURNARE CONTINUĂ. PROBLEME DE IDENTIFICARE ȘI CONDUCERE

2.1. Stadiul actual și tendințe în procesul de turnare continuă a oțelului

Stadiul actual

Un loc însemnat în dezvoltarea siderurgiei îi revine procesului de turnare continuă, acesta permițând o creștere însemnată a producției, a calității semifabricatelor, o reducere a consumurilor specifice și în general o înaltă eficiență economică.

Deși ideea turnării continue a fost formulată încă în secolul trecut de către H. Bessemer [But00], instalațiile au apărut abia după anul 1950. Acestea au cunoscut o extindere rapidă, astfel încât în prezent o cantitate tot mai mare din oțelul elaborat se toarnă prin acest procedeu. În anul 2003 s-a turnat continuu 90,28% din producția mondială de oțel [***78].

Turnarea continuă, în comparație cu metodele clasice de obținere a semifabricatelor (laminare), prezintă o serie de avantaje tehnologice și economice, cele mai importante fiind: scoaterea de metal este de minim 96%, reducerea consumului de energie, materiale, manoperă pe fluxul-oțelărie laminoare, reducerea cheltuielilor de investiții pe fluxurile de laminare, creșterea calității semifabricatelor, reducerea gradului de poluare.

Turnarea continuă se poate aplica cu succes la toate procedeele de elaborare a oțelului: convertizoare cu oxigen, cuptoare cu arc electric și chiar cuptoare Siemens - Martin. În prezent, turnarea continuă este mai des integrată în fluxurile societăților siderurgice mari, ajungându-se chiar la situații de eliminare completă a laminoarelor degrositoare.

Solidificarea oțelului și deci productivitatea instalației depind de lungimea cristalizorului și viteza de turnare. Când în cristalizor se realizează numai o solidificare parțială, productivitatea instalației este mai mare.

În țara noastră primele instalații de turnare continuă a oțelului au fost puse în funcțiune în anul 1978 la SIDEX Galați și SOCOMET Oțelul Roșu, iar în 1980 la SIDERCA Călărași. Ulterior, astfel de instalații au fost implementate și la COST Târgoviște și la SIDERURGICA Hunedoara.

Introducerea turnării continue în anii 1960 și dezvoltarea în continuare a acestei tehnologii în continuare a oferit producătorilor de oțel, în special celor de produse plate, o alternativă în practica turnării în lingouri, care erau apoi deformate în laminoare degrositoare (slebing, bluming). Noua metodă de producere a semifabricatelor de oțel s-a dezvoltat rapid, în prezent în țările dezvoltate circa 87% din oțelul lichid fiind turnat continuu [But00],[***03],[Tho01] .

Japonia, unul dintre cei mai mari producători de oțel toarnă continuu 94,7% din oțelul elaborat. Din țările comunității Europene, Franța și Italia toarnă continuu 96,2% din producția de oțel, iar toată Comunitatea Europeană 85,8%. Marea

majoritate a țărilor vestice toarnă continuu peste 67% din producția lor de oțel [***03].

România turna continuu circa 30% în 1989, atingând în 1992 circa 52%, dar nu prin lărgirea ariei ocupate de turnarea continuă, ci prin restrângerea producției de oțel - lingou [But00]. În prezent, se toarnă circa 61% din producția de oțel a țării [***03].

Răspândirea pe scară largă a turnării continue a dus la apariția a peste 1400 de mașini de turnare continuă cu peste 4000 fire, tehnologia și utilajele fiind accesibile celor mai mulți producători.

La ora actuală tendința pe plan mondial este ca prin turnarea continuă, să se obțină semifabricate cu secțiuni cât mai apropiată de secțiunea semifabricatului priză, în acest mod rezultând o creștere importantă privind economia de metal, energie, manoperă, investiții, etc. [But00].

Tendințe

La a III-a Conferință Europeană pentru Turnare Continuă - Madrid 1998 au fost evidențiate câteva preocupări ale perioadei actuale, în ceea ce privește atât fabricarea de mașini de turnare continuă cât mai performante, dar și pentru obținerea unor indicatori superiori la turnare și de asemenea, semifabricate turnate continuu de calitate superioară [Abb98],[Wil98],[Ior99]:

- găsierea și aplicarea de soluții tehnice pentru creșterea vitezei de turnare atât-pentru mașinile de turnat sleburi și blumuri, dar mai ales pentru cele de turnat tagle;

- opțiunea în fabricația de sleburi în condițiile unor viteze mărite pentru mașinile cu profil vertical în prima parte pe un tronson de 2,5m și apoi curb, din considerente de îmbunătățire a stării de puritate a semifabricatului turnat continuu;

- corelarea în măsură cât mai mare a caracteristicilor mașinii de turnare continuă și a echipamentului cu care este utilată cu sortimentația de fabricație căreia i se adresează, în cazul mașinilor noi și a celor re tehnologizate;

- utilizarea de cristalizoare cu lățime variabilă la turnarea sleburilor;

- creșterea lungimii metalurgice a slebului;

- prelungirea cât mai mult a secvenței de turnare continuă;

- creșterea performanței managementului de întreținere a utilajului și a echipamentelor auxiliare;

- grafice foarte strânse la punerea în funcțiune, și mai ales în cazul acțiunilor de modernizare/re tehnologizare, pentru limitarea la maxim a pierderilor de producție;

- preocuparea pentru modernizarea și re tehnologizarea mașinilor de turnare continuă, mai ales în Europa de Vest. În Tabelul. 2.1. este prezentată situația mașinilor de turnare continuă noi și modernizate în perioada 1994 - 2003 [***03], [Ior99].

Tabelul. 2.1.

Zona geografică	Sleburi		Tagle și blumuri	
	noi	modernizate	noi	modernizate
Europa de Vest	6	19	20	18
Europa de Est	10	5	23	6
America de Nord	10	13	16	9
Asia	18	5	27	4

Tendința producătorilor de oțel de a se apropia cât mai mult de dimensiunea finală a produsului prin turnarea continuă își găsește justificarea în economiile

importante de energie care sunt realizate în urma micșorării fluxului tehnologic (energia necesară atât încălzirii cât și lucrul mecanic de deformare), prin scăderea pierderilor de metal în timpul procesării și eliminării unor instalații care presupuneau investiții, personal, întreținere [Ilc97].

Problema majoră a apropierei semifabricatului turnat continuu de dimensiunea produsului finit este cuplarea „în linie” a mașinii de turnare continuă cu laminorul, urmărindu-se valorificarea optimă a căldurii fizice a semifabricatului și implicit mărirea productivității. Acest lucru a fost realizat și aplicat industrial pentru sleburile subțiri în cadrul variantelor ISP (Mannesmann) și CSP (Schloeman-Siemag) [But00].

În momentul de față, pe baza tehnologiilor dezvoltate în principal de Schloermann - Siemag (CSP), Mannesmann Demag (ISP), VAI (Conroll) și Danilei (TCS) [But00], siderurgia mondială beneficiază de trei tehnici de turnare de acest fel care și-au dovedit valabilitatea în domeniul oțelurilor carbon, dar și a oțelurilor silicioase și inoxidabile (experiența IPS la Arvedi și Conroll la ARMCO):

- turnarea continuă a slebului subțire (50 -90 mm);
- turnarea continuă a slebului mediu (120-150 mm);
- turnarea continuă a semifabricatului profilat.

În același timp în fază preindustrială, se depun de câțiva ani, eforturi mari de concepție și finanțare pentru a se pune la punct soluția tehnico-economică cea mai bună de turnare continuă a benzilor de grosimi sub 10mm.

Producția de sâmb subțire este relativ nouă (10 ani), dar și-a câștigat încrederea producătorilor de oțel mai ales datorită capacității procedurii de a asigura o calitate ridicată (avantajele economice: reducerea cheltuielilor de investiții, durata mai scurtă de recuperare, costurile de producție mai mici, fiind de mult cunoscute și de necontestat) [Ilc97].

Ansamblul acestor avantaje au determinat creșterea permanentă a capacităților de producție, cu explozia semnificativă de după anul 1994 [Abb98], [Wil98]. Având în vedere capacitățile de producție în funcțiune și cele comandate se estimează că producția de bandă laminată la cald obținută pe flux cu sâmb subțire reprezintă în anul 2005 cca. 18% din producția mondială, tinzând spre 20% în următorii 10 ani [***03].

Soluția tehnologică de turnare continuă a slebului subțire, inițial atașată fluxurilor de fabricație, începe să fie tot mai mult îmbrățișată de producători cu flux integrat. După uzinele Acme Steel, AlgomaSteel (ambele din S.U.A.) și Posco (Coreea de Sud), a debutat și în Europa, la Bruckhausen Thyssen / Germania (soluția CSP, mașină cu două fire cu alimentare din convertizor de 380 t), urmată în anul 2000 de PIF de la Hoogovens (soluția ISP mașină cu un fir, alimentare din convertizorul de 320 t) [Hen98],[Sch98].

Din punct de vedere tehnic, inițial s-au turnat continuu sleburi de 50mm (Nucor Crawfordsville), dar din considerente de productivitate, treptat grosimea sleburilor a fost crescută la [Chi80],[But00]:

- 70-90mm, aplicând pe segmentul I tehnica LCR (reducere pe miez lichid) care înseamnă de fapt aplicarea unor forțe de presare pe ambele laturi ale slebului, producându-se o deformare până la grosimea de 50mm, în condiții de menținere a miezului lichid;
- 120-150mm, determinând apariția familiei de mașini TC pentru sleburi de grosime medie.

De remarcat punerea în funcțiune în Cehia, la Nova Hut Ostrava, a primului astfel de „medium caster” din Europa (grosime slab 120-125mm).

Perspectiva procedului, odată rezolvate problemele calitative și ale productivității este indubitabilă. Faptul că uzinele integrate adoptă procedeul creează cel puțin două premise:

- potențial de resurse financiare mai mari pentru cercetare - dezvoltare care vor permite perfecționarea și mai mult a procedului;

- amenințarea că producția de bandă laminată la cald să fie absorbită de uzine tip mini mill se micșorează, având în vedere că totuși costurile de fabricație în uzinele integrate sunt mai scăzute decât în uzinele mini mill. Asocierea procedului „smelting reduction” (tip COREX) poate interveni decisiv în această competiție a producătorilor.

Managementul uzinelor siderurgice producătoare de produse plate (cu precădere acelea unde banda laminată la cald deține o pondere mare în vânzări) este constrâns tot mai mult de evoluția pieței să adopte soluții tehnice generatoare de costuri minime. Cele prezentate se pot argumenta prin două exemple: indicele prețurilor pe piața europeană pentru rulouri de bandă laminată la cald a scăzut continuu începând cu ani 80 și recesiunea din siderurgie în ultimul an a afectat de asemenea cel mai mult, din punct de vedere al prețurilor de vânzare pe piața europeană producția de rulouri de bandă laminată la cald.

Soluția de realizare a semifabricatelor NNSC (near net shape casting) destinate fabricației de produse lungi (profile) s-a materializat de asemenea de câțiva ani prin intrarea în exploatare a așa numitului „beam blanks caster” (mașina de turnare continuă pentru semifabricate profilate). Uzinele ARBBED, funcționând cu CE de la Differdange, Unterwellenborn și Esch – Belval, sunt principalele beneficiare ale acestui procedeu [Kle98].

2.2 Considerații tehnologice privind procesul de turnare continuă

Necesitatea fabricării prin turnarea continuă a unor produse cu performanțe calitative înalte și în același timp competitive reclamă cunoașterea aprofundată a fenomenelor și proceselor complexe care au loc pe fluxul tehnologic de elaborare – turnare.

2.2.1 Structura instalației de turnare continuă

Turnarea continuă, ca metodă se realizează prin introducerea metalului lichid cu o temperatură bine determinată într-o formă cavă având pereții răciți cu apă la interior, numită *cristalizer*, iar evacuarea se face la capătul opus unde se obține firul de metal solidificat [***98]. Traversarea de către metalul lichid a cristalizerului are loc în mișcare continuă sau intermitentă (în cazul turnării continue orizontale). Construcția și poziția cristalizerului a generat o diversificare foarte largă de procedee de turnare continuă. Instalațiile de turnare continuă pot fi: cu *cristalizer vertical* (drept sau curb) și cu *cristalizer orizontal* [***73] (această metodă se aplică în special pentru turnare metalelor neferoase).

Lungimea cristalizerului, corelată cu viteza de turnare asigură solidificarea parțială sau totală a secțiunii firului. Desăvârșirea solidificării are loc în afara cristalizerului, prin stropire directă cu apă sub presiune (*zona de răcire secundară*).

Elementele componente ale instalației de turnare continuă (fig. 2.1) [Tir10_4],[Tho93],[Tho03] sunt descrise în continuare pe baza secvențialității rolurilor acestora în procesul de elaborare a oțelului turnat continuu. Acestea sunt:

- oala de turnare;
- distribuitorul;
- cristalizatorul și oscilatorul;
- zona de răcire secundară;
- agregatul de extragere și îndreptare;
- bara de pornire
- agregatul pentru debitarea semifabricatelor.

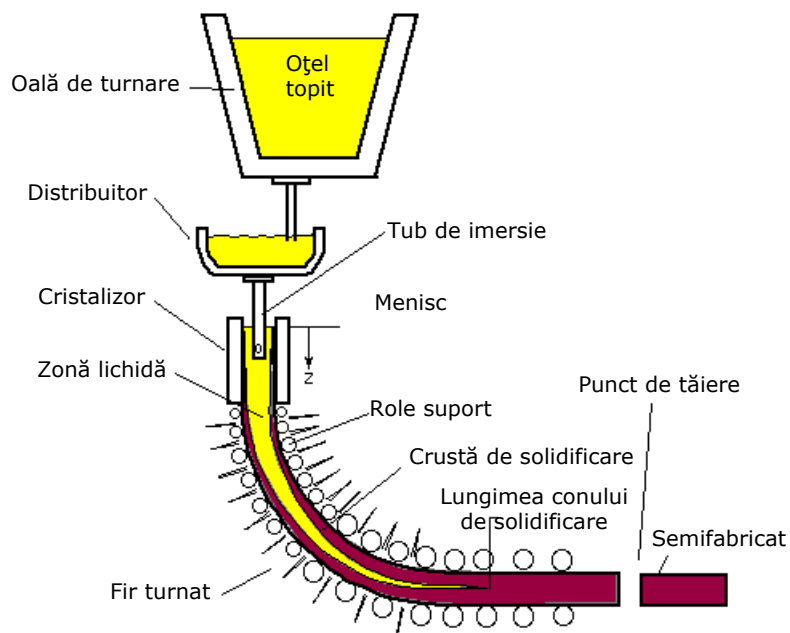


Fig.2.1 Instalația de turnare continuă a oțelului

Oala de turnare

Oala de turnare reprezintă elementul de legătură între cuptorul de elaborare a oțelului și mașina propriu-zisă de turnare continuă și trebuie să îndeplinească o serie de funcții tehnologice, dintre care cele mai importante sunt: menținerea unei temperaturi cât mai constante a oțelului, separarea cât mai completă a zgurii, curgerea cât mai liniștită a metalului și debit constant de turnare. În același timp, oala de turnare trebuie să prezinte o siguranță cât mai mare în exploatare și o durabilitate avansată a căptușelii refractare [***98].

Capacitatea oalelor de turnare variază între limite largi, în funcție de dimensiunile semifabricatelor, numărul firelor, viteza de turnare, de căderile admisibile de temperatură a oțelului lichid. Aceasta poate avea valori cuprinse între 10 ÷ 400 tone. Divizarea șarjelor prezintă dificultăți în ceea ce privește sincronizarea turnării și conduce la căderi mai mari de temperatură [***72],[***73],[***95].

Căderile de temperatură variază astfel: 0,1°C/min pentru șarjele de 250 t, 0,3°C/min pentru șarjele de 100 t, 0,7°C/min pentru șarjele de 50 t și 1°C/min pentru șarjele de 20 t.

Având în vedere limitarea căderii de temperatură la 30-50°C, se poate determina timpul de turnare, respectiv capacitatea oalei. Între ultimele două mărimi există o relație experimentală [Opr78]:

$$t_{\max.\text{turn.}} = K(\lg P_{\text{oală}} - 0,2)/0,3 \text{ [min]} \quad (2.1)$$

în care: K - este coeficient de calitate a oțelului (K=10 ÷ 16, valorile mici pentru oțelurile aliate),
P_{oală} - capacitatea oalei de turnare [t].

Pentru transferul oțelului din oala de turnare spre instalația de turnare, se consideră acceptabilă utilizarea sertarelor glisante. Sertarul glisant trebuie să aibă fie mai multe orificii de mărimi diferite, fie o capacitate de gătuire satisfăcătoare pentru a asigura un jet de oțel compact și vertical, chiar și atunci când curgerea este redusă.

În vederea uniformizării temperaturii se prevede barbotarea oțelului cu gaze inerte (argon, azot).

Șarjele turnate fără zgură sau cu puțină zgură trebuie acoperite cu un compus de izolare în oală pentru a reduce pierderea de temperatură și pentru a împiedica reoxidarea.

Distribuitorul

Distribuitorii servesc mai multor scopuri în același timp, [***73], distribuie oțel tuturor cristalizoarelor, fără pierderi majore de căldură și trebuie să permită impurităților grosiere să se ridice la suprafața băii de metal. Distribuitorul trebuie să servească de asemenea ca o capacitate tampon între oală și cristalizor, să permită controlul fluxului de oțel în cristalizor și totodată să ofere suficientă capacitate de stocare pentru schimbarea oalei în cazul turnării secvențiale.

O importanță deosebită o are forma distribuitorului, respectiv raportul d [***98] între dimensiunile acestuia, determinând și nivelul de metal din cristalizor. În cazul unui raport prea mic dintre nivelul de metal și capacitatea băii, rezultă pierderi mari de temperatură și o reglare dificilă a debitului din cauza presiunii ferostatice prea scăzute. În general, adâncimea metalului din distribuitor este de 300-600 mm, iar deasupra nivelului de metal se lasă circa 200 mm spațiu liber. În scopul micșorării pierderilor de căldură, distribuitorul este acoperit cu un capac căptușit cu material refractar și prevăzut cu deschiderile necesare pentru dopul de turnare, în vederea introducerii oțelului în distribuitor. Căptușeala refractară a capacelor nu trebuie să se desprindă și să cadă în distribuitor [***73],[***95].

Debitul de oțel al distribuitorului (pentru un fir) este dat de relația [Guț77]:

$$Q = \frac{d^2}{375} \sqrt{h} \text{ , [t/h]} \quad (2.2)$$

unde: d - diametrul orificiului de turnare, [mm];
h - înălțimea băii metalice, [mm].

În figura (2.2) [***73], se prezintă secțiunea printr-un distribuitor pentru turnarea țagelor (figura 2.2):

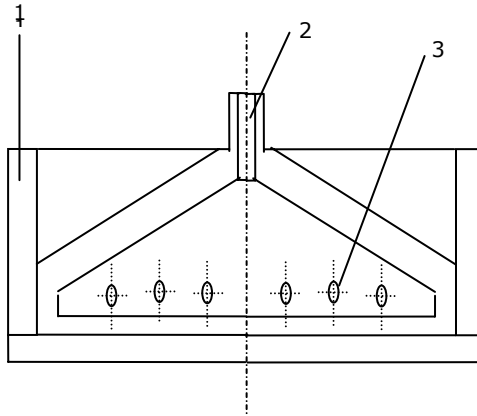


Fig. 2.2 - Distribuitor pentru turnarea țagelor:
1 - carcasă metalică; 2 - jgheab de prea plin; 3 - orificiu de turnare

Cele mai multe mașini de turnare continuă utilizează distribuitoare cu dopuri monobloc, sertarele glisante ale distribuitorului sunt mai mult o excepție.

Turnarea continuă cu tuburi de imersie este valabilă pentru toate dimensiunile de fire, suficient de mari. Rolul tubului de imersie este pe de-o parte acela de a proteja oțelul lichid împotriva reoxidării de către oxigenul din aer în drumul său de la distribuitor la cristalizor, iar pe de altă parte de a conduce oțelul prin zgura de turnare, care plutește pe partea superioară a oțelului în cristalizor.

Pentru o turnare fără probleme și rezultate de calitate satisfăcătoare, o condiție esențială o constituie preîncălzirea distribuitorului.

Cristalizorul și oscilatorul

Cristalizoarele reprezintă partea cea mai importantă a mașinilor de turnare continuă. Construcția lor, conductibilitatea termică, precizia de prelucrare și de asamblare a cristalizoarelor joacă un rol determinant pentru obținerea unei productivități maxime și a unei calități superioare a semifabricatelor [***98],[But00].

În timpul turnării, cristalizorul primește oțelul lichid în partea sa superioară în condiții precise de temperatură și debit, iar la partea inferioară se extrage cu viteză constantă un semifabricat având o crustă solidificată și miezul lichid. În primă fază, datorită contactului direct dintre metal și cristalizorul răcit cu apă, transmisia de căldură este rapidă și se formează în scurt timp o crustă solidă de grosime mică. Produsul coborând în cristalizor, crusta solidă se contractă, rezultând un interstițiu de aer între semifabricat și cristalizor, ceea ce înrăutățește considerabil transmisia de căldură. În această fază poate să apară străpungerea metalului topit prin crusta subțire, mai ales dacă interstițiul de aer nu are o grosime constantă pe perimetrul cristalizorului. În acest caz eforturile datorate presiunii ferostatice sunt maxime în regiunea unde crusta are grosime mică, deformările și rupturile fiind cele mai frecvente în această zonă [Guț77].

Poziția în care semifabricatul s-a separat complet de cristalizor determină lungimea utilă a acestuia, deoarece în continuare, este mai eficientă răcirea directă cu apă.

Grosimea crustei solidificate „g” crește în timp, conform relației simplificate [Guț77]:

$$g = k\sqrt{t}, \text{ [mm]} \quad (2.3)$$

în care:

k - constantă de solidificare având valoarea 30 pentru o răcire foarte intensă și 28 pentru o răcire mijlocie [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$];
t - timpul, [min].

Ținând seama de înrăutățirea transmisiei de căldură în cazul unui timp mai îndelungat de deplasare a metalului în cristalizor, apare necesitatea ca, cristalizorul să fie cât mai scurt posibil, pentru a putea trece cât mai repede la evacuarea căldurii prin stropire directă cu apă. Această tendință este limitată de anumiți factori de exploatare (de exemplu oscilarea nivelului de metal la turnarea secțiunilor mici) precum și de necesitatea micșorării vitezei de turnare, pentru a asigura obținerea unei cruste solide, suficient de rigide la ieșirea din cristalizor. Prin utilizarea unor cristalizoare mai lungi se poate mări viteza de turnare, rezultând însă o creștere a presiunii ferostatice și a înălțimii instalației.

Lungimea cristalizorului este limitată inferior de rezistența la cald a crustei solidificate față de acțiunea presiunii ferostatice.

Limitarea superioară a lungimii este necesară pentru limitarea dezvoltării pe verticală a instalației, ceea ce se reflectă prețul ei de cost [Opr77]. Lungimi mai mari de cristalizor permit însă viteze superioare de turnare și deci productivitate sporită. Între cele două tendințe se găsește un punct optim de economicitate. Pentru vitezele actuale de turnare, respectiv capacitățile de răcire intensivă, lungimile uzuale ale cristalizoarelor variază între 600 - 800 mm, corespunzând unei durate de trecere de 15 - 55s și unei grosimi de crustă de 14 - 30 mm [Guț77].

Cristalizorul standard (700-900 mm), permite aplicarea apei de răcire secundară la timp, ceea ce are ca rezultat o cantitate corectă de căldură îndepărtată.

O altă metodă de mărire a vitezei de turnare constă în creșterea capacității de răcire a cristalizorului, adică a cantității de căldură evacuată pe unitatea de timp și pe unitatea de suprafață, mărindu-se deci viteza de formare a crustei. În scopul măririi capacității de răcire, cristalizoarele se construiesc cu pereți subțiri și se adaugă o răcire eficientă cu apă. Pe de altă parte însă, pereții subțiri micșorează rigiditatea și durabilitatea cristalizorului.

Prin măsurarea variației de temperatură a apei de răcire se poate determina aproximativ capacitatea de răcire a cristalizorului [***73]. Pe măsura avansării materialului în cristalizor, crusta devine mai groasă și transmisia de căldură spre peretele cristalizorului se înrăutățește, micșorându-se cantitatea de căldură cedată. Prin îngroșarea și contractia crustei, care se îndepărtează de la perete, se înrăutățește transmisia căldurii. Până la un timp de deplasare de circa 40 s, se poate scrie următoarea relație pentru cantitatea de căldură evacuată [Guț77]:

$$Q = 15 \cdot 10^4 \cdot (64 - 8\sqrt{t}), \text{ [kJ / m}^2\text{h]} \quad (2.4)$$

unde: Q - cantitatea de căldură evacuată, $[KJ/m^2]$;

t - timpul de răcire, $[s]$.

În regiunea de contact dintre metal și cristalizor, nu se poate evita frecarea, dacă s-ar utiliza cristalizoare fixe deplasarea metalului ar produce tensiuni de întindere în crusta subțire solidă și ar apare rupturi în aceasta. Acest inconvenient se elimină prin aplicarea unei mișcări oscilante a cristalizorului, având o viteză de coborâre egală cu viteza de turnare sau mai mare (durata perioadei de coborâre fiind de 1-1,5 s) și o viteză de ridicare de 2-3 ori mai mare decât viteza de turnare. Acest ciclu se repetă continuu în timpul turnării. Tensiunile de întindere în crusta solidificată nu pot fi eliminate integral și este important ca trecerea de la mișcarea de coborâre la cea de ridicare să se facă cât mai lină, deoarece în această poziție tensiunile din metal sunt maxime.

Cristalizorul determină forma secțiunii transversale a unui profil turnat. Solidificarea oțelului lichid începe în cristalizor, iar crusta firului se formează și continuă să crească în timpul procesului de răcire în cristalizor și în zonele următoare de răcire secundară [Mor98].

Constructiv se realizează trei tipuri de cristalizoare și anume: compacte, tubulare și cu plăci tubulare.

Zona de răcire secundară

Scopul răcirii secundare este de a continua răcirea firului după ce acesta a ieșit din cristalizor și de a solidifica complet secțiunea transversală a firului. Zona de răcire secundară urmează imediat după cristalizor și în general se extinde peste 30%-50% din lungimea miezului lichid, fiind divizată în subzone, care sunt controlate individual. Mediul de răcire în această zonă este apa, sau un amestec de aer și apă, pulverizată prin duze la suprafața firului și astfel controlat încât temperatura suprafeței firului să scadă uniform în direcția de turnare (temperatura ar trebui să fie uniformă pe circumferința firului) [Mor98],[But00].

Răcirea secundară nu trebuie să fie prea intensă, pentru a nu cauza scăderea bruscă a temperaturii firului, care ar putea determina tensiuni termice locale în crustă și, în consecință, fisurarea internă și superficială în fir. De asemenea, răcirea secundară trebuie să fie uniformă pentru a evita suprarăcirea locală [Mör98].

În funcție de secțiunea turnată și de calitatea oțelului, pentru pulverizarea apei în zona de răcire secundară se folosesc diuze circulare conice, inelare conice și de tip fantă. În figura 2.3 [***95] este prezentată schema de principiu a circuitelor apei de răcire atât pentru cristalizor cât și pentru zona de răcire secundară.

După zona de răcire secundară urmează *agregatul de extragere-îndreptare* care realizează de extragerea și îndreptarea firului, *bara falsă* care obține partea de jos a cristalizorului la începutul turnării și antrenează firul turnat până la angajarea lui între rolele de extragere precum și *agregatul de tăiere* care realizează debitarea firului turnat continuu la lungimile de utilizare prin tăiere cu oxigaz, sau prin tăiere mecanică.

Evacuarea semifabricatelor turnate continuu și tăiate se face pe căi cu role, care le evacuează pe stivuitoare laterale, fiecărui fir de turnare corespunzând câte un stivuitor.

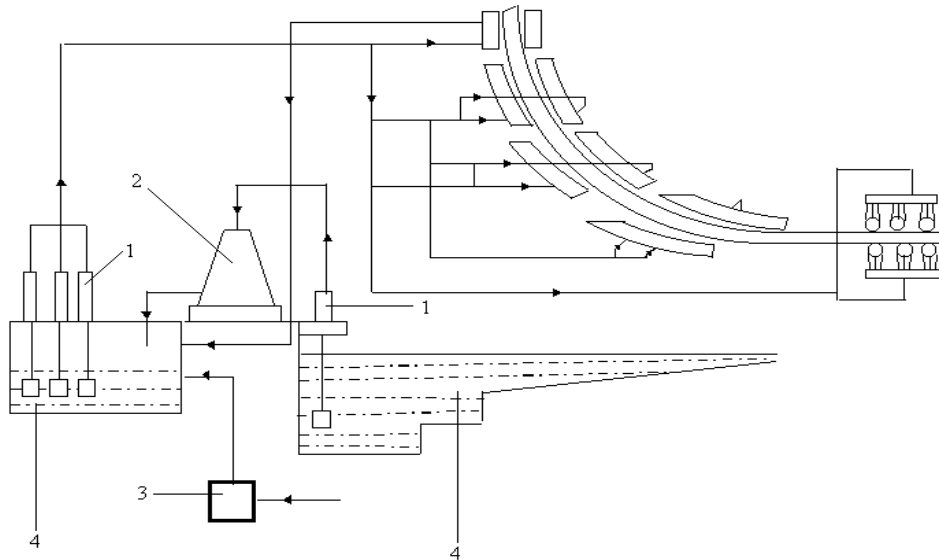


Fig. 2.3 - Schema circuitelor apei de răcire:
1 - pompă; 2 - turn de răcire; 3 - stație de pregătire a apei; 4 - bazin colector.

2.2.2. Parametrii tehnologici ai procesului de turnare continuă și influența lor asupra procesului de solidificare

La turnarea continuă a oțelului, formarea semifabricatului este condiționată de aceleași legi fundamentale ca și în cazul turnării clasice, care se obține în urma solidificării oțelului într-o lingotieră. Totuși, la turnarea continuă, factorii tehnologici care au influență considerabilă asupra procesului sunt mai numeroși decât la turnarea clasică [Sch80],[Tal83].

Pentru funcționare este necesar să se cunoască cât mai exact cum progresa solidificarea oțelului lichid, de exemplu când și unde se solidifică complet un fir [Ard01_2]. Decizii cu privire la viteza de tragere, de exemplu, sau ale debitului apei de pulverizare se pot lua doar cunoscând evoluția solidificării [Bor04].

Fenomenele solidificării oțelului în acest caz fiind mult mai complexe. Metodele de calcul analitice sunt prea complicate și greu de aplicat în practică. Ca urmare, în practica curentă, se folosesc relații simplificate, în care nu sunt luați în calcul o serie de factori cu o influență mai mult sau mai puțin considerabilă, existând posibilitatea apariției unor erori care pot fi semnificative.

La începerea turnării continue, oțelul este turnat până în momentul în care cristalizorul este umplut (fig. 2.4) [Cre98],[Tho03] după care, fără a se opri turnarea oțelului, bara falsă montată anterior la fundul cristalizorului, împreună cu semifabricatul deja format iese din cristalizor și își continuă traseul în instalația de turnare continuă până la zona de răcire secundară și de acolo mai departe, prin rolele de tragere și îndreptare, spre instalația de debitare și patul de răcire [Tal83] , [Tho03].

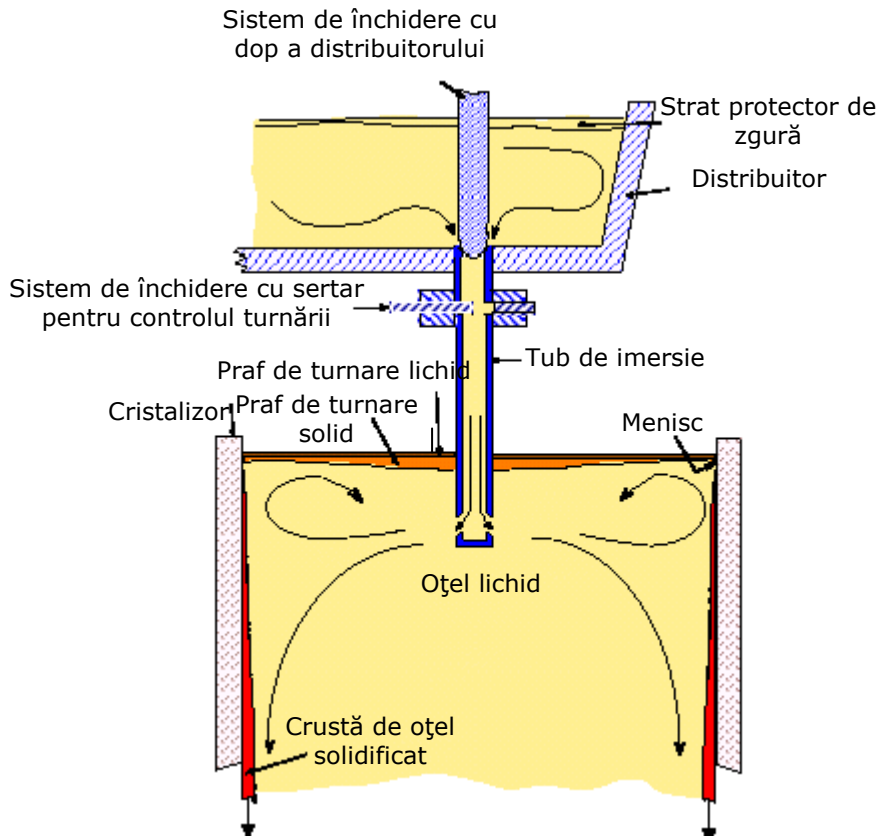


Fig. 2.4 – Turnarea oțelului din distribuitor în cristalizor

Înainte ca semifabricatul să părăsească cristalizorul are loc un schimb intens de căldură între suprafața exterioară a semifabricatului și pereții interiori ai cristalizorului, pereți care sunt puternic răciți cu apă. Răcirea, care are loc în cristalizor ca urmare a schimbului de căldură, trebuie să asigure formarea unei cruste de oțel suficient de groasă, care să reziste în primul rând la eforturile de tracțiune longitudinală (la deplasarea semifabricatului în raport cu pereții cristalizorului) și după ieșirea semifabricatului din cristalizor, crusta trebuie să reziste și la eforturile de tracțiune transversală (produsă de presiunea din interiorul oțelului).

Solidificarea semifabricatului turnat continuu nu diferă prea mult de cea a oțelului turnat sub formă de lingouri, însă datorită faptului că în primul caz, lungimea semifabricatului turnat continuu este foarte mare comparativ cu cea a unui lingou, condițiile de formare a zonei axiale sunt schimbate (zona de oțel lichid, respectiv conul de solidificare se întinde pe o lungime mult mai mare) [***77] [Var82].

Principalii factori de influență la turnarea continuă îi constituie *temperatura*, *timpul* și *viteza de turnare*.

Temperatura de turnare

Soluția ideală ar fi ca metalul lichid să ajungă în cristalizor la o temperatură constantă în timp, puțin superioară temperaturii de solidificare a mării de oțel turnată continuu. Acest lucru nu se poate realiza integral, deoarece pierderile termice în timpul turnării ating valori importante, ceea ce impune o supraîncălzire a oțelului la topire, asigurându-se astfel o temperatură suficientă pe întreaga perioadă a turnării continue. Ținând seama de specificul procesului tehnologic, temperatura metalului la sfârșitul elaborării este mai ridicată decât în cazul turnării clasice [***73].

Temperatura oțelului în diverse faze ale procesului tehnologic depinde de următorii factori: calitatea oțelului (temperatura lichidus și solidus), mărimea șarjei și condițiile de amplasare a halei de turnare continuă în fluxul tehnologic (care determină pierderile de căldură a metalului din oala de turnare, până la poziționarea acesteia deasupra instalației de turnare continuă).

Temperatura oțelului la începutul turnării din cuptorul de elaborare poate varia în limite largi (1600 – 1700°C), în funcție de factorii menționați anterior. La majoritatea instalațiilor moderne, această temperatură este însă cuprinsă între 1620 – 1650 °C [***73],[Sch80].

Viteza de răcire a metalului în oala de turnare depinde de mărimea șarjei, respectiv de capacitatea oalei de turnare. În Tabelul 2.2 sunt date câteva valori ale vitezei de răcire.

Tabelul 2.2

Viteza de răcire a metalului [°C/min.]	Capacitatea oalei de turnare [t]
0,1	250-300
0,3	100
0,75	40
1,00	20

Temperatura metalului din oala de turnare în timpul turnării continue trebuie să fie pe toată perioada cu 30 – 60°C peste temperatura de topire, fiind cuprinsă în general între 1570 și 1620°C. Temperatura din distribuitor trebuie să fie cu 15 – 40°C deasupra temperaturii de topire, fiind în general cuprinsă între 1550 – 1580°C. Viteza de răcire în distribuitor variază, la instalațiile de mare capacitate, între 2 și 5 °C/min, timpul de staționare fiind de câteva minute, scăderea temperaturii în distribuitor este mică (10 – 20°C) [Opr77].

Pentru o funcționare corectă a instalației de turnare continuă, trebuie asigurat un control riguros asupra temperaturii oțelului. Precizia necesară față de temperatura prescrisă la intrarea în cristalizor trebuie să fie de $\pm 5...10^{\circ}\text{C}$ [Opr77],[Pop03], [Pop05].

Dacă temperatura oțelului la turnare este prea ridicată, este necesară micșorarea sensibilă a vitezei de turnare și o răcire secundară foarte intensă, având ca și consecință defecte interne și de suprafață, datorate tensiunilor termice și de asemenea, crește pericolul străpungerii sub cristalizor. O temperatură de turnare prea scăzută poate duce la astuparea orificiilor de turnare ale distribuitorului, în special în cazul sleburilor subțiri sau a țagelilor de secțiune mică, precum și la defecte de suprafață.

Timpul de turnare

Timpul de turnare a unei șarje rezultă din capacitatea oalei și viteza de turnare. Timpul maxim de turnare depinde în primul rând de scăderea maxim admisă de temperatură, deoarece, după cum s-a arătat anterior, considerente metalurgice impun menținerea temperaturii de turnare între limite precise, în scopul obținerii unei calități corespunzătoare a produselor și al unei funcționări sigure a instalației.

De asemenea, tot un factor limitativ pentru timpul maxim de turnare al unei șarje îl constituie și durabilitatea materialelor refractare, în special pentru orificiile și dopurile de turnare. În ultimul timp s-au făcut progrese importante în ceea ce privește durabilitatea, iar sisteme noi (cum ar fi sisteme de închidere cu clapă, răcirea cu aer a dopurilor, etc), permit perioade lungi de turnare fără întreruperi (turnare secvențială).

În practica curentă se urmărește turnarea cu viteză maximă admisă de calitate a oțelului și dimensiunile semifabricatului, ceea ce impune siguranță în exploatare (în special evitarea străpungerilor), respectarea distanței (rezultată din proiectare) dintre cristalizor și dispozitivul de tăiere, ținând seama că tăierea nu se poate efectua numai după solidificarea completă.

Limitarea dictată de capacitatea oalei de turnare provine de la faptul că la instalațiile moderne se preferă turnarea întregii șarje provenită de la un cuptor de elaborare într-o singură oală și timpul de golire a oalei nu poate depăși o anumită valoare maximă fără ca temperatura să scadă sub limita minimă admisă.

Ținând seama de cele menționate, timpul maxim de turnare depinde de calitatea oțelului, metodele adoptate pentru micșorarea pierderilor de căldură în oală, capacitatea oalei și domeniul admis de temperatură pentru o funcționare sigură și o calitate bună a semifabricatelor [Sch80].

Schoeffmann R. [***73] indică următoarea relație pentru determinarea timpului maxim admis de turnare în funcție de capacitatea și calitatea oțelului:

$$t = f \frac{\log G - 0,2}{0,3}, [\text{min}] \quad (2.5)$$

în care: G – reprezintă capacitatea oalei de turnare, [t];
f – coeficient ce depinde de calitatea oțelului;
f = 10 pentru oțelurile cele mai pretențioase;
f = 16 pentru oțelurile obișnuite.

Pe baza relației (2.5), timpul maxim de turnare este de 50 – 80 min pentru oale de 100 t și 60 – 100 min pentru cele de 300t.

În practică, deseori se consideră că pentru majoritatea sortimentelor uzuale de oțeluri și oale de capacitate mai mare de 100 t, se poate adopta un timp maxim de turnare de 60 min. De exemplu, la mașina de turnare continuă țagle de la Huta Katowice, s-au obținut timpii de turnare, din oala de 330t specificați în Tabelul 2.3 [Ior99].

Tabelul 2.3

Mărimea formatului, [mm]	Timpu de turnare din oala de 330t, [min]
φ 105	125
φ 140	96
φ 160	88
190 x 220	78

Se poate observa din fig. 2.5 că timpul de turnare scade odată cu creșterea secțiunii semifabricatului turnat continuu.

Se menționează însă faptul că pentru oțelurile calmate cu aluminiu, prelungirea timpului de turnare peste o anumită limită duce la micșorarea inadmisibilă a conținutului de aluminiu [Guț77],[But00]. Astfel, în cazul oțelurilor calmate cu aluminiu pentru ambutisare adâncă, timpul de turnare nu trebuie să depășească 40 min.

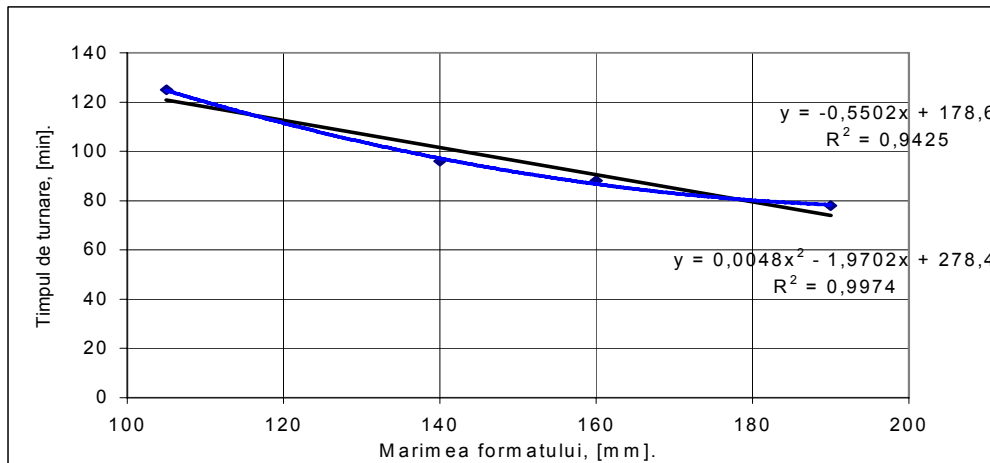


Fig. 2.5 - Variația timpului de turnare în funcție de mărimea formatului turnat continuu

Viteza de turnare

Viteza de turnare este factorul determinant pentru dimensionarea instalației de turnare continuă, deoarece influențează sensibil productivitatea, numărul necesar de fire (pentru a putea goli în timpul maxim admisibil oala de turnare de o anumită capacitate la turnarea unui semifabricat de secțiune dată) și secțiunea minimă a semifabricatului turnat.

În practică se alege viteza maximă admisă de turnare, în funcție de calitatea oțelului, secțiunea semifabricatului, timpul de solidificare și distanța dintre cristalizor și dispozitivul de debitare [Guț77],[Ior99].

O valoare prea mare a vitezei de turnare conduce la formarea unei cruste prea subțiri în cristalizor, fără o rezistență suficientă la presiunea ferostatică a miezului lichid, ceea ce are ca efect pericolul străpungerilor. De asemenea, viteza prea mare mărește porozitatea axială, facilitează formarea fisurilor longitudinale și necesită o înălțime mare a instalației datorită creșterii adâncimii zonei lichide, respectiv a lungimii metalurgice [***86],[Sch80].

O valoare prea mică a vitezei de turnare influențează negativ structura semifabricatului, produce suduri reci și alte defecte de suprafață, poate duce la răcirea excesivă a oțelului în oala de turnare și limitează debitul de metal care la rândul lui are influență asupra productivității instalației. De asemenea, vitezele mici de turnare limitează capacitatea oalei de turnare sau secțiunea minimă a semifabricatului și necesită un număr mai mare de fire.

Cele mai mari viteze de turnare se aplică la oțelurile carbon calmate. Oțelurile necalmate se toarnă cu viteze considerabil mai reduse, pentru a permite completarea fierberii oțelului în cristalizor și degajarea gazelor. De asemenea,

oțelurile aliate trebuie turnate cu viteze mai scăzute din cauza sensibilității mai ridicate la porozitate centrală și la formarea fisurilor [But00].

Datorită progreselor realizate în timp, vitezele de turnare au fost considerabil mărite la instalațiile noi, în special la instalațiile de turnare continuă a sleburilor. Astfel, dacă la primele instalații de turnare a sleburilor mari, viteza de turnare era în general de 0,5 m/min și nu depășea 0,7 m/min, la instalațiile mai recente, vitezele de turnare pentru sleburile de aceeași grosime sunt de circa 2,0 – 2,5 m/min, cu tendința de a se mări și mai mult [Sch80].

În acest sens, tot pentru mașina de turnare continuă de la Huta Katowice [Ior99], s-au obținut și viteze de turnare mult superioare celor amintite anterior (Tabelul 2.4).

Tabelul 2.4

Mărimea formatului, [mm]	Viteza de turnare, [m / min]
φ 105	5,2
φ 140	3,8
φ 160	3,2
190 x 220	2,2

Se poate observa în fig. 2.6 că și viteza de turnare scade odată cu creșterea mărimii formatului pentru semifabricatul turnat continuu.

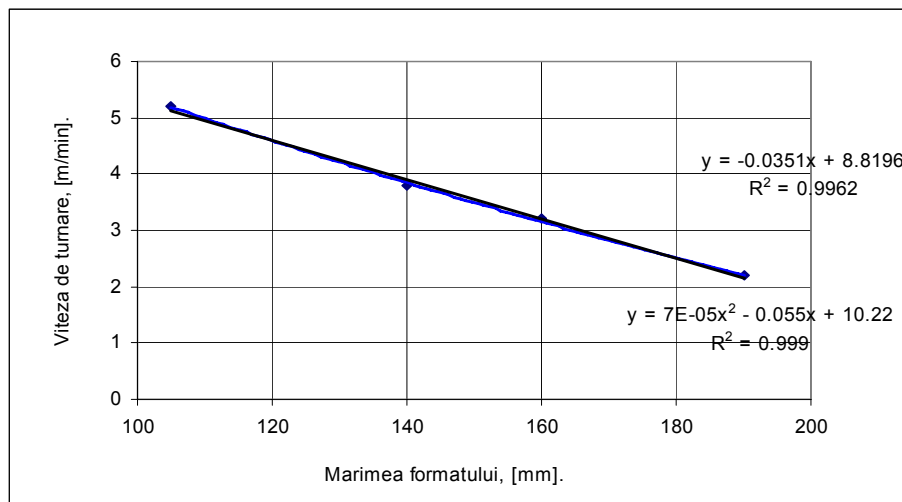


Fig. 2.6 - Variația vitezei de turnare în funcție de mărimea formatului semifabricatului turnat continuu

2.2.3 Solidificarea oțelului

Problema centrală a turnării continue este solidificarea oțelului, adică posibilitatea realizării condițiilor de răcire (directă și indirectă) pentru a se asigura degajarea căldurii conținute în metalul topit [Cun99],[Bor04].

Cercetarea și cunoașterea condițiilor de solidificare constituie baza teoretică a turnării continue, determinând condițiile de răcire în funcție de secțiunea și

compoziția chimică a materialului, precum și unii dintre parametrii tehnologici și constructivi ai instalației (viteza de turnare, numărul de fire, înălțimea și raza de curbare a instalației etc.) [Pop03].

Particularitățile principale ale oțelului care influențează în mare măsură turnarea continuă a acestuia sunt: temperatura înaltă de turnare, conținutul mare de căldură al oțelului lichid, conductibilitatea termică scăzută, difuzibilitatea termică joasă, viteza mare de cedare a căldurii prin radiație în stare lichidă, viteza mare de solidificare etc.

Solidificarea metalului începe în cristalizor, la primul contact dintre metalul lichid și pereții cristalizorului, intens răciți cu apă și se consideră că a luat sfârșit la atingerea acestuia înaintea rotelor de extragere. Cercetările efectuate în stadiul inițial au stabilit că pentru turnarea continuă a oțelului este suficient să se formeze o crustă solidă relativ subțire în interiorul cristalizorului, iar solidificarea completă se poate efectua în afara cristalizorului, prin răcire directă [Var82],[Ard01_2].

Grosimea necesară a crustei solidificate la ieșirea semifabricatului din cristalizor depinde în primul rând de secțiunea produsului. Pentru țagăle mici este suficientă o crustă subțire, în timp ce secțiunile mari necesită o crustă mai groasă și mai rezistentă din cauza presiunii ferostatice mărite, care acționează asupra semifabricatului la ieșirea din cristalizor. Din acest motiv, viteza de turnare scade pe măsura măririi secțiunii transversale a semifabricatului.

Semifabricatul ieșit din cristalizor, în curs de solidificare, este deci format dintr-o crustă solidă, având grosimea crescândă de sus în jos și dintr-un miez lichid, în formă de V. Solidificarea acestui miez se realizează prin răcire directă cu apă (fig. 2.7) [***72],[Tho03].

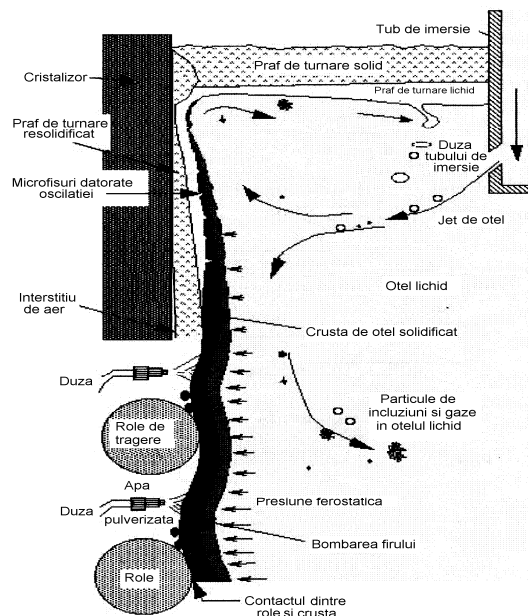


Fig. 2.7 – Schema solidificării primare și secundare la turnarea continuă

În principiu, **procesul de solidificare la turnarea continuă** se compune din următoarele patru **etape**:

1. Formarea rapidă a unei cruste subțiri în partea superioară a cristalizorului. Grosimea crustei crește brusc datorită contactului direct cu pereții cristalizorului răciți cu apă.

2. La o distanță mică de meniscul lichid, crusta solidificată este suficient de răcită pentru a se contracta, ceea ce face să dispară contactul dintre metal și cristalizor. Datorită interstițiului de aer dintre metal și cristalizor, condițiile schimbului de căldură se înrăutățesc, iar viteza de solidificare scade.

3. Solidificarea miezului, sub efectul răcirii secundare cu apă provoacă o diferență mare de temperatură între suprafața și centrul semifabricatului turnat continuu.

4. Egalizarea temperaturii pe secțiunea semifabricatului complet solidificată datorită răcirii în aer după zona de răcire secundară și transmiterea căldurii de la miez spre exterior și în continuare, răcirea întregii secțiuni în contact cu aerul.

Parametrul de bază al solidificării unui metal este *viteza de formare a crustei solide*, denumită și *viteză de solidificare*, care exprimă legătura dintre grosimea crustei și timp. Aceasta poate fi exprimată matematic printr-o lege parabolică de forma: [Tho93],[***73]

$$g = k\sqrt{t} \quad (2.6)$$

în care: g - grosimea crustei solidificate [mm];
 k - constantă denumită și coeficient de solidificare, [mm/min]^{1/2};
 t - timpul de la începutul turnării, [min].

Din relația (2.6) rezultă că viteza de solidificare nu este constantă, ci scade în cursul procesului, datorită scăderii intensității solidificării pe măsura creșterii grosimii crustei.

Relația simplificată a legii solidificării a fost completată prin introducerea altor constante determinate empiric.

De exemplu Chipman [***73] propune pentru turnarea clasică formula:

$$g = -0,12 + 0,9\sqrt{t} \quad (2.7)$$

După Lewis și Savage [***73] pentru începutul solidificării este valabilă relația:

$$g = 0,12 (3 + 4t) \quad (2.8)$$

ceea ce corespunde unei creșteri aproape liniare a crustei solidificate.

K.G. Speith și A. Bungeroth [***73] au calculat timpul de solidificare cu relația:

$$T = D^2 - 33 \times 10^{-5} \quad (2.9)$$

sau după formulele simplificate a lui Klein [***73] :

$$T = \left(\frac{D + 52}{74,5} \right)^2 - \text{pentru secțiuni rotunde;} \quad (2.10)$$

$$T = \left(\frac{D + 46}{6,6} \right)^2 \text{ - pentru secțiuni pătrate,} \quad (2.11)$$

în care: T - timpul de solidificare, [s];
D - diametrul sau latura secțiunii pătrate a semifabricatului turnat Continu, [mm].

Pentru solidificarea oțelului la turnarea continuă sunt valabile în principiu aceleași legi ca și la turnarea în lingouri, diferind însă valorile factorilor de influență (diferențele de temperatură dintre oțel și cristalizor, respectiv cristalizor și mediul ambiant sau mediul de răcire, conductibilitatea termică a cristalizorului, etc)[Park00].

Diferența esențială între turnarea în lingouri și turnarea continuă constă în faptul că în timp ce la primul procedeu materialul rămâne în lingotieră până la sfârșitul solidificării [Hep03], astfel încât condițiile sunt aceleași pentru întreaga perioadă de solidificare, la turnarea continuă, materialul după ce părăsește cristalizorul trece în zona de răcire secundară, unde constanta de solidificare se mărește datorită contactului direct cu apa de răcire, păstrându-se însă tendința de scădere a vitezei de solidificare pe baza legii parabolice. Datorită acestui fapt timpii totali de solidificare sunt mai mici cu circa 50% în cazul turnării continue decât la turnarea în lingouri, după cum rezultă din Tabelul 2.5 [***73].

Tabelul 2.5

Secțiunea transversală a semifabricatului, [mm]	Timpul de solidificare, [min]	
	Turnare în lingouri	Turnare continuă
100 x 100	6	3
160 x 160	16	7,5
280 x 280	49	23

Coefficientul de solidificare exprimă de fapt cantitatea de căldură evacuată din metalul turnat în unitatea de timp și depinde de caracteristicile instalației de turnare continuă (materialul și dimensiunile cristalizorului, debitul, viteza, presiunea apei de răcire în cristalizor și în zona de răcire secundară, viteza de turnare) și ale materialului turnat (calitatea oțelului, dimensiunile secțiunii transversale, supraîncălzirea oțelului). Factorul determinant este însă eficacitatea răcirii în cristalizor și în zona de răcire secundară.

Datorită vitezei mici de solidificare a oțelului, sub nivelul de turnare din cristalizor se formează un con de câțiva metri de metal lichid (miezul sau zona lichidă)[Cun99].

Necesitatea de a turna într-un timp relativ scurt cantități mari de oțel impune viteze ridicate de turnare, care asociate cu viteza scăzută de solidificare a oțelului conduc la adâncimi mari ale miezului lichid. Această adâncime crește pe măsura măririi secțiunii transversale a semifabricatului. La aceeași intensitate de răcire secundară, miezul lichid se mărește în cazul secțiunilor dreptunghiulare față de cele pătrate de aceeași grosime, deoarece raportul dintre suprafața răcită și volum devine mai mic.

Lungimea miezului lichid este direct proporțională cu viteza de turnare și cu timpul de solidificare (sau invers proporțională cu viteza de solidificare) și rezultă din relația simplificată [***72]:

$$l = t_s * v \quad (2.12)$$

în care: l – reprezintă lungimea miezului lichid, [m];
 t_s – timpul de solidificare completă, [min];
 v – viteza de turnare, [m/min].

Timpul de solidificare este o funcție directă a coeficientului de solidificare, care depinde de mai mulți factori. Un calcul teoretic mai precis al timpului de solidificare este foarte dificil și datorită faptului că, coeficientul de solidificare are diferite valori în diversele etape ale procesului de turnare continuă (prima perioadă după turnare, când există contact direct cu cristalizorul, după formarea interstițiului dintre metal și cristalizor, la răcirea directă prin stropire cu apă în zona de răcire secundară).

În practică se calculează timpii de solidificare pe baza diferitelor relații și se alege valoarea maximă rezultată, pentru a crește marja de siguranță la proiectarea instalației. Adâncimea miezului lichid este factorul hotărâtor pentru determinarea înălțimii, respectiv lungimii desfășurate a instalației, deoarece tăierea semifabricatului se poate efectua numai după solidificarea completă a acestuia [Ard01_2].

Din cele prezentate, se poate **concluziona** că, la turnarea continuă, o importanță mult mai mare o au problemele legate de *formarea crustei de oțel solidificat*, de *rezistența mecanică* a acesteia la solicitările la care este supusă, *condițiile de formare a zonei axiale*, *durata totală a solidificării*. De asemenea, se pun probleme legate de natura și mărimea forțelor de frecare între crusta semifabricatului turnat continuu și peretele cristalizorului, de deformările crustei de oțel și implicit, de defectele care pot apărea. Mai pot ridica probleme forma și materialele din care se confecționează cristalizatoarele, etc. [***72],[***73].

Formarea crustei de oțel și înaintarea frontului de solidificare

Pentru determinarea zonei solidificate și deci pentru a putea determina forma și dimensiunile conului de solidificare, în literatura de specialitate, [Var82],[Bra03] sunt menționate o serie de metode experimentale, dintre care se pot menționa: vărsarea părții nesolidificate a semifabricatului turnat continuu, introducerea unor indicatori radioactivi (metoda radiografică) și determinarea temperaturii în interiorul semifabricatului prin folosirea unor cuple termoelectrice [Luc79].

Astfel, *metoda radiografică* constă în introducerea în firul turnat continuu, la sfârșitul turnării, a unui izotop radioactiv de fosfor (P^{32}) sau de sulf (S^{35}), însoțită de turnarea de plumb lichid. După solidificare, din semifabricat se taie probe longitudinale și transversale, care, după lustruire, se radiografiază. Radiografiile obținute pun în evidență forma și poziția conului de solidificare, după poziția plumbului din structura semifabricatului (fig.2.8) [Ard01_1].

În ceea ce privește a treia metodă, aceasta presupune utilizarea unor cuple termoelectrice Pt-Pt-Rh, așezate pe marginea cristalizorului. Sudura cuplurilor este protejată, iar indicațiile cuplelor sunt înregistrate cu ajutorul unui aparat special, după care, în funcție de curba de variație a temperaturii în funcție de timp, se determină timpul de solidificare completă a oțelului din semifabricatul turnat continuu [Ard01_1].

Din analiza diagramelor care se obțin, (fig.2.9) [Gut77],[Her80] se poate trage concluzia că frontul de solidificare nu reprezintă o suprafață uniformă, curbă sau rectilinie, constatându-se variații într-un sens sau altul, datorate neuniformității răcirii semifabricatului în cristalizor, viteza de creștere diferită a cristalelor primare, etc.

La oțelurile inoxidabile, în special variația grosimii crustei de oțel solidificat este puternic neuniformă.

Trebuie precizat că solidificarea oțelului se realizează într-un anumit interval de temperatură (solidus – liquidus). Astfel, în semifabricatul în curs de solidificare se găsesc simultan trei zone distincte și anume: o zonă solidă, o zonă bifazică solid – lichid și o zonă de oțel lichid. Zona bifazică reprezintă un schelet de dendrite, între ramificațiile cărora se află metal cu o compoziție asemănătoare cu a oțelului lichid din interiorul conului de solidificare.

Dacă se folosește pentru măsurarea crustei de oțel solidificat (și implicit adâncimea și forma conului de solidificare) metoda cu deversarea oțelului rămas lichid, trebuie să se țină seama și de prezența zonei bifazice. Prin folosirea metodei cu izotopi radioactivi, se poate delimita numai zona bifazică de cea lichidă (indicatorul radioactiv nu pătrunde din lichid prin ramificațiile dintre dendritele formate)[Cun99].

În vederea realizării unui calcul aproximativ al înaintării frontului de solidificare, trebuie să se admită o serie de *ipoteze simplificatoare*. Cea mai importantă dintre acestea este aproximarea că temperatura la care are loc solidificarea metalului este constantă. Astfel, la analiza unei diagrame de temperaturi pentru un semifabricat turnat continuu, se poate presupune că distribuția temperaturilor în regiunea din semifabricat aflată în curs de solidificare, este liniară.

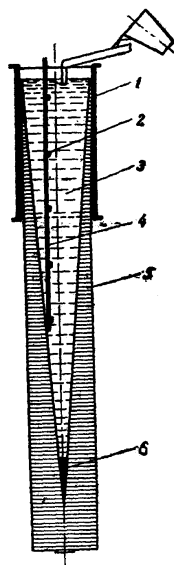


Fig.2.8 – Determinarea adâncimii și formei concavității cu metal lichid prin introducerea în semifabricat a plumbului și a izotopului radioactiv de fosfor.

1 – cristalizor; 2 – izotop de fosfor; 3 – oțel lichid; 4 – tijă de oțel; 5 – crustă solidă; 6 – plumb.

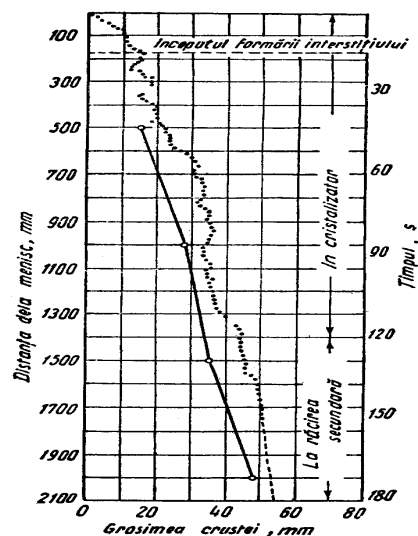


Fig.2.9 – Variația grosimii crustei pe înălțimea unui semifabricat cu secțiunea de 150 x 475 mm, turnat cu o viteză de 700 mm/min.

— pe fețele laterale;
..... pe fețele înguste

De asemenea, considerând că solidificarea are loc doar în intervalul $T_l - T_s$ (temperatura liquidus – temperatura solidus), se obțin următoarele expresii pentru lățimea zonelor solidă și bifazică, în funcție de lățimea totală a crustei: [***73].

$$x_1 = x_3 \cdot \frac{T_s - T_{sup\ rafata}}{T_1 - T_{sup\ rafata}}; \quad (2.13)$$

$$x_2 = x_3 \cdot \frac{T_1 - T_s}{T_1 - T_{sup\ rafata}}; \quad (2.14)$$

$$x_1 = x_2 \cdot \frac{T_s - T_{sup\ rafata}}{T_1 - T_s}; \quad (2.15)$$

unde: x_1 reprezintă grosimea părții complet solidificate a crustei, [mm];

x_2 – grosimea părții bifazice a crustei, [mm];

x_3 – grosimea totală a crustei, [mm];

T_1 – temperatura punctului lichidus, [°C];

T_s – temperatura punctului solidus, [°C];

$T_{suprafata}$ – temperatura suprafeței, [°C].

Se poate determina de asemenea **durata solidificării complete**, ca sumă a intervalului de timp măsurat de la începutul solidificării și până în momentul când zonele bifazice se unesc și a *timpului solidificării complete* (așa-numitul "dop" bifazic)[Ard01_1].

Diametrul sau lățimea dopului bifazic, care se formează în momentul în care cele două zone bifazice se unesc pe axa semifabricatului, se pot determina pe baza unor formule sau diagrame. Astfel, în literatura de specialitate [***72],[***73],[***01] se găsesc astfel de relații, pentru semifabricate turnate continuu de diverse secțiuni: circulară, pătrată, dreptunghiulară:

- pentru semifabricatele de secțiune circulară:

$$z_1 = \frac{v_t}{\pi \cdot \gamma \cdot k_1^2}; \quad (2.16)$$

$$z_2 = \frac{v_t}{\pi \cdot \gamma \cdot k_2^2}; \quad (2.17)$$

- pentru semifabricatele de secțiune pătrată:

$$z_1 = \frac{v_t}{4 \cdot \gamma \cdot k_1^2}; \quad (2.18)$$

$$z_2 = \frac{v_t}{4 \cdot \gamma \cdot k_2^2}; \quad (2.19)$$

- pentru semifabricatele de secțiune dreptunghiulară:

$$z_1 = \frac{v_t}{4 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot k_{11}^2} \quad (2.20)$$

$$z_2 = \frac{v_t}{4 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot k_{22}^2} \quad (2.21)$$

unde: z_1 reprezintă distanța ocupată de zona lichidă, [m];
 z_2 – distanța ocupată de zona bifazică, [m];
 v_t - viteza de turnare, [m/min];
 β – raportul dintre latura mare și latura mică a dreptunghiului;
 k_1, k_{11} – coeficienții pentru determinarea momentului când zonele bifazice se unesc;
 k_2, k_{22} – coeficienții pentru determinarea momentului solidificării complete.

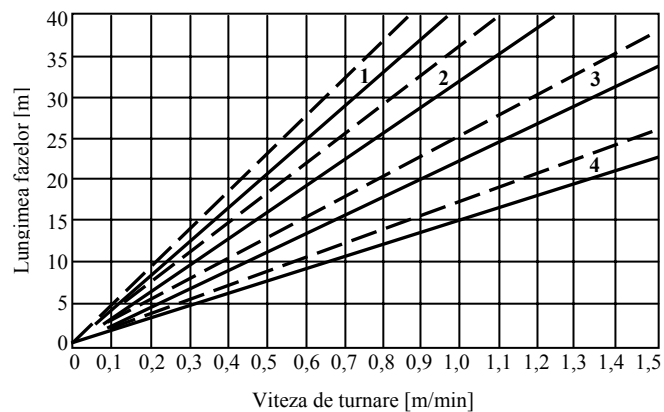


Fig.2.10 – Mărimea zonelor lichidă și bifazică în funcție de viteza de turnare
 1 - semifabricat cu secțiune circulară ; 2- semifabricat cu secțiune dreptunghiulară, la $\beta = 2$; 3 - semifabricat cu secțiune dreptunghiulară, la $\beta = 3$

În fig. 2.10 sunt delimitate atât mărimile pentru zonele lichide cât și pentru zonele bifazice în funcție de viteza de turnare, pentru cele trei tipuri de secțiune ale semifabricatelor turnate continuu. Diferența dintre lungimile acestor zone reprezintă lungimea dopului bifazic [Gut77],[Ard01_1].

Rezistența mecanică a crustei de oțel formată în cristalizor

Rezistența mecanică a crustei nou formate precum și mărimea forțelor de frecare între peretele interior al cristalizorului și crustă, reprezintă factorii determinanți în alegerea condițiilor care asigură formarea crustei.

Pentru determinarea crustei, în literatura de specialitate [Gut77],[Bra03] sunt prezentate o serie de metode, în urma cărora se arată că rezistența crustei abia formate depinde în mare măsură de diferența de temperatură pe grosimea ei. Creșterea acestei diferențe, respectiv micșorarea temperaturii suprafeței semifabricatului are influență atât asupra mării rezistenței părții complet solidificate a crustei, cât și asupra modificării raportului dintre lățimea zonei bifazice

și lățimea totală a crustei. Astfel, este normal să se mărească la maxim intensitatea de răcire a semifabricatului din perioada în care acesta alunecă de-a lungul pereților cristalizorului.

Alunecarea sau frânarea și ruperea crustei depind de raportul dintre valorile forțelor de frecare F_f și valorile forțelor care rup crusta F_r . Alunecarea este posibilă în cazul în care $F_f < F_r$. Dacă însă $F_f > F_r$, crusta nou formată se va rupe.

Considerând pentru F_f și F_r expresiile [Gut77] :

$$F_f = \mu N S_{fr} \cos a, [N] \quad (2.22)$$

$$F_r = R_m S_{cr}, [N] \quad (2.23)$$

unde: μ reprezintă coeficientul de frecare;
 N – presiunea specifică, $[N/m^2]$, ;
 a – unghiul format de crustă cu peretele cristalizorului;
 R_m – rezistența la rupere la tracțiune a crustei, $[daN/cm^2]$;
 S_{fr} – suprafața de alunecare (de frecare), $[m^2]$;
 S_{cr} – secțiunea crustei la locul ruperii, $[m^2]$.

Înlocuind expresiile celor două forțe în condiția de rupere a crustei nou formate a semifabricatului turnat continuu, se obține pentru coeficientul de frecare expresia:

$$f \geq \frac{R_m \cdot S_{cr}}{N \cdot S_{fr} \cdot \cos a} \quad (2.24)$$

Din analiza acestei inegalități, și prin înlocuirea valorilor pentru mărimile prezente, rezultă o valoare foarte mare pentru coeficientul de frecare (valoare aproximativ egală cu 10). Această valoare poate fi explicată prin faptul că, în timpul mișcării de alunecare a crustei pe pereții cristalizorului, acționează asupra ei forțe de aderență, observându-se lipirea crustei prin puncte de pereții cristalizorului. În vederea micșorării acestor forțe de aderență, s-a încercat găsirea unor soluții prin care să nu aibă loc lipirea crustei la pereții cristalizorului.

În acest scop, inițial s-au utilizat diferite unsori aplicate pe peretele interior al cristalizorului, cum ar fi: grafit, gudron îmbunătățit cu ulei de ricin și grafit, etc. [***00], [Hep01],[Zir02].

Cercetările în vederea găsirii unor prafuri sau a unor substanțe unguente au evoluat mult în ultimii ani, fiecare firmă metalurgică preocupându-se pentru găsirea unui compus care, pe lângă micșorarea frecării dintre semifabricat și cristalizor, și deci obținerea unui coeficient de frecare cât mai mic, trebuie să împiedice aderența crustei la pereții cristalizorului, prin formarea unei pelicule fine între semifabricat și cristalizor [Luc79],[Hep01]. Trebuie însă avut în vedere faptul că, în timpul alunecării crustei, acest compus nu trebuie să se descompună sau să ducă la formarea unor reziduuri care să mărească coeficientul de frecare.

Formarea zonei axiale a semifabricatului

Intensitatea și durata răcirii secundare depind de viteza de turnare și pot fi determinate pentru fiecare dimensiune concretă a semifabricatului, în funcție de viteza de extragere a acestuia, de distanța până la zona de răcire secundară și de gradientul de temperatură prescris (de exemplu, pentru o secțiune de 240 x 240 mm, extrasă cu o viteză de cca. 1 m/min, zona de răcire secundară trebuie să aibă

o lungime de minim 1 m) [***86].

Alegerea exactă a regimului răcirii secundare are o importanță deosebită, deoarece în cazul răcirii secundare incorecte, pot apare în semifabricat o serie de defecte.

Practica a arătat că dacă se creează o răcire secundară foarte intensă, fețele semifabricatului devin concave, iar dacă răcirea secundară este insuficientă, acestea se bombează. De asemenea, nu se poate trece peste faptul că abaterea formei semifabricatului de la cea prescrisă, duce la provocarea de rupturi pe suprafața deformată a crustei. Dacă curbura fețelor este foarte mică, în funcție de compoziția chimică a oțelului solidificat și de distanța rupturii de la suprafața semifabricatului, aceste rupturi se pot prezenta sub forma unor porțiuni filiforme subțiri, cu sensibilitate mărită la atacul chimic; dacă curbarea fețelor este foarte mare, rupturile pot avea aspectul unor fisuri de lățime și lungime variabilă. Poziția acestor rupturi depinde de sensul în care se curbează crusta și de momentul în care se produce curbarea [Var82].

Dacă curbarea crustei se produce sub acțiunea unei răcirii de scurtă durată, însă prea intensă, imediat după ieșirea din cristalizor, atunci sensul ei va fi spre interior, iar rupturile vor fi situate nu prea departe de suprafața exterioară a semifabricatului. Lungimea fiecărei rupturi va depinde de durata acestei răcirii intense. La o asemenea deformare, rupturile vor fi dispuse în evantai și fiecare dintre ele are direcție perpendiculară pe fața deformată. Dacă însă asemenea fisuri pot lua naștere în urma unei bombări a semifabricatului din cauza răcirii insuficiente a suprafeței acestuia, atunci fisurile sunt situate în apropierea colțurilor.

În concluzie, răcirea secundară poate constitui o cauză importantă de defecte ale semifabricatului turnat continuu, impunându-se o alegere corectă a regimului de răcire secundară.

La alegerea regimurilor de răcire secundară, trebuie procedat astfel încât gradientul de temperatură în crustă să nu provoace curbarea acesteia. Această condiție este îndeplinită dacă gradientul de temperatură din crustă nu va depăși valoarea [***72],[Ard01_1]:

$$\Delta t = k \frac{T_l - T_s}{x} \cong 100^\circ\text{C} \quad (2.25)$$

în care: k reprezintă coeficient; $k = 1, 2$
 x – grosimea crustei solidificate, [mm];
 T_l, T_s – temperatura oțelului lichid, respectiv a crustei solidificate [°C].

Mărirea zonei de solidificare a semifabricatelor turnate continuu influențează condițiile de formare specifice zonei axiale a acestora. Spre deosebire de lingourile clasice de oțel, la semifabricatele turnate continuu conicitatea naturală, respectiv unghiul sub care se întâlnesc fronturile de solidificare care înaintază din părțile opuse ale semifabricatului, este foarte mică. În aceste condiții, este îngreunată alimentarea porțiunilor axiale ale semifabricatului și crește considerabil viteza de deplasare a metalului lichid în raport cu limitele zonelor bifazice pe cale de a ajunge în contact. Mărirea vitezei de turnare a semifabricatelor turnate continuu, indiferent de forma secțiunii lor, duce de asemenea la creșterea vitezei de deplasare a metalului lichid de-a lungul axei semifabricatului și la micșorarea conicității naturale.

Toate acestea conduc la o neomogenitate axială a semifabricatului, care deși în general nu variază în afara limitelor admise și nu constituie o cauză de rebutare a oțelului turnat continuu, acest fapt trebuie luat în considerare la stabilirea

regimurilor de turnare continuă.

În literatura de specialitate [Ior99], pe baza unor experimentări mai speciale, s-a ajuns la concluzia că vitezele optime de turnare, atât pentru semifabricatele de secțiune pătrată cât și pentru cele de secțiune dreptunghiulară, sunt cele apropiate de valoarea 1 m/min.

2.3. Probleme ale identificării procesului de transfer termic și solidificare a crustei la turnarea continuă

Procesul de turnare continuă este unul deosebit de complex, existând un număr important de parametri care influențează decisiv calitatea produsului. Deși există observații, în deosebi practice asupra acestor influențe, o analiză mai exactă poate fi făcută numai prin modelare, în vederea stabilirii unor parametri optimi ai procesului și respectiv analizei unor situații care trebuie luate în considerare pentru conducerea procesului.

Transferul termic în cristalizor, așa cum s-a menționat deja, este important pentru creșterea grosimii crustei și a calității oțelului. Există diferite probleme legate de transferul termic care apare la turnarea continuă, în special în zona răcirii primare. *Una dintre principalele probleme este legată de apariția fisurilor și perforarea semifabricatelor.* Ruperea apare când jetul de oțel lichid străpunge crusta solidă. Oțelul solid curge afară din cristalizor, iar procesul de turnare continuă trebuie întrerupt. Printr-o modelare corespunzătoare a procesului de solidificare se pot determina condițiile care duc la aceste ruperi.

În cazul modelelor matematice prezentate în [Her94], [Naj90] s-a emis ipoteza că, crusta poate fi neglijată, fără a se analiza consecințele. Aceste modele nu sunt satisfăcătoare, deoarece nu dau informații despre un parametru esențial, și anume, viteza de solidificare.

În [Ard04],[Pop10] s-a modelat fenomenul de solidificare a semifabricatelor turnate continuu folosind programul Turncon, pentru un semifabricat cu secțiunea de 240x270 mm, și un număr mic de puncte de discretizare, atât în fir, cât și în cristalizor. Datorită numărului mic de puncte de discretizare nu s-a obținut însă un model foarte precis.

În lucrarea [Cun02] s-a realizat o modelare a transferului termic și implicit a solidificării oțelului utilizând pachetul de programe CFX și metoda diferențelor finite, cu verificarea calculelor pentru câteva cazuri practice. Efectele dimensiunii rețelei modelului de turbulență și a condițiilor limită asupra soluției transferului termic în cristalizor au fost comparate folosind un debit de fluid turbulent combinat cu un model de transfer termic. De asemenea, au fost comparate modele care implementează trei strategii diferite pentru studierea solidificării crustei oțelului în scopul determinării efectului crustei asupra debitului. A fost efectuat un studiu parametric pe un model multifazic al fluidului și a gazului din fir. Modelul astfel obținut a demonstrat o precizie mai bună decât cele uzuale. De asemenea, el ține cont mult mai bine de situațiile reale din timpul turnării, care până în prezent erau greu de luat în considerare. Din păcate, acest program nu dă indicații asupra fenomenelor legate de formarea crustei și a situațiilor care conduc la fisurarea acesteia.

2.4. Probleme ale conducerii proceselor de turnare continuă a oțelului

2.4.1 Conducerea instalațiilor de turnare continuă

Volumul de oțel produs este, în ziua de azi, greu de crescut, motiv pentru care producătorii de oțel trebuie să se concentreze asupra eficientizării procesului de producție, utilizând o tehnologii perfecționate. Modernizarea instalațiilor de producere a oțelului trebuie să conducă la obținerea următoarelor deziderate:

- o înaltă flexibilitate, corelată cu cantitatea, calitatea și dimensiunile produselor obținute;
- o înaltă productivitate și reducerea costului de producție prin mărirea ratei de scoatere.

Aceste condiții pot fi îndeplinite doar prin utilizarea unor tehnologii moderne adecvate, care urmăresc cuplarea diferitelor faze individuale în scopul obținerii unui proces de producție optim. În acest sens, a devenit indispensabilă automatizarea întregului proces de producție a oțelului, fiind preferată o dispunere ierarhică a echipamentului de conducere folosit .

O structură ierarhică a sistemului de conducere a procesului de turnare continuă este prezentată în figura 2.12 [Tir9_3],[Sie97],[Cun02].

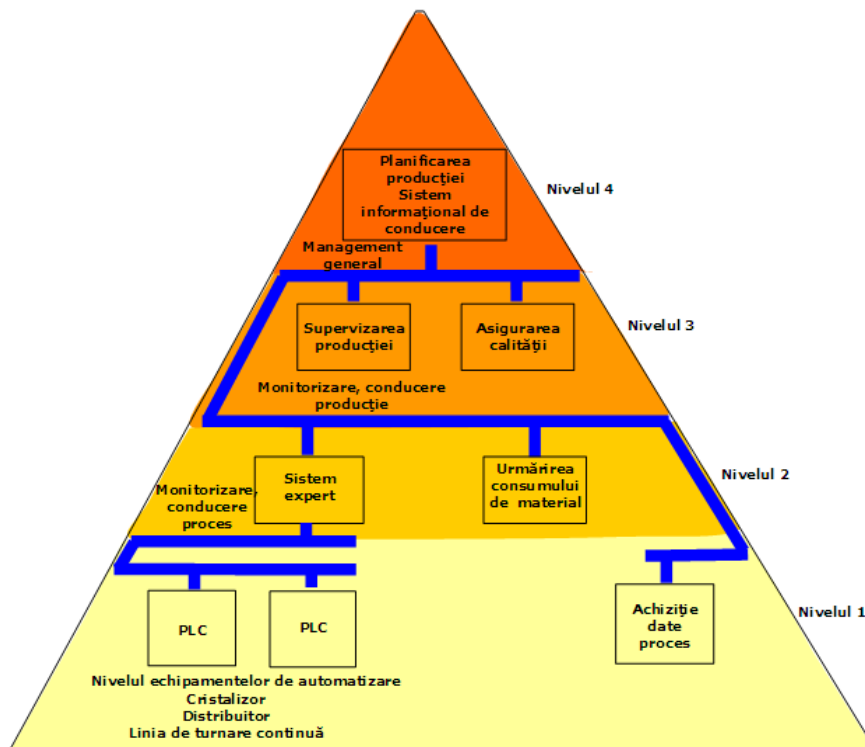


Fig. 2.12 Organizarea ierarhică a sistemului de conducere automată a procesului de producție la instalațiile de turnare continuă a oțelului

Nivelul 1 reprezintă nivelul automatizării de bază și este conectat direct cu unitățile și instalațiile liniei de turnare continuă. La acest nivel se realizează controlul mărimilor esențiale ale procesului (viteză de turnare, debite apă răcire primară și secundară, nivelul oțelului în cristalizor, mecanisme auxiliare).

Mărimile prescrise pentru debitul apei de răcire secundară și pentru nivelul de oțel din distribuitor sunt elaborate de sistemul expert aflat la nivelul 2. În general nivelul 1 este dotat cu automate programabile [Sie97],[God00]. Automatele programabile posedă bucle de reglare PID. Nivelul 3 monitorizează și controlează întregul proces de producție. În vârful piramidei se află nivelul 4, care este nivelul de management general al producției (conducere și planificare).

Prin automatizarea unei instalații de turnare continuă a oțelului se urmărește creșterea calității produselor, obținerea semifabricatelor la dimensiunile dorite, cu un consum minim de energie, protecția echipamentelor și utilizarea rațională a personalului.

Tendința actuală în elaborarea sistemului de conducere a instalațiilor de turnare continuă a oțelului este aceea de a crește ponderea sistemelor distribuite de conducere, urmărindu-se totodată realizarea unui compromis optim între tendințele de centralizare și distribuire a structurilor și funcțiilor de conducere.

Prin automatizarea complexă a instalațiilor de turnare continuă a oțelului se asigură obținerea unor *avantaje importante*, dintre care pot fi menționate următoarele:

- obținerea unei mai bune calități a produselor prin controlul răcirii, corelând în mod continuu viteza de turnare cu creșterea crustei;
- creșterea calității și reducerea cantității de produse rebut prin modernizarea și evaluarea continuă a tuturor parametrilor pe parcursul turnării, în scopul asigurării unui sistem de tăiere eficient, pentru eliminarea produselor defecte, cu cheltuieli minime;
- rezolvarea eficientă a unor situații contradictorii pe parcursul turnării, prin alegerea situațiilor mai puțin defavorabile;
- calculul parametrilor de proces, după un algoritm bine stabilit și modificarea lor în timp util, în funcție de cerințele actuale;
- calculul automat al lungimii de tăiere a firului în funcție de dimensiunile produselor cerute;
- asigurarea unui control eficient și uniform al produsului de turnare prin comunicarea continuă a sistemului de conducere cu secția de elaborare a oțelului.

2.4.2 Structura sistemului de conducere a procesului de turnare continuă de la A.M.-HD

Conducerea clasică a procesului de turnare continuă și-a dovedit în timp limitele, în ultimii ani impunându-se tot mai mult soluția conducerii procesului de turnare continuă de către un sistem expert.

Printre motivele care au condus la această decizie, se menționează [Ang01_2]:

- complexitatea procesului și imposibilitatea realizării unui model matematic, utilizabil în timp real;
- existența unei bogate experiențe practice în exploatarea acestui tip de proces, utilizabilă prin însăși principiul de funcționare al unui sistem expert;

- posibila analiză a influenței diversilor factori asupra calității produsului turnat și a performanțelor procesului, prin modelare matematică off-line a acestuia;
- flexibilitatea și posibila modificare a strategiei de conducere, cu cheltuieli minime, pe baza evoluției în timp a performanțelor procesului;
- existența posibilității de a ține cont de o serie de factori secundari, nemodelabili, asupra calității oțelului turnat (ex: apariția și predicția fisurilor longitudinale și transversale, a incluziunilor etc.), cu mare importanță economică.

La turnarea semifabricatelor cu secțiuni mici, trebuie să existe o corelație exactă între viteza de tragere și nivelul de oțel din cristalizor [Cun01]. Nerespectarea acestui deziderat conduce la neuniformitatea secțiunii transversale a produsului turnat, deci la rebut. Vechile sisteme de control, bazate pe algoritmi PID, nu dau satisfacția dorită în practică, deoarece nu țin cont de multitudinea de mărimi care intervin în procesul de reglare, unele cu variație aleatoare [Cun02].

Pentru implementarea sistemului expert, se formează o bază de cunoștințe specifice, introduse de expertul uman. Ele se materializează sub forma unor seturi de reguli, care constituie raționamentul pe baza căruia acționează sistemul, analizând valorile reale ale variabilelor. Pe baza experienței expertului uman, sistemul elaborează valorile prescrise pentru buclele clasice de reglare a mărimilor urmărite, utilizând mecanisme de inferență adecvate.

Structura sistemului de conducere prevăzut cu sistem expert, implementat la A.M.- HD este prezentată în figura 2.15.[Ang01_1],[Ang01_2],[Cun02].

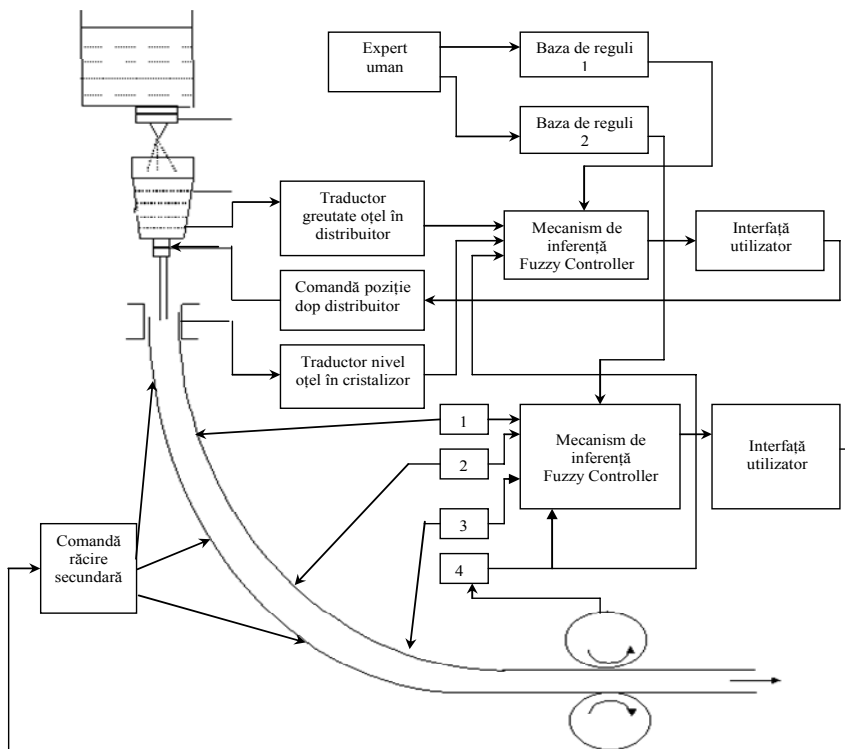


Fig. 2.15 Structura sistemului de conducere de la A.M.- HD

În acest caz, mărimile importante pentru proces au fost considerate următoarele:

a) reglarea debitului apei pentru răcirea secundară;

Variabile de intrare:

- viteza de tragere;
- temperatură material zona 1;
- temperatură material zona 2;
- temperatură material zona 3.

Variabile de ieșire:

- debit apă răcire zona 1;
- debit apă răcire zona 2;
- debit apă răcire zona 3;

b) reglarea nivelului de oțel în cristalizor:

Variabile de intrare:

- viteza de tragere;
- nivel real oțel în cristalizor;
- greutatea oțelului în distribuitor.

Variabilă de ieșire:

- poziția dopului de evacuare din distribuitor.

Analizând din punct de vedere tehnologic mărimile care au fost luate în considerare, un expert poate stabili, prin seturile de reguli elaborate, valori adecvate pentru mecanismele de execuție.

2.4.3 Detecția și eliminarea fisurilor în semifabricat la turnarea continuă

În literatura de specialitate există numeroase referințe privind detecția și eliminarea fisurilor. În general ele au un caracter teoretic și nu sunt implementate în conducerea reală a unui proces de turnare continuă.

Astfel, în [Ada99] se propune structura unui sistem bazat pe logica fuzzy pentru detecția fisurilor. Sistemul nu folosește un model matematic care să analizeze fenomenul de solidificare și apelează numai la o bază de reguli stabilită de tehnologi. Nu există date referitoare la testarea și aplicarea practică a metodei propuse.

În [Bha05] se propune un sistem fuzzy care analizează în timp real semnalele primite de la un sistem de diagnosticare a fisurilor și comandă modificarea vitezei de turnare, sistemul este însă nesigur și dă multe alarme false.

În [Yaj85],[Ino92] se propune un ansamblu de termocuple pentru determinarea variației temperaturii semifabricatului. Soluția autorilor este realistă și a stat la baza principiului de detecție folosit în cadrul prezentei teze.

În [Hor98], [Kom91] se propune structura unui sistem de detecție a fisurilor bazat pe o rețea neuronală, ca și în cazurile precedente sunt prezentate puține date privind eventualele experimentări sau testări industriale.

În [Mat88], [Kum99] se prezintă o metodă de implementare a unei structuri de detecție a fisurilor în cristalizor la o instalație complexă de turnare continuă. Informațiile referitoare la partea de eliminare a fisurilor sunt succinte și nu constituie o noutate în domeniu.

În [Nak96] se propune o rețea neuronală de detecție a fisurilor, dar nu se precizează clar structura rețelei, modul în care se face detecția și în plus, referirile la măsurile care trebuiesc luate sunt practic inexistente.

O analiză a fenomenului de transfer termic este făcută în [Bou02], în care se propune și un sistem neuronal pentru detecția fisurilor bazat pe semnalele primite de la niște senzori de temperatură. În această lucrare sunt date și câteva rezultate experimentale, dar se poate aprecia că, sistemul propus nu oferă suficientă precizie și siguranță în funcționare.

Lucrarea [Duk09] propune un controller fuzzy pentru modificarea vitezei de turnare în cazul apariției unei fisuri, dar nu se precizează care sunt valorile cu care se face această modificare și nici modul în care se efectuează. De asemenea, mijloacele sau metodele prin care se face detecția fisurilor sunt evazive.

În niciuna dintre referințele bibliografice studiate nu se face o predicție a apariției fisurilor. Modalitatea de detecție a fisurilor prin variația temperaturii la nivelul cristalizorului prezentată în unele articole este în principiu corectă. Această modalitate de detecție a fost utilizată și în cadrul lucrării de față, dar eficiența detecției depinde de modul în care această informație este folosită. De exemplu, modificarea numai a vitezei de turnare (cum există la ora actuală în literatura de specialitate studiată), în cazul apariției unei fisuri conduce la pierderi de productivitate și în plus nu asigură eliminarea tuturor fisurilor apărute (dacă acestea apar în partea de jos a cristalizorului).

În prezenta teză s-a considerat ca prima măsură necesară a fi luată trebuie să fie modificarea regimului de răcire a semifabricatului prin variația debitului apei de răcire primară și numai după aceea modificarea vitezei de turnare. Datorită acestui principiu nou și a principiului de predicție a fisurilor, precum și a altor îmbunătățiri propuse de autor structura dispozitivului de decizie a devenit mai complexă, dar cu rezultate mult îmbunătățite față de cele menționate în literatura de specialitate.

2.5. Concluzii

Din cele prezentate, rezultă o serie de concluzii dintre care se pot sintetiza:

- Turnarea continuă este un proces tehnologic complex indispensabil metalurgiei viitorului.
- Principalele direcții ale dezvoltării tehnologice determinate nemijlocit de exigențele de competitivitate ale producătorilor sunt legate de creșterea productivității utilajului de turnare și aducerea cât mai aproape a dimensiunii semifabricatelor turnate continuu de dimensiunea produsului finit (în condiții de menținere sau creștere calitativă).
- Automatizarea procesului este determinantă pentru performanțele obținute, dar sunt necesare metode avansate de modelare și conducere.

- Sistemul de conducere prezentat este unul ierarhizat, fiind puse în evidență fluxurile informaționale existente.
- Sistemul de conducere este bazat pe:
 - automate programabile pentru controlul secvențelor și interblocărilor tehnologice și care conțin bucle PID;
 - sisteme expert care elaborează valorile prescrise pentru buclele clasice de reglare a nivelului de oțel din distribuitor și a debitului apei de răcire secundară, utilizând mecanisme de inferență adecvate;
 - un sistem de calcul cu rol de supervizare, comunicare cu operatorul uman și gestiune a procesului.
- Modelele matematice prezente în literatură au caracter general și nu analizează în profunzime fenomenul de solidificare și de formare a crustei, care este determinant la apariția fisurilor.
- În general, structurile de conducere existente în practică și descrise în prezentul capitol, asigură funcționarea corectă a instalației de turnare continuă. Până la ora actuală nu sunt prevăzute însă, măsuri eficiente pentru detecția și eliminarea fisurilor din semifabricat (se comandă modificarea unui singur parametru și anume viteza de turnare) și în plus nu sunt prevăzute nici un fel de măsuri pentru predicția acestora, ceea ce conduce la rebuturi și implicit la pierderi economice importante.

Având în vedere cele anterior analizate, în prezenta teză se consideră că prima măsură necesară a fi luată trebuie să fie modificarea regimului de răcire a semifabricatului prin variația debitului apei de răcire primară și apoi se apelează la modificarea vitezei de turnare, în plus se adoptă și un principiu predictiv de apariție a fisurilor în semifabricat.

Scopul cercetărilor personale, prezentate în capitolele următoare, este tocmai de a concepe, dezvolta și implementa un nou sistem (neuronat și fuzzy), care grefat pe structura clasică de conducere a turnării continue, să permită predicția, detecția și eliminarea fisurilor.

3. IDENTIFICAREA ANALITICĂ, SIMULAREA ȘI ANALIZA PROCESULUI DE SOLIDIFICARE A OȚELULUI ÎN CRISTALIZOR

3.1. Preliminarii

Pentru a putea face o analiză asupra fenomenelor care conduc la apariția fisurilor în procesul de turnare continuă este necesară studierea schimbului de căldură și a solidificării oțelului în cristalizor [Tir11_1]. Metodele uzuale, care presupun o repartizare liniară a temperaturii în crusta solidă, conduc la erori importante [Ivă83],[Tho97]. De asemenea, câmpul de temperatură în crusta solidă depinde de viteza de turnare, profilul semifabricatului și construcția cristalizorului. Rezolvarea ecuației diferențiale a conductibilității termice. pentru cazul real, când temperatura suprafeței semifabricatului variază în timp, este posibilă numai cu aproximații grosiere, care deformează rezultatele [Pin06_1],[Pin06_2].

Din motivele prezentate, în capitolul de față se propune o modelare a fenomenului de solidificare a oțelului în cristalizor, bazată pe metoda diferențelor finite [Fau07]. În vederea validării modelului, a fost conceput un program (în limbaj C++) de simulare, prin rularea căruia au fost obținute rezultate comparabile cu cele prezentate în literatura de specialitate [Tir10_5].

Se menționează faptul că metoda de modelare și simulare propusă permite o analiză suficient de precisă a fenomenului de formare a crustei de solidificare și deci de formare a eventualelor fisuri. Deși ea nu poate fi folosită decât în regim off-line, se obțin astfel informații esențiale necesare conceperii sistemului neuronal de detecție a fisurilor, precum și a întocmirii bazelor de reguli ale sistemului de decizie fuzzy în vederea stabilirii ponderii corecției debitului de apă pentru răcirea primară și a vitezei de turnare [Tir10_5].

3.2. Identificarea analitică a procesului de solidificare a semifabricatelor turnate continuu

Modelarea matematică a fenomenului de solidificare și răcire a semifabricatelor turnate continuu, se bazează pe reprezentarea matematică a acestui fenomen [O'co94],[Pop10]. Soluția acestei probleme rezidă în fapt din soluționarea ecuației transmișiei căldurii în regim nestaționar [Jan04].

Pentru a defini transmiterea de căldură între semifabricat și cristalizor este necesară cunoașterea condițiilor inițiale, legea de variație a fluxului de căldură semifabricat-cristalizor, a fluxului de căldură cristalizor-apa de răcire. Unele condiții se pot ușor schematiza, altele însă conduc la sisteme de ecuații a căror soluționare pe cale analitică ridică probleme deosebite [Tho99],[Kie00], motiv pentru care se preferă folosirea metodelor aproximative de rezolvare: metoda diferențelor finite [Fau07],[Mor94] și metoda elementelor finite [Pin09],[Pin10].

3.2.1 Modelarea prin metoda diferențelor finite

Procedura abordată constă în transformarea ecuației diferențiale a transmiterii căldurii în ecuații cu diferențe finite.

Ecuația diferențială a transmiterii căldurii după cele trei axe are forma [Rec04], [Efi86], [Wil92]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (3.1)$$

unde:

- t este temperatura [$^{\circ}\text{C}$] (sau [K], nu are importanță)
- τ - timpul [s]
- a - difuzivitatea termică [m^2/s]
- x, y, z - coordonate spațiale

Dacă se neglijează transmiterea de căldură pe axa z (adică $\frac{\partial}{\partial z} \equiv 0$) relația devine [Mat74], [Wei99], [Liu08], :

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) \quad (3.2)$$

unde:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (3.3)$$

densitatea ρ fiind aproximată constantă, iar conductivitatea termică λ și căldura specifică masică c , funcții de temperatură.

Se alege arbitrar o temperatură de referință t_0 la care conductivitatea termică este λ_0 și se introduce noțiunea de *temperatură redusă* [Tir_05]:

$$\Phi = \int_{t_0}^t \frac{\lambda}{\lambda_0} dt \quad (3.4)$$

de unde

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad (3.5)$$

Se calculează:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{d\Phi}{dt} \frac{\partial t}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \frac{\partial t}{\partial x} \right) = \frac{\lambda}{\lambda_0} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (3.6)$$

unde, s-a ținut cont că λ este funcție doar de temperatură, iar derivata parțială în raport cu x este zero.

Rezultă că:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (3.7)$$

procedând identic pe axa y:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad (3.8)$$

Introducând (3.8), (3.7) și (3.3) în (3.2) rezultă:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \frac{\lambda_0}{\lambda} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot c} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \quad (3.9)$$

Căldura specifică este conform definiției [Fau_07]:

$$c = \frac{\partial H}{\partial t}, \text{ de unde } c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial H}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial H}{\partial \tau} \quad (3.10)$$

Din (3.9) și (3.10) rezultă în final:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\lambda_0}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \quad (3.11)$$

unde λ_0 și ρ sunt constante.

Pentru a transforma relația (3.11) într-o ecuație cu diferențe finite se exprimă temperatura unui punct (i, j) în funcție de temperatura punctelor vecine [Fau07].

Se consideră pentru început cazul din figura 3.1, adică un punct din interior și 4 puncte învecinate **[Tir11_1]**. Valorile i-1, i, i+1 se referă la axa X; j-1, j, j+1 la axa Y, iar k și k+1 la succesiunea în timp.

Dacă se dezvoltă funcția $\phi = f(x, y)$ în serie Taylor [Fau07], [Wil92] față de axa „x” și se neglijează termenii superiori, începând cu ordinul trei, se obține:

$$\phi_{i-1, j, k} = \phi_{i, j, k} - \frac{x_1}{1!} \cdot \frac{\partial \phi_{i, j, k}}{\partial x} + \frac{x_1^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \phi_{i, j, k}}{\partial x^2} \quad (3.12)$$

și

$$\phi_{i+1, j, k} = \phi_{i, j, k} + \frac{x_2}{1!} \cdot \frac{\partial \phi_{i, j, k}}{\partial x} + \frac{x_2^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \phi_{i, j, k}}{\partial x^2} \quad (3.13)$$

de unde rezultă:

$$x_2\phi_{i-1,j,k} + x_1\phi_{i+1,j,k} = (x_1 + x_2)\phi_{i,j,k} + \frac{x_2x_1^2 + x_1x_2^2}{2} \cdot \frac{\partial^2\phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial^2\phi_{i,j,k}}{\partial x^2} = \frac{2}{x_1x_2(x_1 + x_2)} \cdot [x_2\phi_{i-1,j,k} + x_1\phi_{i+1,j,k} - (x_1 + x_2)\phi_{i,j,k}] \quad (3.15)$$

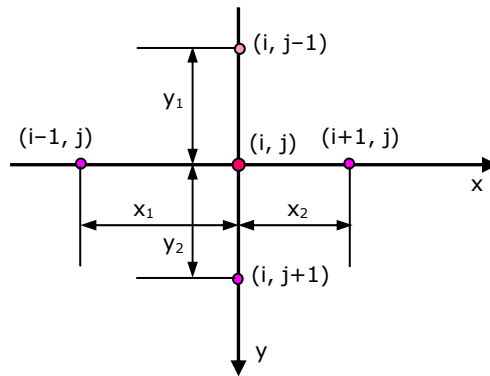


Fig. 3.1 – Nod în interiorul semifabricatului

Pentru axa „y” se procedează identic și se obține:

$$\frac{\partial^2\phi_{i,j,k}}{\partial y^2} = \frac{2}{y_1y_2(y_1 + y_2)} \cdot [y_2\phi_{i,j-1,k} + y_1\phi_{i,j+1,k} - (y_1 + y_2)\phi_{i,j,k}] \quad (3.16)$$

Variația de entalpie se exprimă sub formă de diferență finită:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} \cong \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} \quad (3.17)$$

Dacă se introduc relațiile (3.15), (3.16) și (3.17) în (3.11) se obține:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot x_1x_2(x_1 + x_2)} \cdot [x_2\phi_{i-1,j,k} + x_1\phi_{i+1,j,k} - (x_1 + x_2)\phi_{i,j,k}] + \\ &+ \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot y_1y_2(y_1 + y_2)} \cdot [y_2\phi_{i,j-1,k} + y_1\phi_{i,j+1,k} - (y_1 + y_2)\phi_{i,j,k}] \end{aligned} \quad (3.18)$$

În cazul în care distribuția punctelor de discretizare este omogenă de-a lungul celor două axe (caz frecvent utilizat) **[Tir10_3]**, **[Tir10_5]**, **[Ana03]** și notând $x_1 = x_2 = x$, $y_1 = y_2 = y$ se obține:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] +$$

$$+ \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}]$$

(3.19)

Ecuția cu diferențe finite face posibilă determinarea variației de entalpie într-un interval de timp $\tau_{k+1} - \tau_k$, în funcție de temperatura punctelor vecine [Rec04],[Coo98]. Dacă se cunoaște distribuția inițială de temperaturi $\Phi_{i,j,0}$ (sau entalpii $H_{i,j,0}$) se poate determina pe baza relației (3.18), sau (3.19) distribuția de temperaturi după un interval dat, rezultând $\Phi_{i,j,1}$. Pe baza acestui rezultat se poate determina în continuare distribuția de temperaturi $\Phi_{i,j,2}$ s.a.m.d.

Deci, printr-o metodă iterativă se poate determina evoluția distribuției de temperaturi **[Tir10_3]** în cursul răcirii, solidificării sau încălzirii semifabricatului.

Ecuția (3.18) este valabilă pentru un punct din interior. Pentru un punct situat pe o suprafață limită, ecuația (3.18) se modifică. Pentru punctele de pe suprafața de separație se scrie ecuația fluxului de căldură la suprafață:

$$W = -\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} \quad (3.20)$$

unde: $\Phi_{i,j,k}$ este temperatura la suprafață (limita considerată paralelă cu axa Y).

Expresia $\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x}$ se poate scrie sub formă de diferență finită în funcție de o temperatură $\Phi_{i+1,j,k}$ a unui punct imaginar situat la distanța $x = x_1$ (pentru simplificare) de suprafață.

Fluxul de căldură prin suprafață este:

$$W = \frac{\lambda_0}{2x} \cdot (\Phi_{i-1,j,k} - \Phi_{i+1,j,k}) \quad (3.21)$$

de unde:

$$\Phi_{i+1,j,k} = \Phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} \cdot W \quad (3.22)$$

Relația (3.15) devine:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} = \frac{2}{x^2} \cdot \left[\Phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] \quad (3.23)$$

iar (3.18):

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{2\lambda_0}{\rho x^2} \cdot \left[\Phi_{i-1,j,k} - \frac{x}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] +$$

$$\frac{2\lambda_0}{\rho \cdot y_1 y_2 (y_1 + y_2)} \cdot [y_2 \Phi_{i,j-1,k} + y_1 \Phi_{i,j+1,k} - (y_1 + y_2) \Phi_{i,j,k}] \quad (3.24)$$

Pentru o suprafață paralelă cu axa X se obține (în mod identic):

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot x_1 x_2 (x_1 + x_2)} \cdot [x_2 \phi_{i-1,j,k} + x_1 \phi_{i+1,j,k} - (x_1 + x_2) \phi_{i,j,k}] + \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[\phi_{i,j-1,k} - \frac{y}{\lambda_0} W - \phi_{i,j,k} \right] \quad (3.25)$$

Pentru un punct de colț rezultă relația:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{2\lambda_0}{\rho x^2} \cdot \left[\phi_{i-1,j,k} - \frac{x}{\lambda_0} W - \phi_{i,j,k} \right] + \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[\phi_{i,j-1,k} - \frac{y}{\lambda_0} W - \phi_{i,j,k} \right] \quad (3.26)$$

3.2.2 Analiza stabilității soluției ecuațiilor cu diferențe finite

Una din problemele critice ale aplicării prin iterație a ecuației cu diferențe finite este asigurarea stabilității și acurateței soluției în cursul integrării [Rec04],[Mor94]. Pentru a asigura stabilitatea soluției, adică pentru a împiedica oscilația soluției în cursul integrării, intervalul de timp între iterații și dimensiunile rețelei trebuie ales în conformitate cu criteriile de stabilitate alese. Acuratețea soluției depinde de forma ecuației cu diferențe finite și de desimea rețelei.

Se poate afirma deci că desimea rețelei se stabilește pornind de la necesitatea găsirii unei rezolvări a următoarei contradicții: pe de o parte folosirea unei rețele mai dese mărește precizia modelului (eroarea introdusă prin ipoteza că suprafața adiacentă fiecărui nod are aceeași temperatură cu a nodului scade odată cu aria nodului rețelei), pe de altă parte o rețea deasă mărește durata de efectuare a calculelor, atât datorită creșterii numărului de noduri, cât și reducerii intervalelor de timp între iterații dictate de condițiile de stabilitate a soluției.

Din analiza stabilității soluției ecuației cu diferențe finite au rezultat următoarele criterii [Leo98],[Smi77]:

în interior:
$$\Delta\tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[\frac{1}{x_1 x_2} + \frac{1}{y_1 y_2} \right]} \quad (3.27)$$

pe margine
$$\Delta\tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[\frac{1}{x_1 x_2} + \frac{1}{y^2} + \frac{W}{\lambda \cdot y} \right]} \quad (3.28)$$

pe colț
$$\Delta\tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{y^2} + \frac{W}{\lambda \cdot x} + \frac{W}{\lambda \cdot y} \right]} \quad (3.29)$$

Intervalul de timp ales reprezintă de fapt timpul în care procesul nestaționar al transmiterii căldurii este aproximat cu un proces staționar. Din această cauză, cu cât caracteristicile procesului real se abat mai mult de la cele ale unui proces staționar, cu atât trebuie să fie mai mică durata iterației.

În relațiile (3.18), (3.19), (3.24), (3.25), (3.26) se observă că membrul drept depinde numai de mărimi cunoscute la momentul iterației k . Dacă se notează aceste expresii cu $G_{i,j,k}$ se obține:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = G_{i,j,k} \quad (3.30)$$

Mărimea $G_{i,j,k}$ reprezintă de fapt viteza de variație a entalpiei punctului (i, j) în procesul considerat staționar, care începe la momentul τ_k . Cu cât această mărime este mai mare în valoare absolută, cu atât procesul este mai nestaționar, iar intervalul de timp trebuie ales mai mic.

Soluția optimă constă în folosirea unui interval de timp variabil și limitarea variației entalpiei la o valoare fixată ΔH_{max} .

Astfel se obține:

$$\Delta\tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k = \frac{\Delta H_{max}}{\max_{(i,j) \in D} |G_{i,j,k}|} \quad (3.31)$$

unde D este domeniul valorilor (i, j) .

În aceste condiții se poate considera un interval de timp mic atunci când variația entalpiei este mare și un interval mare atunci când aproximarea cu un proces staționar este mai bună.

3.3 Simularea procesului de solidificare și implementarea programului de simulare

În vederea realizării modelării matematice [Pro85],[Pro06],[Fau07] a solidificării unui semifabricat se consideră o secțiune a ansamblului semifabricat-cristalizer, care se împarte cu ajutorul unei rețele de discretizare (figura 3.2) [Tir10_5]. Temperatura în fiecare nod reprezintă temperatura medie a suprafeței adiacente nodului [Rec04], [Liu08]. În aceste noduri se scriu ecuațiile cu diferențe finite prezentate anterior (3.15, 3.16, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26).

Modelul se realizează pe baza următoarelor ipoteze simplificatoare:

- se consideră că, cristalizerul pierde căldură în mod uniform pe toate suprafețele;
- se neglijează transmiterea căldurii pe axa longitudinală, considerând că ea are loc doar în secțiunea orizontală a semifabricatului;
- se neglijează variația de densitate;
- se consideră că în momentul zero temperatura masei de oțel este uniformă. Pentru nodurile de suprafață este corect să se presupună că în momentul turnării are loc formarea unui strat

subțire de oțel solidificat, iar căldura pierdută de acest strat se transmite instantaneu nodurilor de pe suprafața interioară a cristalizorului;

- degajarea căldurii latente de topire se face în intervalul „lichidus–solidus” proporțional cu temperatura.

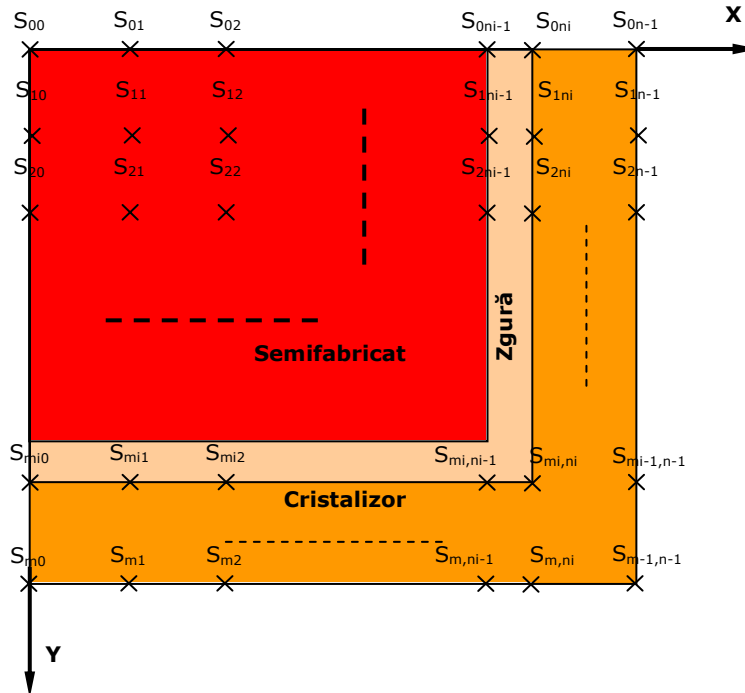


Fig. 3.2 – Schema rețelei utilizate la aplicarea metodei diferențelor finite

Ca urmare a ipotezelor considerate, ansamblul semifabricat-cristalizor este simetric față de axa longitudinală a semifabricatului. Sistemul de axe va avea originea în centrul semifabricatului, iar calculele se vor efectua numai pentru x și y pozitivi.

Pentru a implementa un algoritm pe baza modelului descris anterior, sunt necesare următoarele date inițiale:

- temperatura ambiantă;
- temperatura de turnare;
- temperatura inițială a cristalizorului;
- dimensiunile semifabricatului și grosimea peretelui cristalizorului;
- numărul nodurilor din semifabricat și cristalizor după cele două axe;
- constanta de convecție K ;
- valorile conductibilității termice a oțelului și cuprului în funcție de temperatură;
- valorile entalpiei oțelului și cuprului în funcție de temperatură. În cazul oțelului, această dependență funcțională trebuie să includă căldura latentă de topire;

- maximul variației entalpiei la o iterație;
- condiția de oprire a desfășurării algoritmului. Aceasta poate fi: oprire manuală, după un anumit timp, sau la o temperatură minimă, medie sau maximă a semifabricatului specificată.

Relația (3.18) permite calculul entalpiei unui nod în funcție de entalpia aceluiași nod la momentul precedent și temperaturile reduse ale nodului respectiv și a celor adiacente. Pentru a continua iterarea, este nevoie să se deducă temperatura din entalpie, apoi temperatura redusă din temperatura reală. La o iterație, este nevoie de următoarele transformări:

$$\dots \rightarrow \Phi \rightarrow H \rightarrow t \rightarrow \Phi \rightarrow \dots$$

Pentru a efectua calculele, este nevoie de dependențele funcționale $\lambda(t)$, $\Phi(t)$, $t(\Phi)$, $H(t)$ și $t(H)$, acestea trebuind să fie suficient de precise.

Implementarea s-a realizat considerând marca de oțel **OLT 35K**. În Anexa 1 se prezintă compoziția chimică pentru **OLT 35k**.

Conductibilitatea termică

Conductibilitatea termică a oțelului și fontei este dată în literatură [Tri75],[Cai99],[Ard07] sub formă de tabele sau grafice. Reprezentând grafic o astfel de dependență, se observă (fig.3.3) că ea poate fi aproximată printr-o funcție pe două intervale: un arc de parabolă, până la o temperatură ($t_{cr} = 768 \text{ }^\circ\text{C}$, este temperatura punctului Curie), și o valoare constantă peste această temperatură [Tho01].

Funcția în acest caz are forma:

$$\lambda(t) = \begin{cases} a \cdot t^2 + b \cdot t + c, & t \leq t_{ct} \\ \lambda_{cr}, & t > t_{cr} \end{cases} \quad (3.32)$$

unde, pentru a asigura continuitatea funcției în punctul $t = t_{cr}$ se calculează λ_{cr} cu:

$$\lambda_{cr} = a \cdot t_{cr}^2 + b \cdot t_{cr} + c \quad (3.33)$$

Parabola este un polinom de regresie de ordinul 2, ai cărui coeficienți sunt calculați prin metoda CMMP [Pro04].

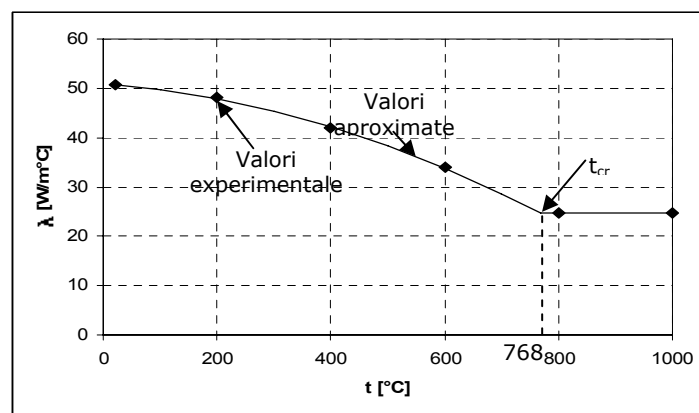
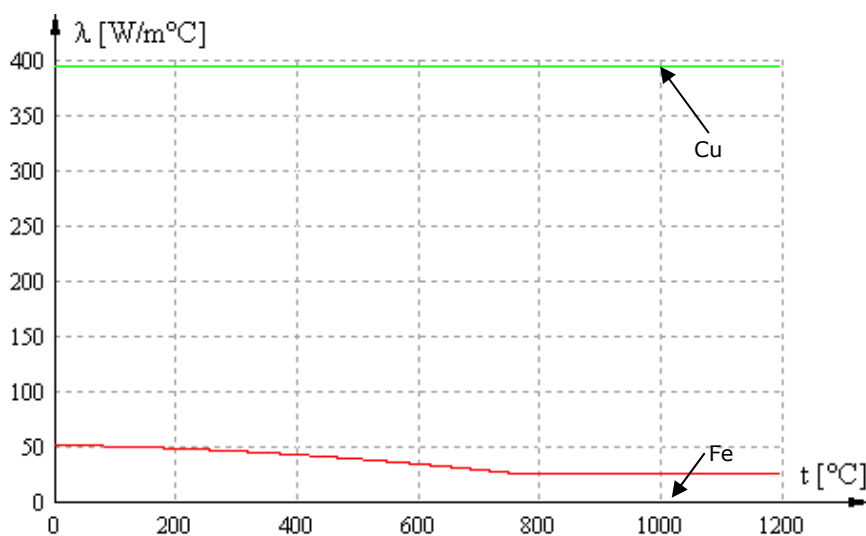
Valorile obținute sunt:

$$\begin{aligned} a &= -3,325347756276 \cdot 10^{-5} \\ b &= -8,628845527225 \cdot 10^{-3} \\ c &= 5,0928618576856 \end{aligned}$$

În Tabelul 3.1 se prezintă valorile experimentale [Tri75] și cele approximate prin această metodă, iar în figura 3.3 aceleași date sub formă de grafic.

Tabelul 3.1

T [°C]	λ [W/m°C] Experimental	λ [W/m°C] aproximat
20	50,66	50,743
200	48,13	47,873
400	41,85	42,157
600	33,95	33,780
800	24,65	24,688
1000	24,65	24,688

Fig. 3.3 – Dependența $\lambda(t)$, valori experimentale (punctele) și aproximare (liniile)Fig. 3.4 – Dependența $\lambda(t)$, rezultată din simulare

Temperatura redusă

Faptul că $\lambda(t)$ are forma dată de relația (3.32) ușurează mult calculul integralei lui $\Phi(t)$.

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^t \frac{\lambda}{\lambda_0} dt \quad (3.34)$$

deoarece se poate aplica o metodă analitică. Pentru simplificare (se reamintește că t_0 este ales arbitrar, iar $\lambda_0 = \lambda(t_0)$), se alege $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Astfel, deoarece $\lambda_0 = \lambda(0) = c$, relația (3.34) devine:

$$\Phi(t) = \frac{1}{c} \cdot \int_{t_0}^t \lambda(t) dt = \begin{cases} \frac{a}{3c} t^3 + \frac{b}{2c} t^2 + t, & t \leq t_{cr} \\ \frac{a}{3c} t_{cr}^3 + \frac{b}{2c} t_{cr}^2 + t_{cr} + (t - t_{cr}) \frac{\lambda_{cr}}{c}, & t > t_{cr} \end{cases} \quad (3.35)$$

sau:

$$\Phi(t) = \begin{cases} t \left(\frac{a}{3c} t^2 + \frac{b}{2c} t + 1 \right), & t \leq t_{cr} \\ t \frac{\lambda_{cr}}{c} + t_{cr} \left(\frac{a}{3c} t_{cr}^2 + \frac{b}{2c} t_{cr} + 1 - \frac{\lambda_{cr}}{c} \right), & t > t_{cr} \end{cases} \quad (3.36)$$

În figurile 3.5 și 3.6 se prezintă dependențele $\Phi(t)$ și $t(\Phi)$ sub formă grafică pentru Cu și Fe.

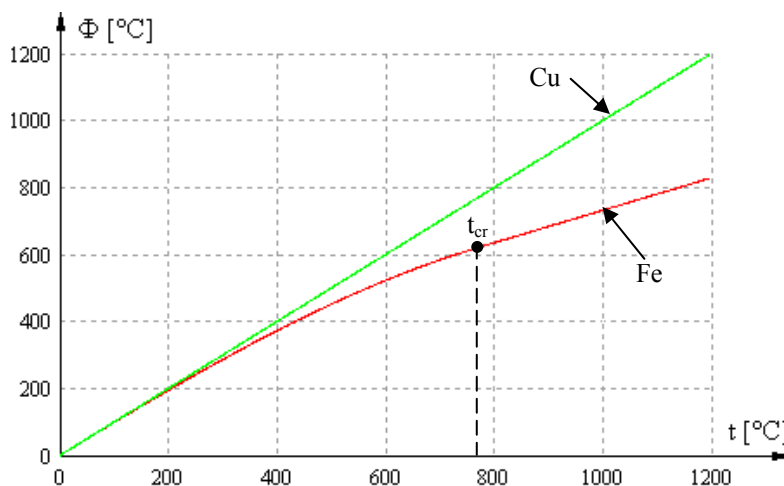
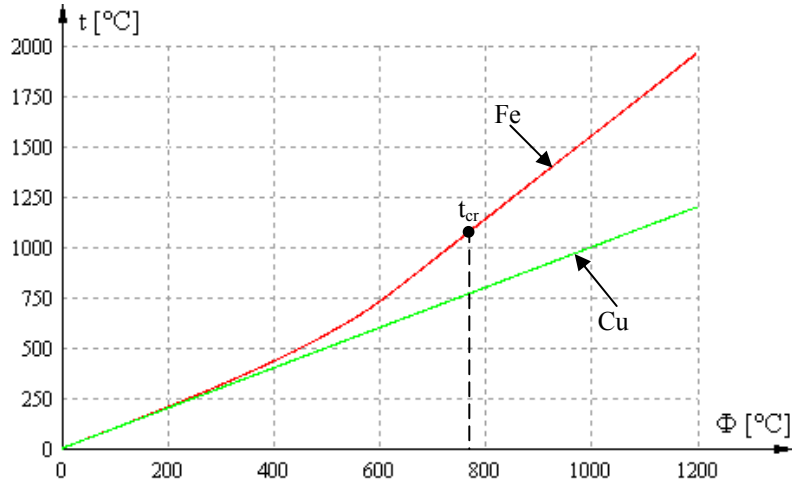


Figura 3.5 Dependentă $\Phi(t)$

Figura 3.6 – Dependența $t(\Phi)$

Datorită faptului că temperatura cristalizorului rămâne mult sub punctul de topire s-a putut considera conductibilitatea termică a cuprului constantă. În acest caz, din relația (3.36) rezultă $\Phi(t)=t$. Reprezentarea dependențelor s-a făcut până la 1200°C pentru a ilustra inflexiunea din punctul Curie a fierului.

Aceste dependențe sunt critice din punct de vedere al timpului de execuție, deoarece trebuie calculate în mod repetat. Din acest motiv s-a căutat pe cât posibil aproximarea prin funcții analitice a funcției $\lambda(t)$ și implicit $\Phi(t)$ și $t(\Phi)$.

Dependența entalpiei de temperatură

Dependența entalpiei de temperatură $H(t)$ este furnizată în literatură sub formă tabelară sau grafică [Tho01], dar numai pentru temperaturi inferioare punctului solidus. Pentru a continua și peste acest punct este nevoie de temperaturile solidus și lichidus, căldura latentă de topire a oțelului și căldura specifică a oțelului topit.

În Tabelul 3.2 [Tho01] sunt date valorile pentru H în funcție de temperatură, ultimele 3 linii au fost calculate prin extrapolare. Funcțiile $H(t)$ și $t(H)$ se obțin prin interpolare liniară.

Tabelul 3.2			
Nr.	t [°C]	H [kcal/kg]	H [kJ/kg]
0	100	11,2	46,88
1	200	22,6	94,59
2	300	36,2	151,52
3	400	49,9	208,86
4	500	64,3	269,13
5	600	82,0	343,21

Nr.	t [°C]	H [kcal/kg]	H [kJ/kg]
6	700	101,0	422,74
7	800	130,8	547,46
8	900	148,1	619,87
9	1000	164,6	688,93
10	1100	181,7	760,51
11	1200	198,6	831,24
12	1300	207,5	868,49
13	1440	220,0	920,64
14	1500	284,0	1188,51
15	1600	310,6	1300,27

Figurile 3.7 și 3.8 prezintă funcțiile $H(t)$ și $t(H)$ sub formă grafică pentru Cu și Fe.

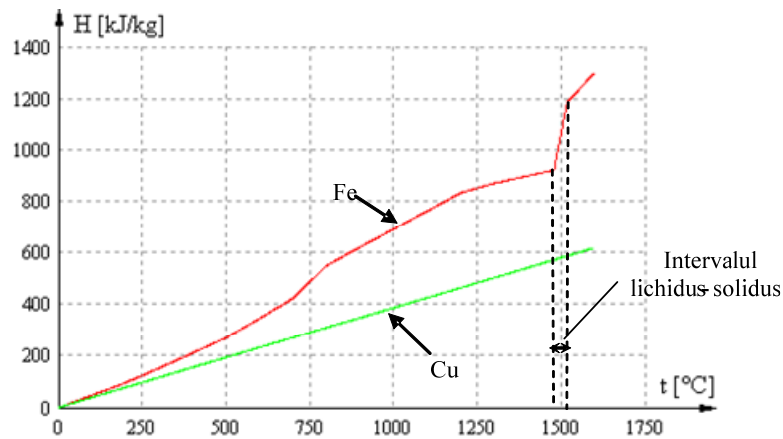


Figura 3.7 Funcția $H(t)$ sub formă grafică

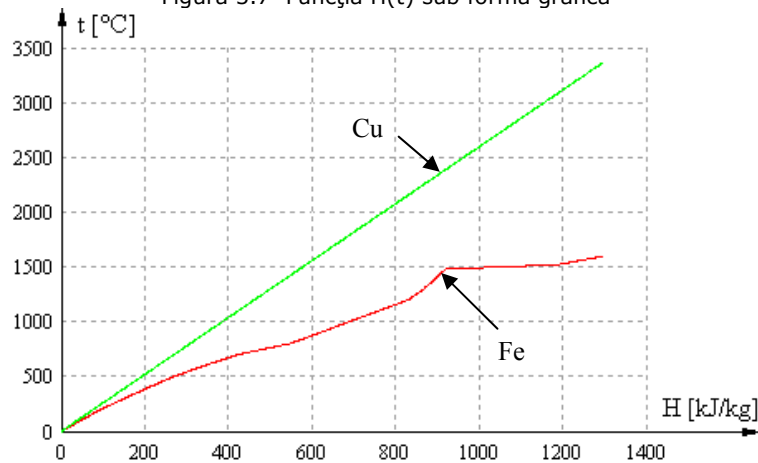


Figura 3.8 Funcția $t(H)$ sub formă grafică

Și în acest caz comportamentul cuprului a fost extrapolat (conductibilitatea termică se consideră constantă) ținând cont că nu se ajunge la temperaturi foarte mari în cristalizor, iar simplitatea relațiilor este esențială pentru a obține timpi de simulare rezonabili. Transformarea de fază a fierului are loc între temperaturile solidus și lichidus, care depind în principal de concentrația carbonului [Fle02], [Ger04]. Cu cât această concentrație este mai mare cu atât cele două temperaturi sunt mai îndepărtate. În cazul fierului chimic pur, topirea este izotermă și are loc la 1536°C.

Relațiile de calcul utilizate în program

Din cauza utilizării simetriei centrale, vor apărea situații în care unul (sau amândoi) din indicii i, j vor fi „-1”. Aceasta se întâmplă atunci când se calculează un nod situat pe una din axele X, Y sau în origine. Astfel, vor apărea încă trei cazuri distincte, chiar dacă rezolvarea lor nu ridică probleme deosebite:

$$\begin{aligned}\Phi_{-1,j,k} &= \Phi_{1,j,k} \\ \Phi_{i,-1,k} &= \Phi_{i,1,k} \\ \Phi_{-1,-1,k} &= \Phi_{1,1,k}\end{aligned}\quad (3.37)$$

În scopul simplificării calculelor, se utilizează rețele de discretizare cu noduri distribuite uniform de-a lungul axelor X și Y. De asemenea se rescriu relațiile prezentate anterior pentru a reduce numărul cazurilor distincte:

1. Originea axelor ($i = j = 0$):

$$\begin{aligned}\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [0 + 2\Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \\ &+ \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [0 + 2\Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}]\end{aligned}\quad (3.38)$$

2. Axa Y ($i = 0$):

$$\begin{aligned}\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [0 + 2\Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \\ &+ \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}]\end{aligned}\quad (3.39)$$

3. Axa X ($j = 0$):

$$\begin{aligned}\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \\ &+ \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [0 + 2\Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}]\end{aligned}\quad (3.40)$$

4. Interior:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\phi_{i-1,j,k} + \phi_{i+1,j,k} - 2\phi_{i,j,k}] + \\ &+ \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\phi_{i,j-1,k} + \phi_{i,j+1,k} - 2\phi_{i,j,k}] \end{aligned} \quad (3.41)$$

5. Margine Y (i = n-1):

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot \left[2\phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} W - 2\phi_{i,j,k} \right] + \\ &+ \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\phi_{i,j-1,k} + \phi_{i,j+1,k} - 2\phi_{i,j,k}] \end{aligned} \quad (3.42)$$

6. Margine X (j = m-1):

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\phi_{i-1,j,k} + \phi_{i+1,j,k} - 2\phi_{i,j,k}] + \\ &+ \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[2\phi_{i,j-1,k} - \frac{2y}{\lambda_0} W - 2\phi_{i,j,k} \right] \end{aligned} \quad (3.43)$$

7. Colț:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot \left[2\phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} W - 2\phi_{i,j,k} \right] + \\ &+ \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[2\phi_{i,j-1,k} - \frac{2y}{\lambda_0} W - 2\phi_{i,j,k} \right] \end{aligned} \quad (3.44)$$

Se observă că toate relațiile de mai sus pot fi scrise sub forma:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [A_x + B_x - 2\phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [A_y + B_y - 2\phi_{i,j,k}] \quad (3.45)$$

unde:

$$A_x = \begin{cases} 0, & i = 0 \\ \phi_{i-1,j,k}, & 0 < i < n-1 \\ 2\phi_{i-1,j,k}, & i = n-1 \end{cases} ; \quad A_y = \begin{cases} 0, & j = 0 \\ \phi_{i,j-1,k}, & 0 < j < m-1 \\ 2\phi_{i,j-1,k}, & j = m-1 \end{cases} ; \quad (3.46)$$

$$B_x = \begin{cases} 2\phi_{i+1,j,k}, & i = 0 \\ \phi_{i+1,j,k}, & 0 < i < n-1; \\ -\frac{2x}{\lambda_0}W, & i = n-1 \end{cases}; \quad B_y = \begin{cases} 2\phi_{i,j+1,k}, & j = 0 \\ \phi_{i,j+1,k}, & 0 < j < m-1; \\ -\frac{2y}{\lambda_0}W, & j = m-1 \end{cases} \quad (3.47)$$

Relațiile (3.45)–(3.47) sunt mai avantajoase față de (3.39)–(3.44), deoarece deciziile se iau numai pentru unul din indicii i, j și nu pentru amândoi. Aceasta conduce la o simplificare serioasă a algoritmului și la mărirea vitezei de execuție a programului.

Prezentarea programului „TirSim”

Programul de simulare „TirSim” [Tir10_5],[Tir11_1] este realizat în limbajul C++ și funcționează sub platforme Win32. Codul sursă al programului este prezentat în **Anexa 2**.

Pentru interfața grafică, programul folosește MFC (*Microsoft Foundation Classes*), o bibliotecă de clase care încapsulează funcționalitatea interfeței standard de programare Windows (API – *Application Program Interface*). Funcțiile C standard (cum sunt *fopen()* sau *exit()*), care nu sunt parte din Windows API necesită o altă bibliotecă: MSVCRT (*Microsoft Visual C Runtime*). Graficele tridimensionale sunt realizate cu implementarea Windows a specificației OpenGL (*Open Graphics Library*) [Hym96].

Cele mai importante clase C++ implicate în procesul de simulare sunt:

- *Material* – conține descrierea unui material (oțel sau fontă). Această clasă implementează dependențele funcționale $\lambda(t)$, $\Phi(t)$, $t(\Phi)$ prin metode analitice și $H(t)$ și $t(H)$ prin interpolare liniară, așa cum s-a arătat în paragrafele 3.2.1, 3.2.2 și 3.2.3. Clasa dispune de metode pentru serializare (poate fi scrisă într-un fișier sau citită dintr-unul).

- *HeatFlowCalculator* – această clasă realizează calculele corespunzătoare unei singure iterații, conform relațiilor (3.45), (3.46) și (3.47). Constructorul acestei clase are ca argumente două referințe: una către clasa *MetalDataFile* (descrișă în continuare și una către o altă instanță a *HeatFlowCalculator* care reprezintă momentul de timp precedent. Dacă această referință este invalidă (NULL), atunci este vorba de prima iterație, iar acțiunea va fi de a aplica valorile inițiale pentru t , Φ și H . Pentru a reduce la minim necesitatea conversiilor între t , Φ și H , clasa conține trei matrici distincte corespunzătoare acestor mărimi în nodurile rețelei.

Toate calculele sunt realizate în virgulă mobilă dublă precizie, pentru a reduce erorile propagate. Acestea se datorează faptului că, deși precizia este destul de mare, atât pentru simplă precizie (*float* – 32 biți, 8 zecimale) cât și în dublă precizie (*double* – 64 biți, 17 zecimale), simularea conduce la un șir foarte lung de valori care sunt calculate unele din altele.

După terminarea calculelor, numai temperaturile vor fi salvate în fișierul gestionat de *MetalDataFile* în simplă precizie – suficientă pentru construirea de grafice.

- *SequenceInterpolator* – deoarece clasele care implementează grafice au nevoie de funcții continue, iar temperatura unui nod este considerată media temperaturii suprafeței adiacente, este necesară interpolarea valorilor obținute prin calcul pentru a obține o funcție continuă. Această sarcină îi revine clasei

SequenceInterpolator. Interpolarea este liniară și se realizează mai întâi după axa X și apoi după Y. Contrar așteptărilor, rezultatul nu este o suprafață plană ci un hiperboloid mărginit de patru segmente de dreaptă pe care le atinge.

Clasa *MetalDataFile*, atunci când este în starea de furnizor de date, păstrează în memorie două instanțe ale *SequenceInterpolator*. Acestea sunt folosite pentru încă o interpolare liniară, de data aceasta în timp.

– *CProgressDialog* – este o derivată a clasei *MFC CDialog* și implementează un dialog modal (care nu permite accesul la fereastra principală). Acesta se deschide atunci când se pornește procesul de calcul – pe care îl controlează indirect – și se închide la terminarea calculului fie prin comandă manuală, fie la atingerea condiției de oprire.

La inițializarea dialogului se pornește un fir de execuție (*thread*) separat de cel principal. Acest *thread* efectuează de fapt calculele apelând funcția *calculate()* a clasei *MetalDataFile*. La rândul ei, aceasta apelează funcția *callback()* a clasei *CProgressDialog* la fiecare iterație, ceea ce permite actualizarea datelor afișate.

– *MetalDataFile* – această clasă gestionează un fișier temporar, în care sunt scrise datele în procesul de calcul și din care datele sunt citite pentru construcția de grafice. S-a folosit un fișier și nu memoria, pentru că dimensiunea datelor rezultate în urma calculului poate fi foarte mare și este în plus și imprevizibilă. Fișierul este șters de către destructorul acestei clase (atunci când se termină programul), dar poate fi copiat în alt loc și utilizat mai târziu prin comenzi din meniu.

3.4 Rezultate, analiza simulărilor

Pentru toate simulările efectuate în continuare s-au folosit caracteristicile mărcii de oțel **OLT 35K**, și anume:

- masa specifică (densitatea) $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$;
- temperatura solidus $T_{\text{sol}} = 1480 \text{ }^\circ\text{C}$;
- temperatura lichidus $T_{\text{lich}} = 1520 \text{ }^\circ\text{C}$;
- căldura latentă de topire $q_t = 64 \text{ kcal/kg} = 267,87 \text{ kJ/kg}$;
- căldura specifică a fazei lichide $c_l = 1,118 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$;
- dependențele funcționale $\lambda(T)$, $\Phi(T)$ și $H(T)$ prezentate anterior.

Datele ambientale folosite sunt:

- temperatura mediului ambiant 20°C ;
- temperatura de turnare 1600°C ;
- constanta de convecție $K = 15$.

Simulările sunt realizate cu următoarele date:

- numărul nodurilor de discretizare pentru semifabricat 25×25 ;
- numărul nodurilor de discretizare pentru cristalizor 6×6 ;
- maximul variației entalpiei într-o iterație 100 J/kg .
- viteza de turnare 1000 mm/min
- înălțimea cristalizorului 900 mm

Simularea s-a realizat pentru semifabricatele cu secțiune **240x240** mm.

Interfața principală a programului este prezentată în figura 3.9. Datele sunt stabilite și introduse în program prin intermediul unei ferestre de preluare a datelor (fig.3.10). Cu cât numărul de noduri de discretizare este mare (atât pentru

cristalizor cât și pentru semifabricat) și respectiv maximul variației entalpiei într-o iterație mai mic, cu atât timpul real de simulare este mai mare, iar acuratețea modelului mai ridicată. În cazul datelor prezentate anterior, timpul real de simulare a fost 23:30 min pentru un timp simulat de 54s.

Rularea programului „**TirSim**” poate fi întreruptă în orice moment, cu mențiunea că nu poate fi pornit din același moment de timp, ci trebuie rulat programul de la început. Pentru o mai bună ilustrare a funcționării programului, s-au efectuat capturi ale ecranului la diferite momente de timp, din care se pot obține informații privind temperaturile din fir și cristalizor și timpul simulat până la momentul respectiv de timp real. La oprirea procesului de simulare, programul prezintă opțiunea de afișare a variației parametrilor simulați în timp [**Tir11_1**].

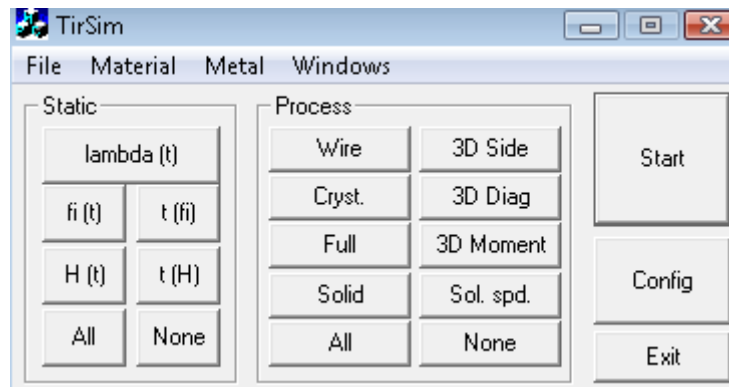


Fig.3.9 Interfața principală a programului „**TirSim**”

Astfel, în cele ce urmează sunt prezentate: fereastra de dialog pentru evoluția calculelor (fig. 3.11) precum și ferestrele de dialog rezultate la 06:08 min (fig.3.12), 12:17 min (fig.3.13), 21:09 h (înainte de ieșirea suprafeței considerate din cristalizor - fig. 3.14) și la ieșirea din cristalizor, respectiv 23:30 min (fig.3.15).

Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1600	°C
Dimensiunile firului	240 x 240	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	25 x 25	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	6 x 6	-
Maximul varietii entalpiei / iteratie	100	J/kg
Viteza de turnare	1000	mm/min
Inaltimea cristalizorului	900	mm
Putere disipata in cristalizor	2090	kW

Fig. 3.10 Fereastră de dialog pentru stabilirea datelor de rulare a programului "TirSim" pentru semifabricatele cu secțiune **240x240** mm

	min	med	max
wire	1285	1583	1600
cryst.	246	373	477

dt: 3.7 ms
step: 7736
time: 20

Fig. 3.11 – Fereastra de dialog pentru evoluția calculelor

Temperaturile sunt indicate prin intermediul unui gradient de culoare, cu valorile: roșu pentru temperatura de turnare, albastru pentru temperatura ambiantă și verde pentru media lor. Orice temperatură intermediară este o combinație a acestora.

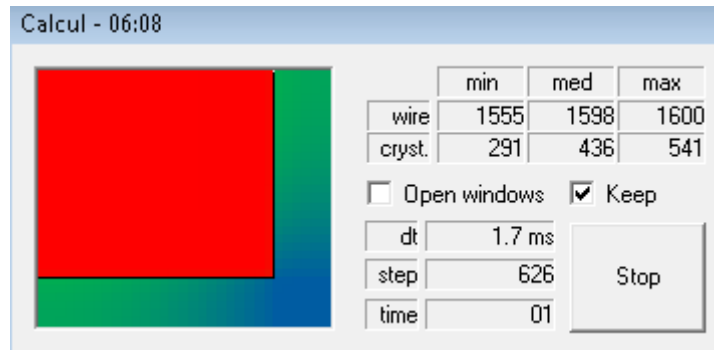


Fig.3.12 Fereastra de dialog la 06:08 min timp real, respectiv 01 s timp simulat

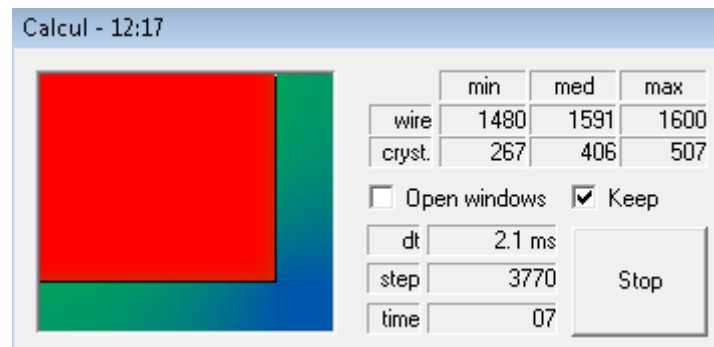


Fig.3.13 Fereastra de dialog la 12:17 min timp real, respectiv 07 s timp simulat

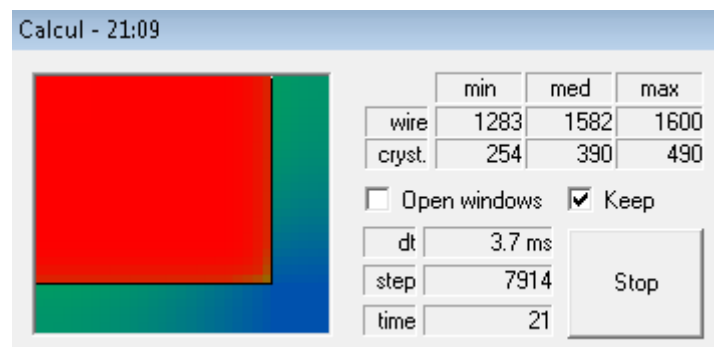


Fig.3.14 Fereastra de dialog la 21:09 min timp real, respectiv 21 s timp simulat

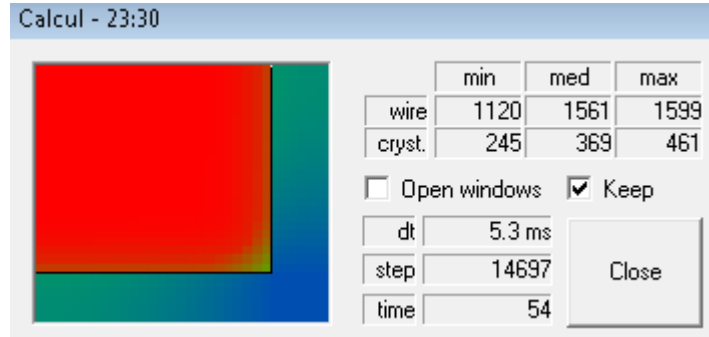


Fig.3.15 Fereastra de dialog la 23:30 min timp real, respectiv 54s timp simulat (sfârșitul rulării programului)

O primă dependență obținută o reprezintă variația temperaturii în semifabricat în funcție de timp (fig.3.16 a), de asemenea este prezentată poziția punctelor din semifabricat în care se calculează variația temperaturii (fig.3.16 b).

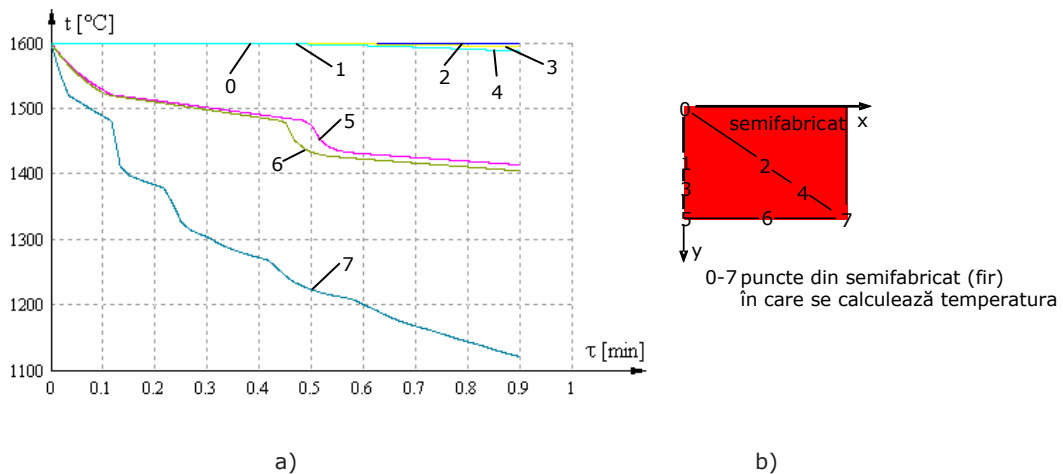


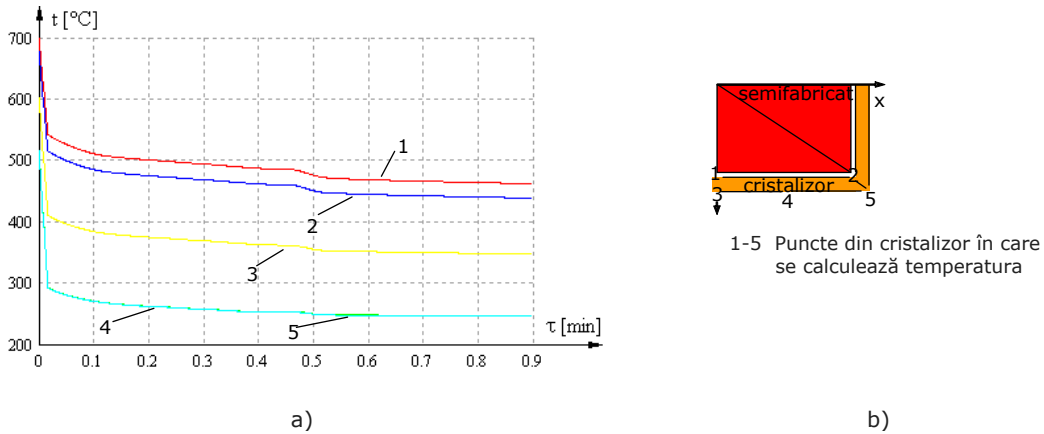
Fig.3.16

- a) Variația temperaturilor în semifabricat (fir), în funcție de timp
 b) Poziția punctelor din graficul variației temperaturii în fir

Din figura 3.16 a, se remarcă scăderea lentă a temperaturii punctelor aflate spre centrul semifabricatului (0,1,2,3,4), modul de scădere rapidă a temperaturii din straturile mai aproape de suprafața firului (5,6), precum și scăderea foarte rapidă a temperaturii firului aflat în colțul semifabricatului (7).

Se precizează faptul că simularea este realizată doar pentru răcirea primară. Astfel se explică valorile mari ale temperaturii oțelului din interiorul semifabricatului, valori care încep să scadă odată cu înaintarea semifabricatului spre ieșirea din cristalizor.

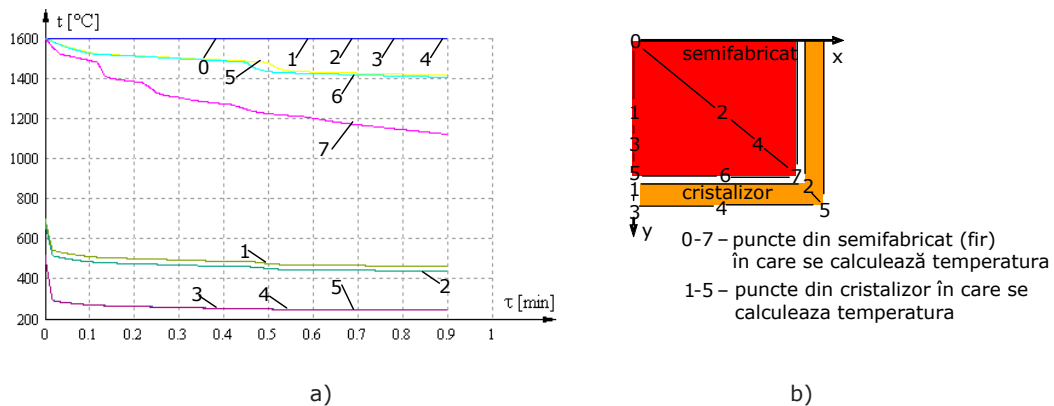
În ceea ce privește distribuția temperaturilor în cristalizor (care preia căldura cedată de semifabricat și o cedează la rândul lui apei de răcire), aceasta este prezentată în fig.3.17 b). Și în acest caz se prezintă poziția punctelor din cristalizor în care se calculează variația temperaturii (fig.3.17 b).



a) Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp
b) Poziția punctelor din graficul variației temperaturii din cristalizor

Dacă la începutul turnării temperaturile din cristalizor (în punctele 1-5) au variat între 470-690°C, acestea au scăzut brusc, apoi treptat, pe măsură ce suprafața a înaintat în cristalizor, ajungând ca după 0.6 min de la începutul turnării temperaturile din peretele interior al cristalizorului să varieze între 260-460°C, iar la ieșirea suprafeței din cristalizor să ajungă la 240-460°C (la 0,9 min de la începutul turnării).

O imagine de ansamblu se poate obține din diagrama cumulată a temperaturilor, atât din semifabricat cât și din peretele cristalizorului (fig.3.18 a). În figura 3.18 b se prezintă poziția punctelor din semifabricat și din cristalizor, în care se calculează variația temperaturii.



a) Variația temperaturii din fir și cristalizor, în funcție de timp
b) Poziția punctelor din graficul variației temperaturii din fir și cristalizor

Din figura 3.18 a, se observă că intervalul de variație al temperaturilor din semifabricat (1190-1600°C) este mai mare decât cel al temperaturilor din peretele cristalizorului (390-690°C), iar valoarea temperaturilor din semifabricat este cu mult peste valoarea temperaturilor din cristalizor.

Un alt tip de distribuție a temperaturilor din semifabricat în momentul ieșirii din cristalizor este prezentat în fig.3.19.

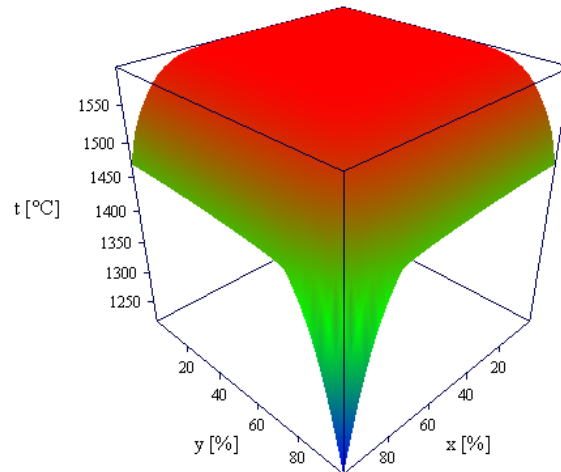


Fig.3.19 Distribuția temperaturilor în semifabricatul cu secțiune **240x240** mm în momentul ieșirii din cristalizor

Suprafața de regresie obținută este corespunzătoare unui sfert din secțiunea semifabricatului, fiind similară și pentru celelalte părți ale secțiunii. Din punct de vedere a valorilor temperaturilor, colțul semifabricatului este acela care se răcește cel mai intens, iar centrul - cel mai lent.

Interfața principală a programului permite și obținerea distribuției temperaturii după o anumită axă, în funcție de timp (fig.3.20).

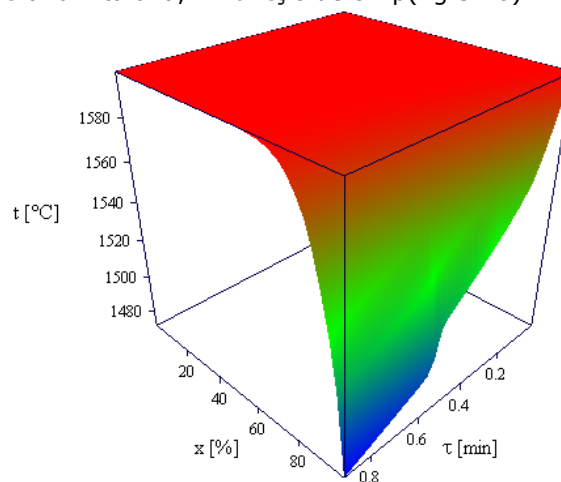


Fig.3.20 Distribuția temperaturilor din semifabricatul cu secțiune **240x240** mm de-a lungul axei „x” pentru $y = 0$, în funcție de timp

De asemenea s-a obținut distribuția temperaturii după diagonală în funcție de timp (fig.3.21).

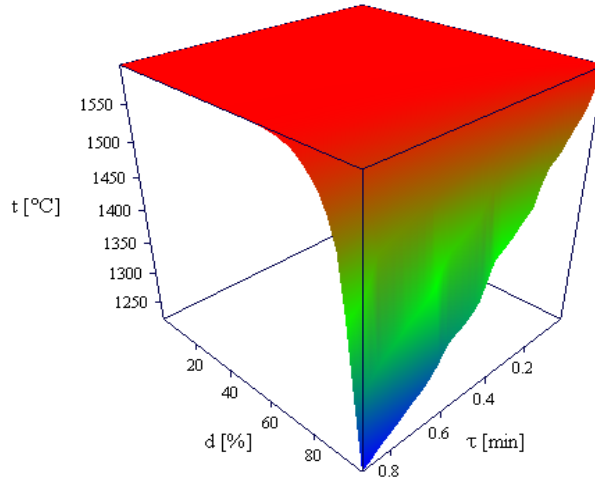


Fig. 3.21 Distribuția temperaturilor din semifabricatul cu secțiune **240x240** mm de-a lungul diagonalei, în funcție de timp

La o primă vedere cele două variații (de-a lungul axei „x”, respective de-a lungul diagonalei) sunt similare ca și alură; la distribuția temperaturilor după o latură (s-a considerat axa „x”), saltul de temperatură la ieșirea din cristalizor nu este atât de mare ca și în cazul distribuției temperaturilor după diagonală, caz în care colțul (respectiv oțelul din acea zonă) este cel care preia cantitatea cea mai mare de căldură și ca atare este cel care se încălzește cel mai mult.

S-a analizat de asemenea și modul de variație în timp a vitezei de solidificare. Este vorba de o viteză de solidificare calculată între două iterații consecutive, ceea ce explică în parte și aspectul oscilant al curbelor prezentate în fig.3.22.

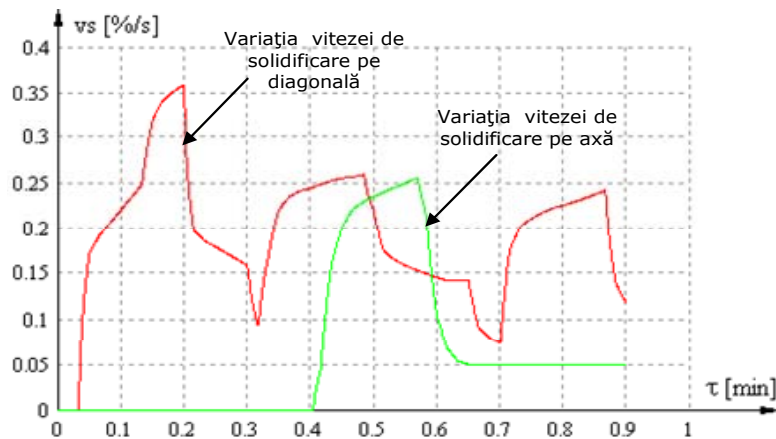


Fig.3.22 Variația în timp a vitezei de solidificare

Regimul oscilant, poate fi explicat pe de altă parte și datorită mișcării de oscilație a cristalizorului, mișcare care este o cauză importantă de apariție a fisurilor în semifabricat.

Cu ajutorul celui mai important parametru al fenomenului de solidificare, viteza de solidificare (care influențează în mod decisiv apariția fisurilor), precum și a celorlalți parametri utilizați de program, interfața principală a permis și obținerea variației crustei de oțel solidificată în timp pentru punctele aflate în straturile superioare (fig.3.23).

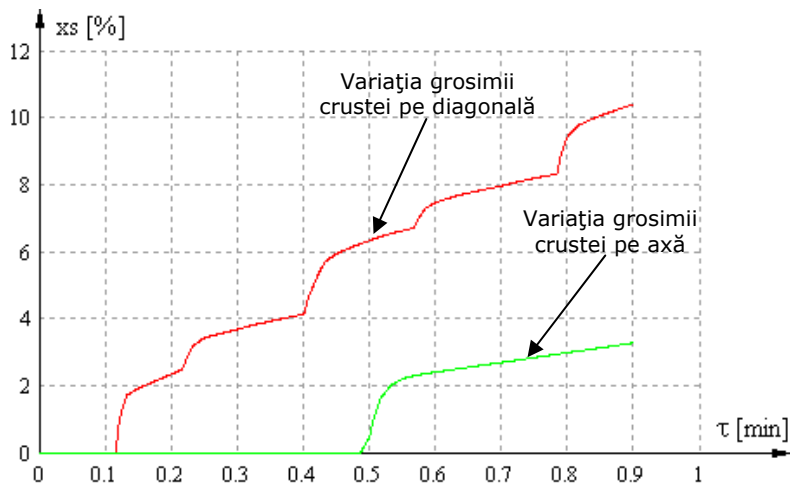


Fig.3.23 Variația grosimii crustei solidificate în timp

Se poate afirma că variațiile grosimii crustei pe diagonală și pe axă, reprezintă forma frontului de solidificare reprezentată de la margine (exterior), către centrul semifabricatului (al secțiunii **240x240** mm), aceste variații fiind de tip procentual. Se constată că, cu cât grosimea crustei crește mai rapid cu atât fenomenul de apariție a fisurilor este mai redus.

3.5 Concluzii

Analizând rezultatele simulărilor și în paralel datele din literatura de specialitate rezultă următoarele concluzii:

- Timpul de solidificare și condițiile de răcire influențează grosimea crustei ;
- În cazul în care pentru determinarea grosimii crustei s-au adoptat prea multe ipoteze simplificatoare, s-a obținut o formă aproximativă a formei conului de solidificare și abateri semnificative de la timpul real de solidificare;
- Variațiile grosimii crustei pe diagonală și pe axă, reprezintă forma frontului de solidificare, reprezentată de la exterior către centrul semifabricatului.

Rezultatele obținute în urma simulărilor efectuate cu ajutorul programului **"TirSim"**, pentru un semifabricat cu secțiunea de **240x240 mm**, pe baza MM au dus la următoarele concluzii :

- Rezultatele obținute în urma simulării cu programul **"TirSim"** fiind în concordanță cu datele din literatura de specialitate demonstrează că ipotezele simplificatoare adoptate în scopul calculului sunt bine justificate;
- Temperatura din punctele aflate spre centrul semifabricatului este mai mare decât temperatura punctelor de pe perete, ceea ce presupune că centrul semifabricatului se răcește cel mai lent, iar colțul acestuia cel mai intens;
- Modificând o serie de parametri se pot obține valori mai adecvate, aplicabile și pentru alte mărci de oțeluri turnate continuu;
- Modelare și simularea efectuată permite o analiză suficient de precisă a fenomenului de formare a crustei de solidificare și deci de formare a eventualelor fisuri;
- Datele obținute prin simulare vor fi folosite ulterior la conceperea și antrenarea rețelei neuronale, conceperea bazei de reguli a sistemului de decizie fuzzy și stabilirea ponderii corecției vitezei de turnare, respectiv a debitului de apă pentru răcirea primară.

4. SISTEM MULTI-NEURONAL PENTRU DETECȚIA FISURILOR ÎN SEMIFABRICAT LA TURNAREA CONTINUĂ

4.1. Concepția sistemelor de detecție a fisurilor

4.1.1 Preliminarii

În procesul de turnare continuă, oțelul topit aflat în oala de turnare este trecut prin intermediul distribuitorului în cristalizor. Acesta primește oțelul în partea sa superioară în condiții precise de temperatură și debit, iar la partea inferioară se extrage cu viteză constantă un semifabricat având o crustă solidificată și miezul lichid. Datorită contactului direct dintre metalul lichid și cristalizorul răcit cu apă, transmisia de căldură este rapidă și se formează în scurt timp o crustă de grosime mică, una din marile probleme care apar în această etapă tehnologică fiind fisurarea acesteia (fig.4.1a).

În conformitate cu ciclul de oscilații al cristalizorului și sensul de turnare, fisura se propagă în jos și transversal cu o viteză mai mică decât viteza de turnare (fig. 4.1.b). Când fisura ajunge în partea inferioară a cristalizorului (la ieșirea semifabricatului din cristalizor), are loc perforarea semifabricatului (fig. 4.2). Oțelul topit din interiorul semifabricatului curge afară, iar procesul de turnare continuă trebuie întrerupt [Ang96], [Bla89], [Hem02],[Kum99],[Bou02].

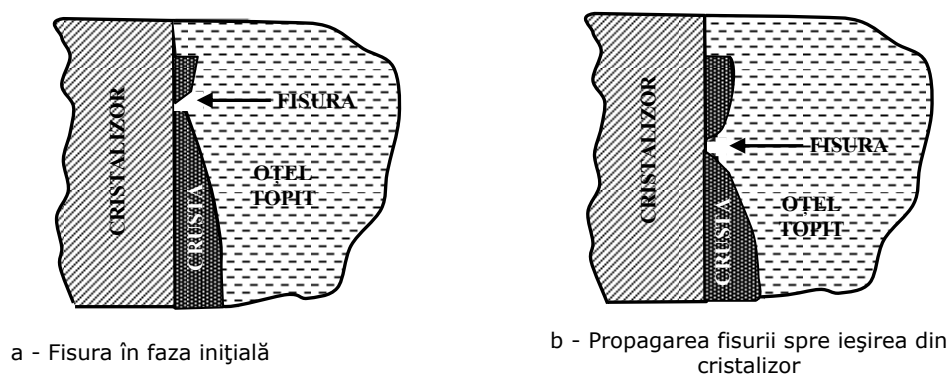


Fig.4.1 Fisurarea crustei semifabricatului

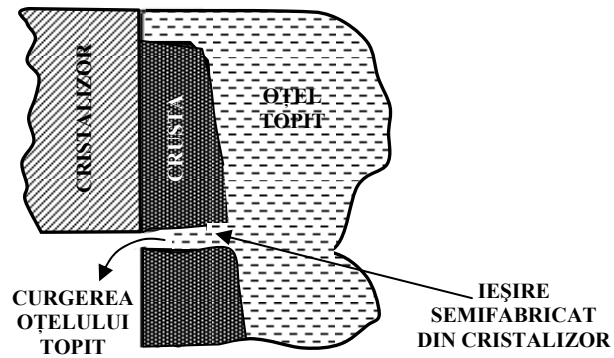


Fig.4.2 Perforarea semifabricatului si curgerea otelului topit

În Fig.4.3 a,b se prezintă apariția unei fisuri reale într-un semifabricat, precum și dezvoltarea acesteia. În Fig.4.4 se prezintă perforarea semifabricatului si curgerea în exterior a oțelului lichid [Bou_02], iar în Fig.4.5 un semifabricat perforat, la ieșirea din cristalizor.



a)



b)

Fig.4.3 Fisurarea crustei semifabricatului
a) Momentul apariției fisurii
b) Dezvoltarea fisurii în semifabricat

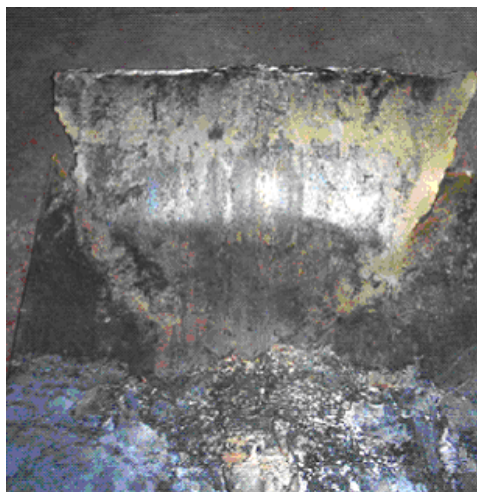


Fig.4.4 Perforarea semifabricatului și curgerea oțelului topit



Fig.4.5 Semifabricat perforat

Fisurarea crustei semifabricatului se produce ca urmare a acțiunii mai multor factori [Bla89],[Hew98]. Unul dintre factori este un proces anormal de răcire în interiorul cristalizorului care poate duce la apariția fisurilor, mai ales în partea superioară a acestuia.

Un alt posibil factor de apariție a fisurilor este o valoare prea mare a vitezei de turnare, care poate conduce la formarea unei cruste prea subțiri în cristalizor. Este important să se țină seama de faptul că oțelurile aliate trebuie turnate cu viteze mai scăzute din cauza unei sensibilități ridicate la porozitate centrală și la formarea fisurilor.

Dacă crusta solidificată nu are grosime constantă pe perimetrul cristalizorului există posibilitatea fisurării acesteia datorită presiunii ferostatice a oțelului lichid, acesta fiind un alt factor determinant în apariția fisurilor, [Pin00],[Bou02].

Analizând fiecare dintre aceste cauze de apariție a fisurilor, un rol important îl are rezistența mecanică a crustei de oțel nou formată în cristalizor, precum și mărimea forțelor de frecare între peretele interior al cristalizorului și crustă [Kim97],[Goc98],[Pin00].

4.1.2 Principiul de detecție a fisurii

În timpul procesului de turnare continuă, datorită faptului că la producerea unei fisuri, oțelul lichid vine în contact cu peretele cristalizorului, se produce o creștere a temperaturii acestuia. De aceea, fisura poate fi detectată cu ajutorul mai multor senzori de temperatură montați pe peretele cristalizorului, atât pe lățimea acestuia cât și pe direcția de turnare [Ino92],[Mad96],[Bou00],[Hem02]. Pentru cercetările efectuate în cadrul acestei teze s-au dispus pe fiecare perete al cristalizorului 12 rânduri echidistante de senzori, pe fiecare rând având câte 4 senzori (Fig. 4.6)[Tir08_1],[Tir09_5].

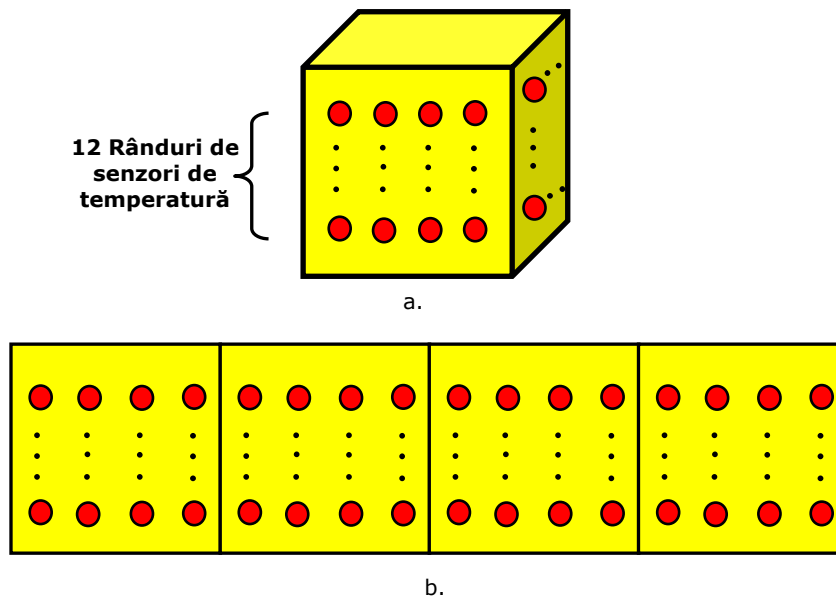


Fig. 4.6 Dispu senzorilor de temperatură pe pereții cristalizorului

a) *Cristalizor*; b) *Cristalizor desfășurat*.

● - *Senzor de temperatură*

O fisură reală are o anumită variație de temperatură, precum și o deplasare realizată într-un mod particular, nu toate creșterile de temperatură pot fi considerate fisuri în faza incipientă [Bla89],[Che97],[Kim97].

În figurile 4.7 și 4.8 sunt prezentate diagramele de variație a temperaturii măsurate de senzorii de pe un anumit rând, precum și de senzorii de pe rândul imediat inferior. În figura 4.7, când fisura crustei atinge rândul de sus de senzori,

temperatura înregistrată de acești crește. Când fisura cruste atinge rândul imediat inferior de senzori, cu o anumită întârziere datorată vitezei de curgere, temperatura înregistrată de acești senzori crește și ea, urmărind aceeași variație de temperatură ca și în cazul senzorilor din rândul de sus [Kim99],[Kum99].

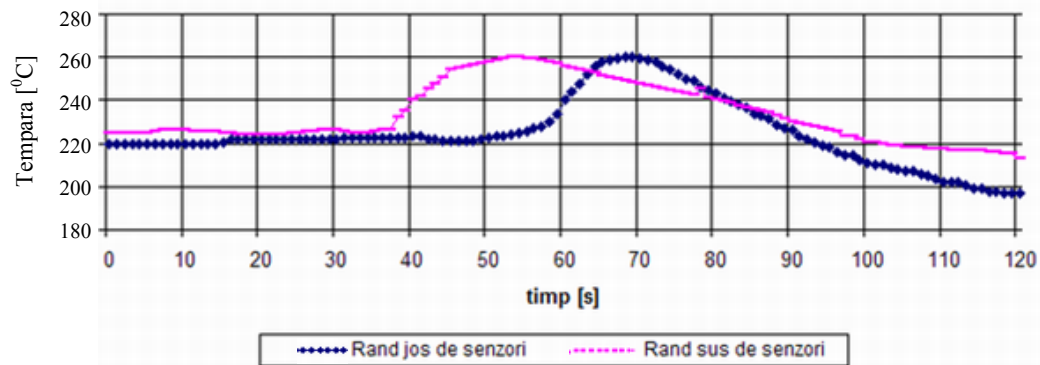


Fig. 4.7 Diagrama de variație a temperaturii în cazul apariției unei fisuri

O variație similară a temperaturii este recunoscută și de senzorii adiacenți dispuși pe orizontală[Sor98].

În figura 4.8 sunt prezentate diagramele de variație a temperaturii măsurate de senzorii de pe un anumit rând și de pe rândul imediat inferior acestuia, în cazul în care nu s-a produs fisura.

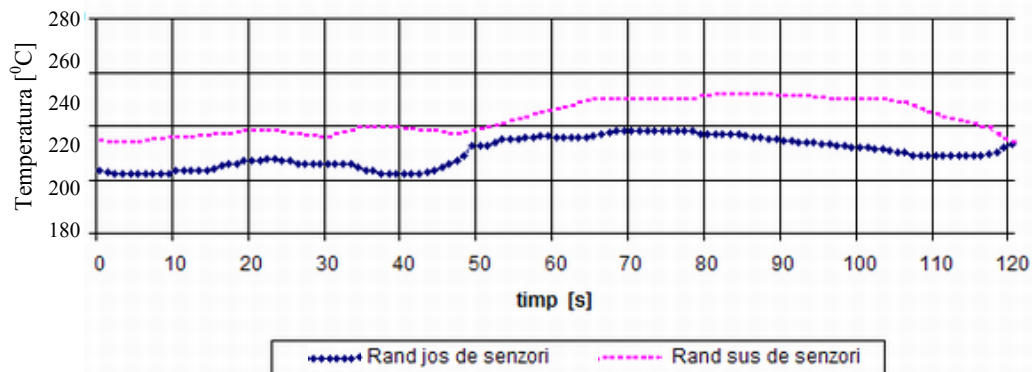


Fig. 4.8 Diagrama de variație a temperaturii în cazul inexistenței fisurii

Acuratețea sistemului de detecție a fisurilor depinde atât de recunoașterea variațiilor de temperatură, cât și a deplasării efectuate de fisură[Bou01],[Kon93].

Astfel, un sistem neuronal poate analiza semnalele furnizate de senzorii montați pe pereții cristalizorului și poate recunoaște apariția fisurii cu o precizie foarte mare, împiedicând astfel propagarea fisurii, perforarea semifabricatului și implicit pierderi economice importante [Kom91],[Mor98],[Fri98],[San98],[Hor98],[Bha99].

Un astfel de sistem neuronal de detecție a fisurilor s-a propus, conceput și dezvoltat în cadrul prezentului capitol [Tir09_1].

4.2 Proiectarea arhitecturii sistemului de rețele neuronale pentru detecția fisurilor la turnarea continuă

4.2.1. Arhitectura sistemului

Așa cum s-a menționat deja, în timpul procesului tehnologic de turnare continuă, în cristalizor începe procesul de solidificare a oțelului prin formarea unei cruste solidificate la exterior, problema majoră fiind fisurarea acesteia. La ieșirea semifabricatului din cristalizor prin porțiunea fisurată, oțelul topit din interior curge afară producându-se perforarea acestuia. Un astfel de accident trebuie evitat prin detectarea fisurilor, modificarea regimului de răcire și respectiv a vitezei de turnare, permițându-se astfel solidificarea oțelului și eliminarea fisurii [Had98], [Tir06_2], [Tir09_3], [Tir09_5].

În momentul producerii unei fisuri, oțelul nesolidificat din interiorul cristalizorului vine în contact cu peretele acestuia, producând o creștere bruscă de temperatură. Pe această bază, se poate realiza un sistem de detecție a fisurilor utilizând o serie de senzori de temperatură montați pe peretele cristalizorului, ale căror semnale sunt analizate de un sistem multi - neuronal (Fig. 4.9). Acesta va prelucra datele primite de la senzorii de temperatură și va furniza la ieșire un răspuns de existență sau inexistență a unei fisuri [Tir08_1],[Tir09_1].

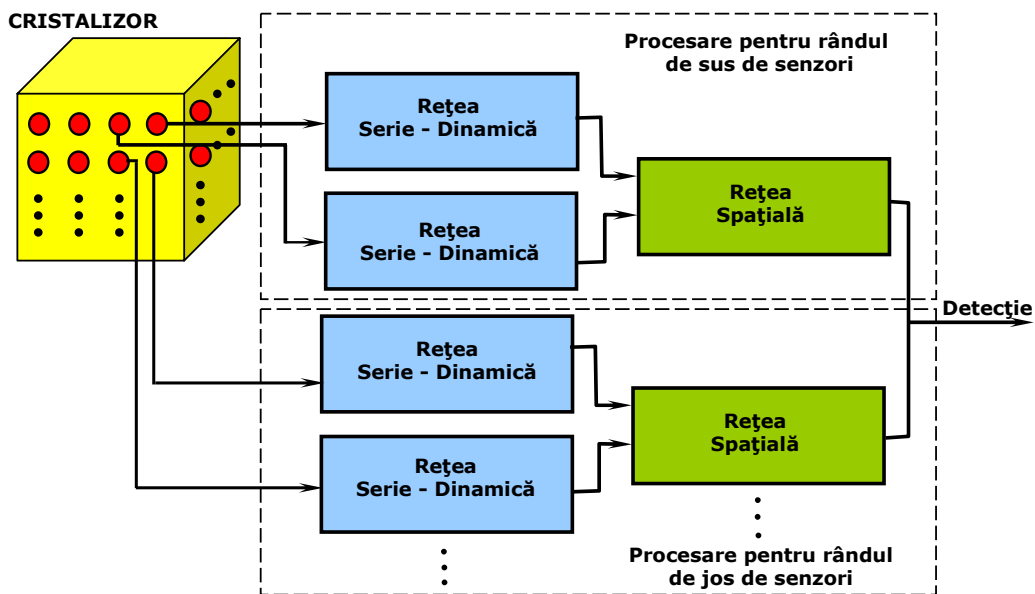


Fig. 4.9 Schema bloc a sistemului multi - neuronal

Fenomenul de apariție a fisurii este caracterizat pe de o parte de variația temperaturii înregistrată de fiecare senzor de temperatură de pe peretele cristalizorului, iar pe de altă parte de distribuția spațială a acesteia în cristalizor [Bou02]. Pentru realizarea unui sistem competitiv este necesar ca acesta să recunoască atât fenomenul de variație a temperaturii, cât și distribuția spațială a acesteia. Pentru realizarea acestui deziderat este nevoie de o rețea deosebit de complexă, care ridică o serie de probleme, inclusiv dificultatea de învățare a coeficienților interni. Pentru cazul de față s-a conceput un sistem alcătuit din mai multe rețele neuronale. Acest sistem este format din două tipuri de rețele **[Tir09_3],[Tir09_5]**:

- **rețea serie dinamică – RSD** - determină variația de temperatură și primește ca date de intrare variația temperaturii de la fiecare senzor individual montat pe peretele cristalizorului;
- **rețea spațială – RS** - determină distribuția spațială a temperaturii și primește ca date de intrare semnalul de ieșire de la două rețele dinamice, corespunzătoare fiecărei perechi de senzori adiacenți de pe același rând.

Acest sistem este un sistem performant deoarece detectează o fisură inițială și transmite în timp util informații cu privire la existența acesteia. De asemenea, sistemul detectează apariția tuturor fisurilor și elimină suspiciunea unor alarme false.

4.2.2. Arhitectura RSD

Majoritatea rețelelor neuronale utilizate în practica curentă sunt de tipul perceptron multistrat (RNA-MLP, Multilayer Perceptron) și utilizează pentru învățare algoritmul backpropagation (BP) [Psa88],[Wer90_1],[Sur06]. Acest algoritm folosește eroarea între ieșirile actuale (rezultate prin calcul, propagând înainte valorile de pe intrări, specificate de șabloane) și ieșirile așteptate (cele impuse de șablonul curent), pentru a ajusta fiecare pondere. Ajustarea ponderilor se face secvențial, plecând de la ultimul strat (cel de ieșire), spre primul strat (cel de intrare)[Leo90],[Vol99_1],[Wer90_2].

Pentru **RSD** concepută, care primește ca date de intrare valorile măsurate ale temperaturii de la fiecare senzor de temperatură, se adoptă un model de rețea neuronală artificială de tip perceptron multistrat **[Tir09_2],[Tir09_5],[Tir09_6]**. Această rețea este o rețea de tip *feedforward total conectată* (cu propagarea înainte a semnalului). Termenul "total conectată" semnifică faptul că între neuronii de pe un strat inferior și neuronii de pe stratul imediat superior sunt realizate toate conexiunile posibile. În caz contrar, rețeaua se numește local conectată [Wer90_1],[Fau94].

Din multitudinea tipurilor de rețele neuronale prezentate în literatura de specialitate [Mar90],[Pha95],[Sim96], rețelele neuronale feedforward (cu reacție înainte) se detașează net, atât prin generalitatea structurii cât și prin gradul de utilizare în diverse aplicații [Her91],[Wer90_1],[Kus93].

Într-o rețea neuronală feedforward neuronii artificiali sunt organizați pe nivele (straturi). Conexiunile dintre neuroni sunt permise doar între neuroni aparținând unui nivel inferior cu neuroni aparținând nivelului imediat superior. Nu sunt permise conexiuni între neuronii aceluiași nivel și nici conexiuni dinspre nivelele superioare spre cele inferioare [Kus93].

Ieșirea rețelelor neuronale feedforward este determinată numai de valorile curente ale intrării și de cele ale ponderilor și factorilor de scală. Ele nu au memorie, nefiind rețele recurente [Kus93],[Vol99_2].

În proiectarea și implementarea unei rețele neuronale artificiale de orice tip un rol important îl are faza de învățare (de antrenare) [Lip87],[Zur92],[Hag96],[Cri10]. Performanțele rețelei sunt impuse în primul rând de reușita acestei faze. Algoritmul de antrenare destinat rețelelor neuronale feedforward care furnizează cele mai bune rezultate este algoritmul de propagare înapoi (backpropagation) [Leo90],[Wer90_2], [Kru91].

Algoritmii de antrenare a rețelelor neuronale se împart în două categorii, supervizați și nesupervizați [Mul90],[Fau94]

Învățarea supervizată se realizează prin algoritmul de propagare înapoi a erorii și presupune pentru fiecare vector de intrare câte un vector de ieșire, reprezentând răspunsul care se dorește sa-l dea rețeaua. Împreună, vectorul de intrare și cel de ieșire asociat, formează un set de perechi de antrenament. Dimensiunea setului de perechi de antrenament depinde de tipul și complexitatea aplicației. Perechile din vectorii de antrenament se aplică secvențial, se calculează eroarea la ieșire și pe baza algoritmului de minimizare a acesteia se ajustează în permanență ponderile pentru fiecare pereche, până când eroarea corespunzătoare întregului set de antrenament se află sub un anumit prag minim [Fau94] [Vol99_1],[Vol99_2].

Învățarea nesupervizată se apropie mai mult de modul de învățare dintr-un sistem biologic, nu necesită vectori de ieșire asociați celor de intrare, nici comparări și nici propagarea erorii pentru determinarea răspunsului ideal. Setul de antrenament constă numai din vectori de intrare. În timpul unui proces de învățare nesupervizată se realizează gruparea vectorilor de intrare similari, în clase. Aplicându-se unul din vectorii de antrenament, sau un vector care este suficient de apropiat de acesta, rețeaua va produce aceeași ieșire. Pentru acest tip de învățare nu există nici o posibilitate de determinare înaintea procesului de antrenament, a vectorului de ieșire asociat de rețea unei clase din setul vectorilor de antrenament [Mul90],[Fau94].

Alegerea intrărilor (numărul și tipul lor)

În general alegerea intrărilor este o problema dificilă, ieșirile rețelei fiind mai clar impuse de problema concretă analizată [Ham93_1],[Ham93_2].

O regulă empirică de alegere a intrărilor este următoarea: *"cu cât mai multe date, cu atât mai bine!"* Această regulă se aplică atât la numărul intrărilor unei rețele, cât și la numărul șabloanelor de antrenare [Zhe94],[Pat96].

Intrările suplimentare nu afectează acuratețea rezultatelor furnizate de rețea în problema concretă rezolvată, chiar dacă anumite intrări se dovedesc a fi neimportante în determinarea ieșirii corecte. Totuși, toate simulatoarele au o limită superioară de neuroni pe care-i suportă, și deci și de intrări [Fuk92].

Atunci când se strâng date și se definesc intrările rețelei, trebuie să nu se furnizeze rețelei, 2 vectori similari la intrări, care să dea la ieșire rezultate conflictuale.

La fel de importantă ca și strângerea unui număr suficient de date de intrare este și modalitatea de selectare a acestora. Marea majoritate a simulatoarelor existente acceptă intrări care variază între 0 și 1, sau între -1 și +1. De aceea, datele reale trebuie să fie preprocesate pentru a fi aduse în această gamă. Cele mai multe simulatoare realizează chiar ele această preprocesare. Modul în care se aleg intrările semnificative pentru rețea și modul de setare al parametrilor în simulator, au drept

rezultat obținerea unei rețele neuronale performante sau nu [Fuk92], [Pat96].

În rețelele neuronale se pot utiliza 2 tipuri de intrări:

- *intrări booleene* (de tipul TRUE/FALSE). Astfel, pentru o imagine alb-negru care trebuie recunoscută de rețea, intrările ("0" - pixel alb, "1" - pixel negru) sunt de tip boolean. Aceste intrări se mai numesc și intrări binare.
- *intrări analogice* sunt cele care iau valori continue între o valoare minimă și una maximă (de exemplu, între 0 și 1). Pentru datele de pe intrări de tip analogic se recomandă ca gama lor de variație să nu fie prea mare (diferența între valoarea maximă așteptată și valoarea minimă așteptată). În acest scop, dacă o intrare analogică are o plajă mare de valori, poate fi eventual înlocuită cu o altă intrare care folosește diferența între valoarea analogică curentă și cea anterioară. În acest fel, aplicând diferența, gama lor de variație scade.

Cele mai multe rețele care rezolvă probleme reale au atât intrări binare cât și intrări analogice. Tipul de intrare folosit (binară sau analogică) poate afecta performanțele rețelei. Numărul de intrări corespunde numărului de neuroni din stratul de intrare [Hag96].

Pentru RSD dezvoltată se adoptă intrări de tip analogic. Datorită procesului care urmează să se modeleze, aceste intrări vor lua atât valori pozitive cât și valori negative. Cum rețeaua primește datele de la senzorii de temperatură individuali montați pe peretele cristalizorului, iar temperaturile măsurate de aceștia depășesc valorile de intrare ale rețelei printr-o diferențiere corespunzătoare:

$\Delta T = T(t_2) - T(t_1)$ a temperaturilor măsurate de către senzori la momentele t_1 și t_2 iar prin scalare, se obține situarea datelor de intrare pentru RSD propusă, între valorile dorite [Tir09_1],[Tir09_4].

În fig. 4.10 și fig.4.11 se prezintă diagramele de variație a temperaturii pentru cazul apariției fisurii, respectiv a inexistenței acesteia, care constituie date de intrare pentru RSD.

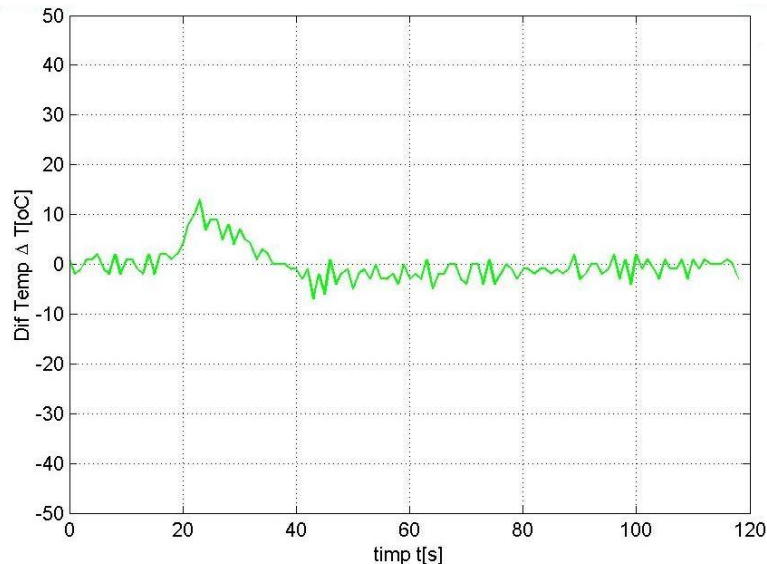


Fig. 4.10 Diagrama de variație a temperaturii în cazul apariției fisurii

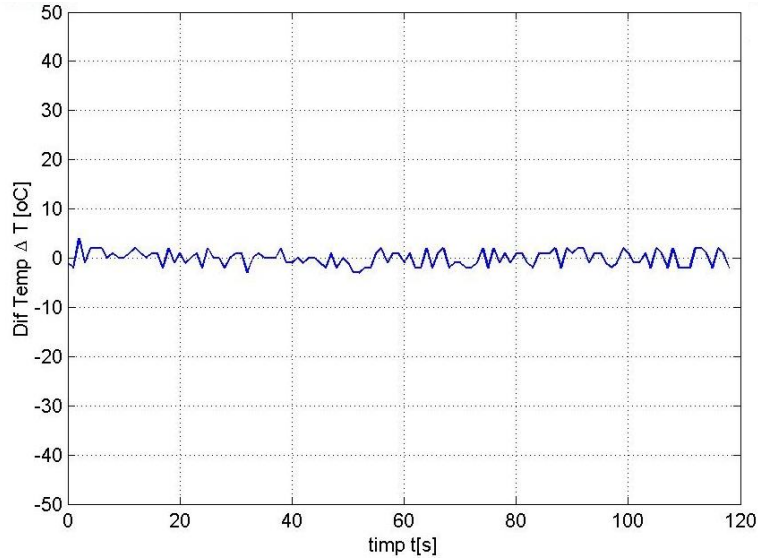


Fig. 4.11 Diagrama de variație a temperaturii în cazul inexistenței fisurii

Această diferențiere a datelor de intrare se utilizează pentru ca RSD să sesizeze schimbările de temperatură. Datele astfel diferențiate sunt cuplate în 10 buffere pentru fiecare ciclu de eșantionare și sunt memorate în 10 unități de stocare a datelor.

Prezentarea datelor la intrarea rețelei se face în mod secvențial, prin deplasarea cu un pas de eșantionare egal cu unu, a fiecărei date de intrare în cele 10 buffere (fig. 4.12). Procesul de deplasare al datelor se poate asemăna cu o stivă, în care primul element introdus este și primul element extras, introducerea făcându-se în partea de sus a stivei, iar extragerea în partea de jos a acesteia.

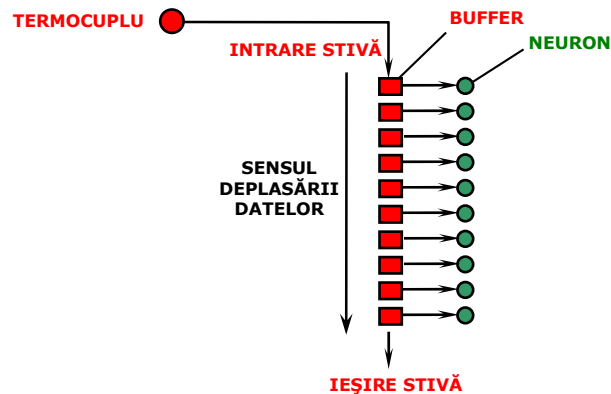


Fig. 4.12 Modul de prezentare a datelor la intrarea RSD

Numărul de neuroni de intrare ai RSD se alege egal cu 10.

Alegerea ieșirilor

În general numărul ieșirilor este impus de aplicație, fiind necesari un număr de neuroni de ieșire egal cu numărul de clase distincte pe care trebuie să le recunoască rețeaua [Pat96],[Zhe94]. Unele din regulile care se aplică intrărilor, se aplică și pentru ieșiri.

În cazul RSD dezvoltată, numărul neuronilor de ieșire este egal cu 1. Acest neuron indică dacă variația de temperatură de la intrare indica fisura firului sau nu. Rezultatul prezentat la ieșirea acestui neuron este un număr cuprins în intervalul [0,1] și rezultă pe baza procesului de recunoaștere a rezultatelor de către **RSD**.

Determinarea numărului de straturi ascunse și de neuroni pe strat ascuns

Numărul optim de straturi ascunse precum și numărul de neuroni pe strat este dificil de precizat apriori [Mul90],[Pat96].

În general, un singur strat ascuns e suficient pentru rezolvarea majorității problemelor din practică. În cazuri mai complexe, se pot folosi două, cel mult trei straturi ascunse [Sur06]. De regulă, numărul de neuroni aferenți straturilor de intrare, respectiv ieșire, este impus de natura aplicației. Neuronii structurilor ascunse au rolul foarte important de a detecta trăsăturile, legitățile, regularitățile conținute în tiparele de antrenament [Kru91],[Zhe94],[Vol97].

În probleme de clasificare (și nu de aproximare sau de modelare), când la ieșire rețeaua recunoaște o clasă dintr-un set finit de clase posibile, este suficient un singur strat ascuns. Se pot folosi eventual și mai multe straturi ascunse (deși este rar acest caz), pentru ca rețeaua să poată fi antrenată mai rapid [Dud73],[Fau94].

Un număr prea mare de neuroni ascunși pe strat influențează în mod negativ capacitatea de generalizare a RNA, totodată conduce la creșterea volumului de date care urmează a fi procesat și deci la o durată mai mare pentru etapa de antrenament. Un număr prea mic de neuroni nu este suficient pentru formarea unei reprezentări interne a datelor, ceea ce conduce la o eroare medie pătratică mare pe parcursul epocilor de antrenament și implicit la o eroare mare, corespunzătoare nu numai datelor de test, ci și celor de antrenament [Jan98],[Fuk92],[Sur06].

În concluzie, numărul optim de neuroni ascunși se va determina experimental.

Pentru RSD propusă s-a ales un singur strat ascuns. În prima fază s-a ales un număr mai mare de neuroni pentru stratul ascuns, ceea ce a dus la un timp de antrenare al rețelei foarte mare. S-a ales apoi un număr mai mic de neuroni, iar capacitatea de predicție a rețelei a scăzut mult, erorile fiind semnificative, rețeaua având mari probleme chiar în recunoașterea cazurilor simple. Pe baza experimentelor efectuate s-a ajuns la concluzia că, un număr de 8 neuroni pentru stratul ascuns este benefic pentru un proces de antrenare mai rapid, iar rețeaua prezintă acuratețe foarte mare în recunoașterea tiparelor aduse la intrare [**Tir09_5**].

În cadrul aplicației din prezenta teză, ca și algoritm de antrenament pentru antrenarea RSD s-a ales algoritmul *Scale Conjugate Gradient*. Acesta este un algoritm de antrenament care modifică ponderile după metoda gradientului conjugat. Acest algoritm poate fi utilizat pentru antrenarea oricărei rețele neuronale atâta timp cât ponderile, intrările și funcțiile de activare sunt derivabile. BP este folosit pentru calculul derivatelor parțiale a performanței în raport cu ponderile și valoarea bias (prag) a neuronului [Gor92],[Hak97]. Algoritmul nu realizează o căutare în linie pentru fiecare iterație. Justificarea alegerii acestui algoritm de antrenament constă în faptul că eroarea s-a anulat după un număr mai mic de

epoci, mult mai mic decât cel indicat în program, ceea ce nu s-a întâmplat în cazul celorlalți algoritmi testați.

În ceea ce privește alegerea funcției de activare s-au utilizat funcțiile: *Hyperbolic tangent sigmoid transfer function* și *Logarithmic sigmoid transfer function*. Justificarea alegerii acestor funcții constă în faptul că reprezintă unele dintre funcțiile de activare cel mai des folosite la implementarea rețelelor neuronale deoarece permit calculul simplu al derivatelor acestora.

Ținând cont de cele menționate, arhitectura **RSD** (fig. 4.13) are următoarele caracteristici:

- este o rețea perceptron multistrat (RNA-MLP, Multilayer Perceptron);
- nivelul de intrare este alcătuit din 10 neuroni. Datele de intrare pentru acest strat sunt preluate din 10 buffere în care se găsesc temperaturile diferențiate provenite de la senzorii de temperatură individuali, aceste temperaturi fiind eșantionate cu un pas de eșantionare egal cu unu. Aceste date de intrare iau valori atât pozitive cât și negative;
- are un singur nivel ascuns format din 8 neuroni;
- nivelul de ieșire are un singur neuron, care returnează o valoare în intervalul $[0,1]$ indicând prezența sau absența fisurii;
- algoritmul de antrenament ales este bazat pe metoda gradientului conjugat.
- funcțiile de activare utilizate sunt: *Hyperbolic tangent sigmoid transfer function* și *Logarithmic sigmoid transfer function*.

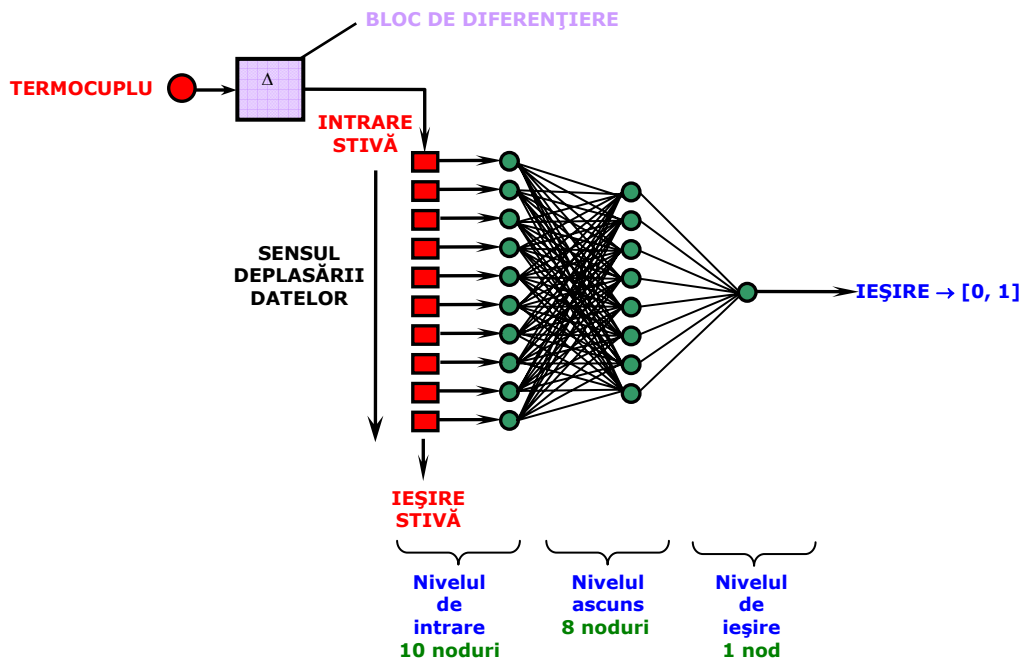


Fig. 4.13 Arhitectura RSD

4.2.3 Arhitectura RS

Cea de-a doua rețea a sistemului neuronal conceput pentru detecția fisurii în semifabricat la turnarea continuă, și anume, **RS**, este tot o rețea neuronală artificială de tip perceptron multistrat ca și în cazul RSD prezentată în subcapitolul 4.2.2.

Alegerea intrărilor

Intrările RS sunt de tip analogic. RS primește ca intrări valorile de ieșire de la doua rețele RSD, pentru a recunoaște relația dintre senzorii adiacenți de pe același rând. Cum rețelele RSD furnizează la ieșire un rezultat în intervalul $[0,1]$, rezultă că RS vor avea datele de intrare situate în același interval $[0,1]$ **[Tir09_4],[Tir09_5]**.

Valoarea de intrare provenită de la o rețea RSD (de la ieșirea acesteia) este aplicată spre eșantionare celor 6 buffere și reținută de 6 unități de stocare. Valoarea maximă furnizată de cele 6 unități de stocare este introdusă în nivelul de intrare al RS.

Aceasta valoare maximă este introdusă în nivelul de intrare, pentru a corecta timpul de propagare a fisurii în crusta pentru senzorii adiacenți. Nivelul de intrare al RS este format din 2 neuroni **[Tir09_4]**.

Alegerea ieșirilor

Nivelul de ieșire al RS este format dintr-un singur neuron și furnizează o alarmă de detecție a unei fisuri atunci când valoarea de ieșire depășește o valoare limită predeterminată.

Rezultatul prezentat la ieșirea rețelei va fi:

- 0** – în cazul în care **nu există fisură**;
- 1** – pentru cazul **detectării fisurii în fir**.

Determinarea numărului de straturi ascunse și de neuroni pe strat ascuns

Pentru a determina numărul de straturi ascunse, precum și numărul de neuroni pe strat, s-au realizat diverse experimente. S-a testat cazul cu 2 straturi ascunse, dar timpul de antrenament a crescut foarte mult, iar acuratețea rețelei a fost foarte mică. Următorul pas a fost alegerea unui singur strat ascuns și determinarea numărului de neuroni. Și aici au apărut probleme care au condus la o eroare mare în recunoașterea tiparelor de intrare. În urma mai multor experimente s-a ajuns la concluzia că un singur strat ascuns, care conține 4 neuroni oferă atât un timp de antrenament redus, cât și o eroare egală cu zero.

În ceea ce privește alegerea algoritmului de antrenament pentru RS concepută s-a utilizat metoda *Levenberg – Marquardt* [Hag94]. Acest algoritm este mai eficient decât alte tehnici de antrenare atunci când rețeaua neuronală nu este una complexă, iar vectorii de antrenament nu au dimensiuni mari, așa cum este și cazul RS. Oportunitatea utilizării algoritmului LM în cadrul aplicației curente constă în faptul a asigurat o convergență rapidă, în comparație cu alți algoritmi testați.

Ca funcții de activare s-au utilizat funcțiile: *Hyperbolic tangent sigmoid transfer function* și *Logarithmic sigmoid transfer function*, alegerea acestor tipuri de funcții s-a făcut din considerente similare cu cele de la alegerea funcției de activare pentru RS.

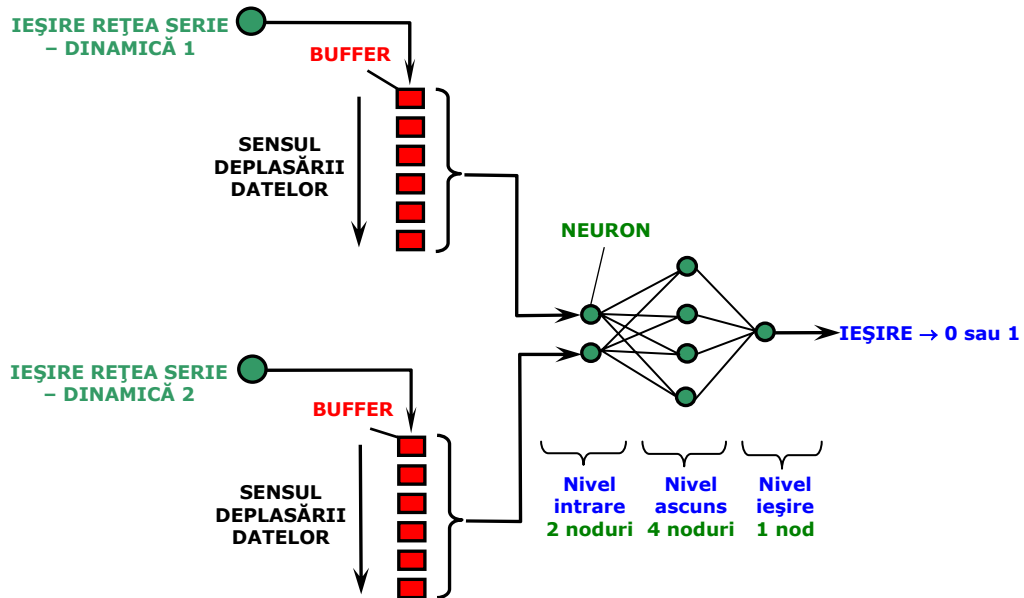


Fig. 4.14 Arhitectura RS

Ținând cont de cele menționate, arhitectura **RS** concepută are următoarele caracteristici (fig. 4.14):

- este o rețea perceptron multistrat (RNA-MLP, Multilayer Perceptron);
- nivelul de intrare este alcătuit din 2 neuroni. Datele de intrare reprezintă valorile de ieșire de la două RSD. Valoarea de intrare provenită de la o RSD (de la ieșirea acesteia) este aplicată spre eșantionare la 6 buffere și reținută de 6 unități de stocare. Valoarea maximă furnizată de cele 6 unități de stocare este introdusă în nivelul de intrare al RS.
- are un singur nivel ascuns format din 4 neuroni;
- nivelul de ieșire are un singur neuron, care returnează valoarea 0 - pentru inexistența fisurii sau 1 - pentru apariția acesteia;
- algoritmul de antrenament este bazat pe metoda Levenberg - Marquardt.
- funcțiile de activare utilizate sunt: *Hyperbolic tangent sigmoid transfer function* și *Logarithmic sigmoid transfer function*.

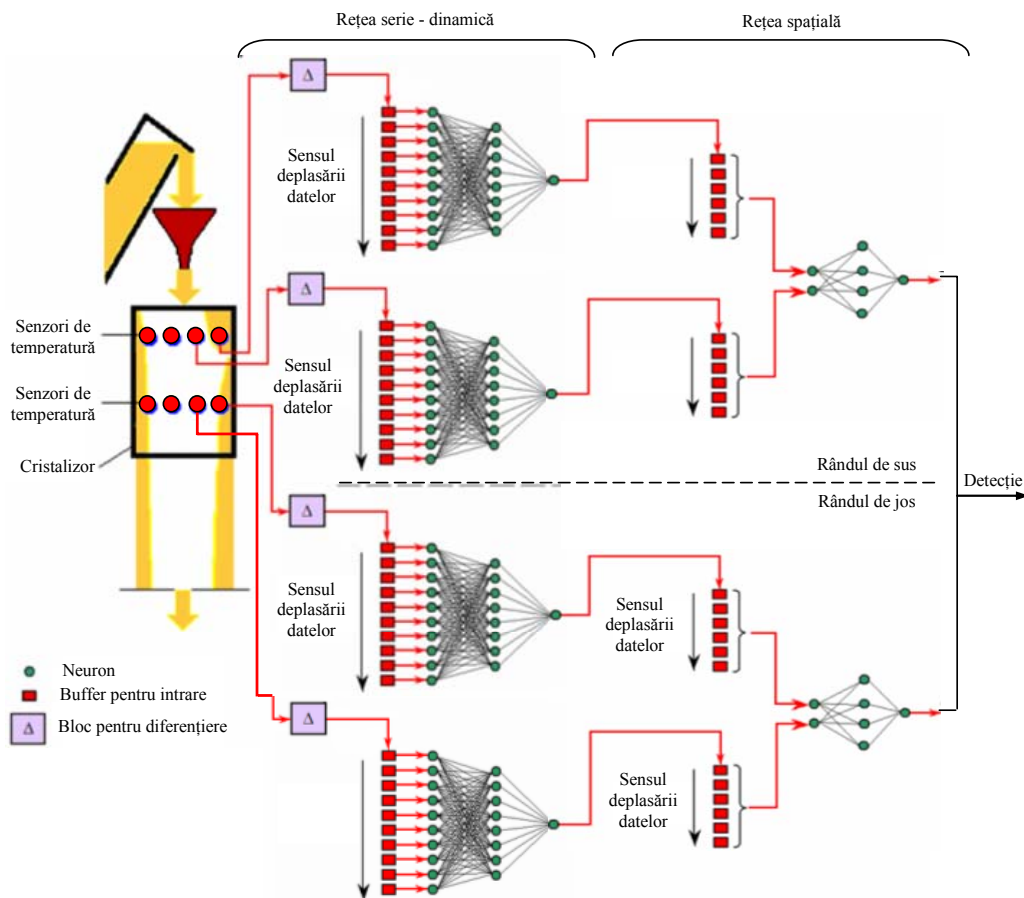


Fig. 4.15 Structura sistemului multi-neuronal pentru detecția fisurii

Arhitectura sistemului neuronal pentru detecția fisurilor propus, este prezentată în fig.4.15 având ca și caracteristici esențiale:

- dispunerea senzorilor de temperatură pe cristalizor este sub forma unei matrici cu 12 rânduri, pe fiecare rând având câte 4 senzori de temperatură;
- pentru recunoașterea variațiilor de temperatură înregistrate de senzori se folosește RSD, cu un număr de 10 intrări, un nivel ascuns format din 8 neuroni și un start de ieșire cu un singur neuron. Numărul RSD se calculează cu relația:

$$NR_RSD = NR_STRATURI * NR_SENZ_PE_STRAT \quad (4.1)$$

unde,

NR_RSD – numărul RSD;
 NR_STRATURI – numărul de straturi de senzori, care este egal cu 12;
 NR_SENZ_PE_STRAT – numărul de senzori pe strat, care este egal cu 4;

Se obține astfel un număr de **48 RSD**.

- pentru recunoașterea distribuției spațiale a temperaturii se utilizează RS, cu un număr de 2 intrări, un nivel ascuns format din 4 neuroni și un start de ieșire cu un singur neuron, care furnizează un rezultat în ceea ce privește existența (1) sau inexistența fisurii (0). Numărul RS se calculează cu formula (4.2):

$$NR_{RS} = (NR_{STRATURI} - 1) * (NR_{SENZ_PE_STRAT} - 1) \quad (4.2)$$

unde,

NR_RS – numărul rețelelor spațiale;
 NR_STRATURI – numărul rețelelor serie – dinamică, care este egal cu 48;
 NR_SENZ_PE_STRAT – numărul de senzori pe strat, care este egal cu 4;
 Se obțin astfel un număr de **33 RS**.

4.3. Implementarea sistemului multi-neuronal

Deși latura teoretică a RNA a ajuns la un anumit grad de maturitate, implementarea rețelelor neuronale rămâne în continuare un subiect deschis.

4.3.1 Preliminarii

Implementarea software este fără îndoială cea mai răspândită modalitate de realizare a unei RNA. Avantajele acestei soluții sunt legate de facilitatea și flexibilitatea acestei implementări. Facilitatea este justificată prin existența rutinelor cu care pot fi realizate majoritatea arhitecturilor RNA.

Mediul MATLAB, prin setul de funcții predefinite, pune la dispoziția utilizatorului un mijloc rapid de dezvoltare a aplicațiilor cu RNA. Se remarcă în acest caz disponibilitatea unui număr impresionant de algoritmi de antrenament pentru majoritatea tipurilor de RNA, precum și gradul avansat de optimizare al acestor rutine [Cri10]. Se obține astfel un cod sursă eficient din punct de vedere al lungimii și vitezei de execuție, având în vedere faptul că MATLAB-ul este orientat spre lucrul cu matrici, iar aceste operații sunt intensiv utilizate de către RNA [Bea94].

O altă soluție viabilă de implementare software o reprezintă limbajul C/C++. Codul sursă rezultat este mai lung și mai complicat de scris decât în cazul MATLAB dar, în general, viteza de execuție este superioară în acest caz [Mas93],[Hym96].

Există și medii software dedicate în exclusivitate implementării RNA, un exemplu în acest sens fiind mediul "Neurosolutions" al firmei Neurodimension Inc., [***_1]. Acesta reprezintă un mediu de simulare orientat pe obiect destinat sistemelor neuronale distribuite și se remarcă printr-un control direct și permanent

(chiar și în timpul antrenării unei rețele) a parametrilor aferenți unei aplicații cu RNA. Produsul pune la dispoziție, prin intermediul unei interfețe grafice, blocuri elementare care combinate generează diverse arhitecturi neuronale.

Implementarea software prezintă dezavantajul unei viteze de execuție mai scăzute, în schimb este mai flexibilă decât cea hardware. Cu ajutorul implementării software se urmărește optimizarea arhitecturii RNA (număr de straturi ascunse, număr de neuroni/strat, forme ale funcțiilor de activare, algoritmi de antrenament), fiind încurajată în această fază experimentarea diverselor soluții. În final, după ce a fost definitivată structura rețelei și se declară încheiat procesul de antrenament se poate transfera RNA, eventual, funcție de aplicație (în special valorile ponderilor) într-o structură hardware [Fau94] .

Implementarea hardware conferă viteză mărită față de metodele software, dar ridică o serie de probleme care fac ca implementarea să fie mai dificilă. Principalele metode de implementare hardware sunt: metode electronice (analogice, digitale, mixte) și metode optice [Fau94].

4.3.2 Implementarea software a sistemului multi-neuronal pentru detecția fisurilor din semifabricat la turnarea continuă

În cazul sistemului multi-neuronal realizat pentru detecția fisurii la turnarea continuă s-a preferat să se utilizeze ca mediu de implementare, mediul MATLAB [Bea94], datorită facilităților expuse anterior. Programele care realizează implementarea software a fiecărei rețele neuronale în parte, precum și antrenarea acestora, adică a RSD, respectiv RS, programele utilizate pentru generarea datelor de antrenament și programul pentru implementarea și testarea întregului sistem neuronal, sunt prezentate în **ANEXA 3**.

În urma proiectării arhitecturii sistemului neuronal (paragrafele 4.2.2, și 4.2.3), s-au obținut un număr de 48 de RSD și 33 de RS. Ținând cont de faptul că RSD au o structură de 10x8x1 neuroni, iar RS o structură de 2x4x1 neuroni, sistemul obținut este unul complex. În urma încercărilor efectuate, antrenarea sistemului alcătuit din cele 81 de rețele a durat relativ mult, iar setul de date de antrenament a fost insuficient pentru antrenarea corectă a sistemului [**Tir08_2**].

Analizând diagrama variațiilor de temperatură atât pentru RSD, cât și pentru RS se observă că, în cazul RSD diagramele de variație sunt aproximativ asemănătoare pentru toate cele 48 de rețele, iar în cazul RS, diagramele sunt aproximativ identice pentru toate cele 33 de rețele. Din aceste motive antrenarea sistemului se poate reduce la antrenarea fiecărui tip de rețea neuronală în parte [**Tir08_2**].

În cazul achiziției datelor de intrare pentru RSD de la senzorii de temperatură montați pe peretele cristalizorului, prin diferențierea acestora s-au obținut diagramele de variație a temperaturii, pentru cazul inexistenței fisurii, Fig.4.16, cât și pentru cazul existenței acesteia, Fig.4.17.

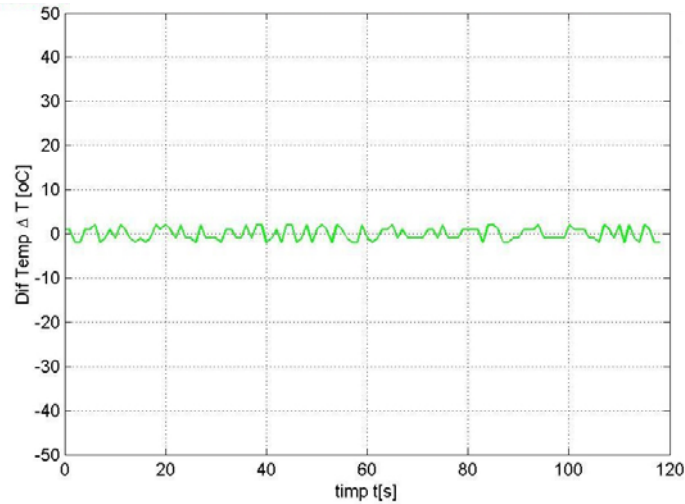


Fig. 4.16 Diagrama variației de temperatură pentru intrarea în RSD în cazul inexistenței fisurii

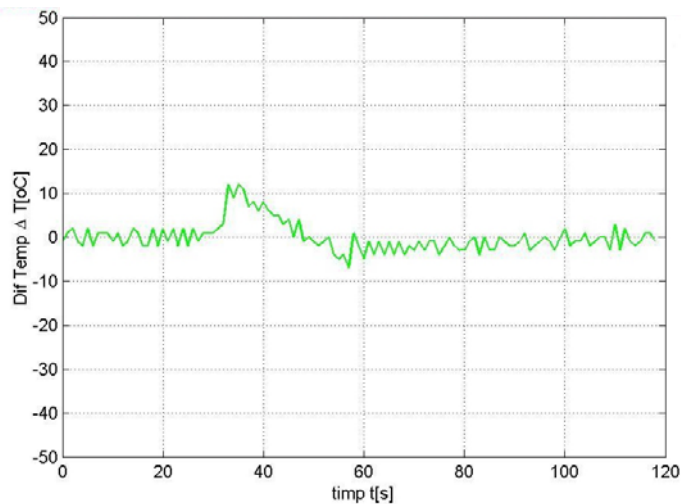


Fig. 4.17 Diagrama variației de temperatură pentru intrarea în RSD în cazul existenței fisurii

Datorită faptului că diagramele de variație a temperaturii care constituie intrări în toate RSD, au aproximativ aceeași formă de variație este suficient să se antreneze o singură RSD, celelalte fiind practic identice cu rețeaua antrenată. Astfel, timpul necesar antrenării rețelei se reduce mult (câteva minute). Datele pentru antrenarea rețelei pot acoperi în această situație toate cazurile necesare pentru antrenarea corectă a rețelei [Tir09_4].

Programul de antrenare pentru RSD (realizat în Matlab) a fost numit **Antrenare_RNA_1**.

În continuare a fost definită arhitectura rețelei, adică numărul de neuroni din stratul de intrare = 10, numărul de neuroni ascunși = 8 și numărul de neuroni din stratul de ieșire = 1. S-a definit numărul de coloane ale matricilor de intrare, respectiv ieșire ca fiind egal cu 330. Următoarea etapă a programului constă în generarea datelor de intrare și de ieșire. Se verifică dacă aceste date au fost deja generate, iar dacă răspunsul este afirmativ ele se încarcă direct de pe HDD. În cazul în care aceste date nu au fost generate încă, ele se generează prin lansarea automată în execuție a scripturilor corespunzătoare.

După ce datele au fost încărcate, se definește RSD și toți parametrii corespunzători. Astfel, *rata de învățare* $\eta = 10e-3$, *momentum* $\alpha = 0.01$, *min_grad* = $1e-16$, *numărul de epoci* = 5000, iar *goal* = 0.001. De asemenea s-au specificat funcțiile de activare ca fiind: 'tansig' și 'logsig', precum și algoritmul de antrenament: *trainscg*.

Următorul pas contă în specificarea modului în care se va face antrenarea, tipul rețelei care urmează să fie antrenată, numele variabilelor de intrare și numele variabilelor de ieșire pentru rețea.

Inițial, antrenarea RSD s-a făcut folosind algoritmul *Gradient descent with momentum backpropagation* [Mol93],[Bal95] (fig. 4.18). În acest caz, diferența dintre valoarea de ieșire a rețelei neuronale și ieșirea dorită, de 0,001, nu a fost atinsă nici după trecerea celor 5000 de epoci de antrenament, motiv pentru care s-a utilizat un algoritm de antrenament mai rapid.

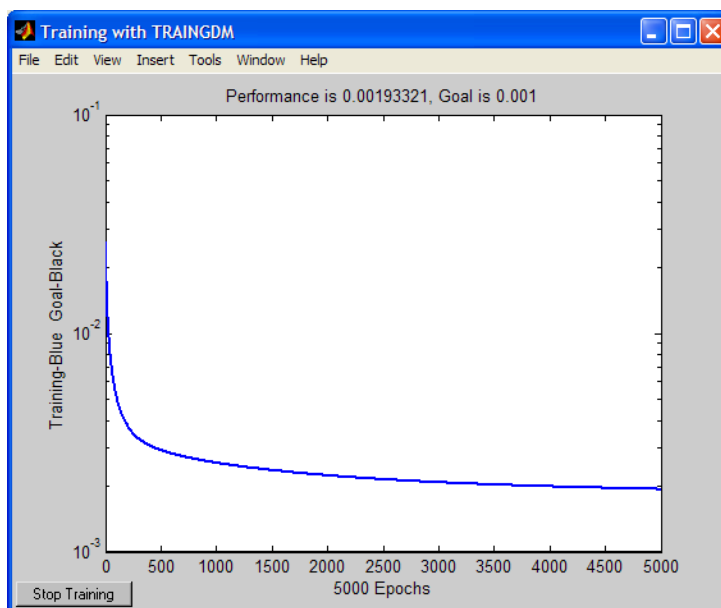


Fig. 4.18. Antrenarea RSD folosind algoritmul *Gradient descent with momentum backpropagation*

În Fig. 4.19 este prezentat rezultatul procesului de antrenare al RSD, folosind algoritmul de antrenament *Scale conjugate gradient* [Cha92]. Se observă că diferența dintre valoarea de ieșire a rețelei neuronale și ieșirea dorită, de 0.001, s-a atins pentru un număr de epoci egal cu 76, mult mai mic decât cel indicat în program, și anume, 5000.

Testând rețeaua antrenată cu un nou set de date, aceasta a recunoscut apariția fisurii în proporție de 100%, precum și cazurile în care nu a existat fisură.

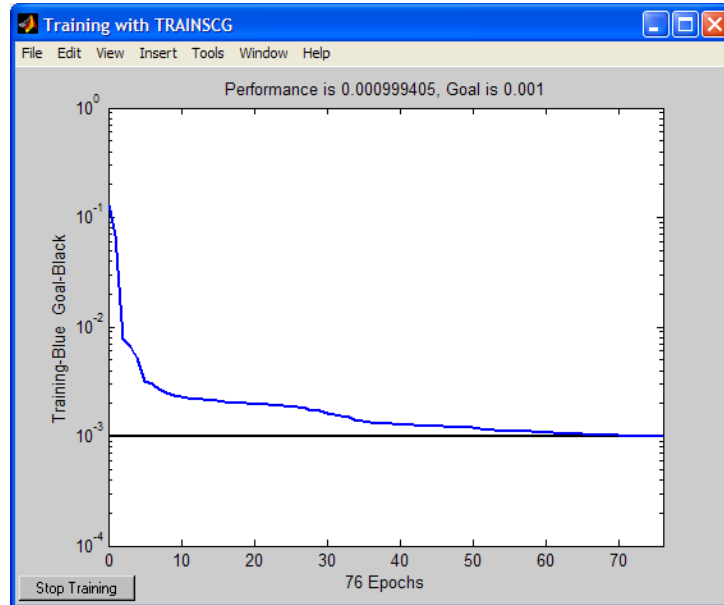


Fig. 4.19. Antrenarea RSD folosind algoritmul *Scale conjugate gradient backpropagation*

Datele de intrare pentru RS sunt situate în intervalul $[0,1]$ și provin de la ieșirile RSD aferente. Ca urmare, se constată că toate RS au aproximativ aceeași formă de variație a datelor de intrare. Astfel, se poate antrena o singură rețea spațială, restul rețelelor fiind practic identice cu rețeaua antrenată.

Programul de antrenare pentru RS (realizat în Matlab) a fost numit **Antrenare_RNA_2**.

În continuare a fost definită arhitectura rețelei, adică numărul de neuroni din stratul de intrare = 2, numărul de neuroni ascunși = 4 și numărul de neuroni din stratul de ieșire = 1. De asemenea, s-a definit numărul de coloane ale matricelor de intrare, respectiv ieșire ca fiind egal cu 200. Următoarea etapă a programului constă în generarea datelor de intrare și a celor de ieșire. Se verifică dacă aceste date au fost deja generate, iar în caz afirmativ ele se încarcă direct de pe HDD. În cazul în care aceste date nu au fost generate încă, ele se generează prin lansarea automată în execuție a scripturilor corespunzătoare.

După ce datele au fost încărcate, se definește RS și toți parametrii corespunzători. Astfel, *rata de învățare* $\eta = 10e-3$, *momentum* $\alpha = 0.01$, *min_grad* = $1e-16$, *numărul de epoci* = 10000, iar *goal* = 0.001. De asemenea s-au specificat funcțiile de activare ca fiind: '*tansig*' și '*logsig*', precum și algoritmul de antrenament: *trainlm*.

Următorul pas constă în specificarea modului în care se va face antrenarea, adică au fost specificate rețeaua care urmează să fie antrenată, numele variabilelor de intrare și numele variabilelor de ieșire pentru rețea.

Inițial, antrenarea RS s-a făcut folosind algoritmul *Gradient descent with momentum* [Mol93],[Bal95] (fig. 4.20). În acest caz, diferența dintre valoarea de ieșire a rețelei neuronale și ieșirea dorită, de 0,001, nu a fost atinsă nici după trecerea celor 10000 de epoci de antrenament, motiv pentru care s-a utilizat un algoritm de antrenament mai rapid.

În Fig. 4.21 este prezentat rezultatul procesului de antrenare al RS, folosind algoritmul de antrenament *Levenberg - Marquardt backpropagation*. Se observă că diferența dintre valoarea semnalului de ieșire a rețelei și valoarea semnalului impus, de 0.001, s-a atins pentru un număr de epoci egal cu 11, mult mai mic decât cel indicat în program, și anume, 10000.

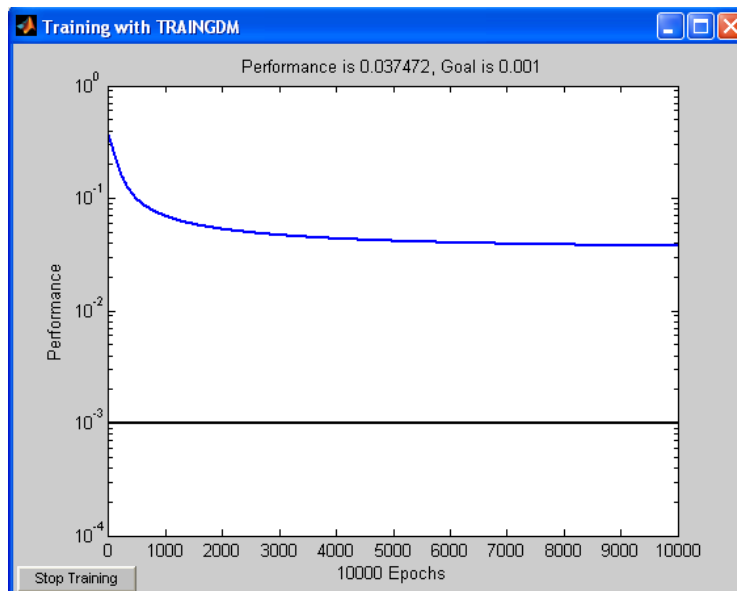


Fig. 4.20. Antrenarea RS folosind algoritmul *Gradient descent with momentum backpropagation*

Testând și RS antrenată cu un nou set de date, aceasta a recunoscut apariția fisurii în proporție de 100%, precum și cazurile în care nu a existat fisura.

Testarea sistemului neuronal propus pentru detecția fisurilor în semifabricat la turnarea continuă s-a realizat cu ajutorul scriptului "**Testare sistem neuronal**" (realizat în Matlab). Au fost inițializate variabilele utilizate: numărul de eșantioane de temperatură, numărul de senzori pe strat, numărul de straturi de senzori, numărul de rețele direct conectate la ieșire, numărul de RSD și RS. S-a definit arhitectura fiecărei rețele neuronale, adică numărul de neuroni pe statul de intrare, numărul de neuroni pe nivelul ascuns și pe cel de ieșire. După ce toate inițializările au fost realizate s-a trecut la generarea și încărcarea tiparelor de antrenament. Aceasta s-a făcut analog antrenării separate a celor două rețele, adică s-au căutat pe HDD datele respective. Dacă ele au fost găsite atunci au fost încărcate direct, dacă nu, au fost generate.

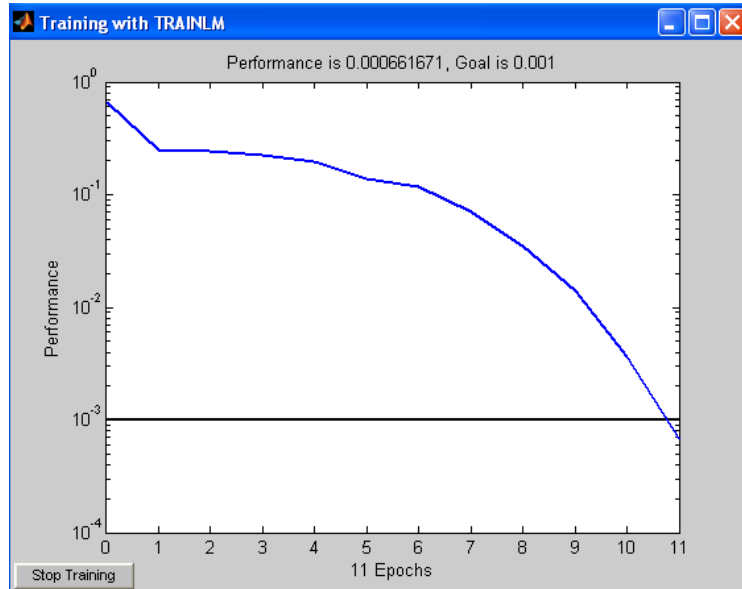


Fig. 4.21. Antrenarea RS folosind algoritmul *Levenberg - Marquardt backpropagation*

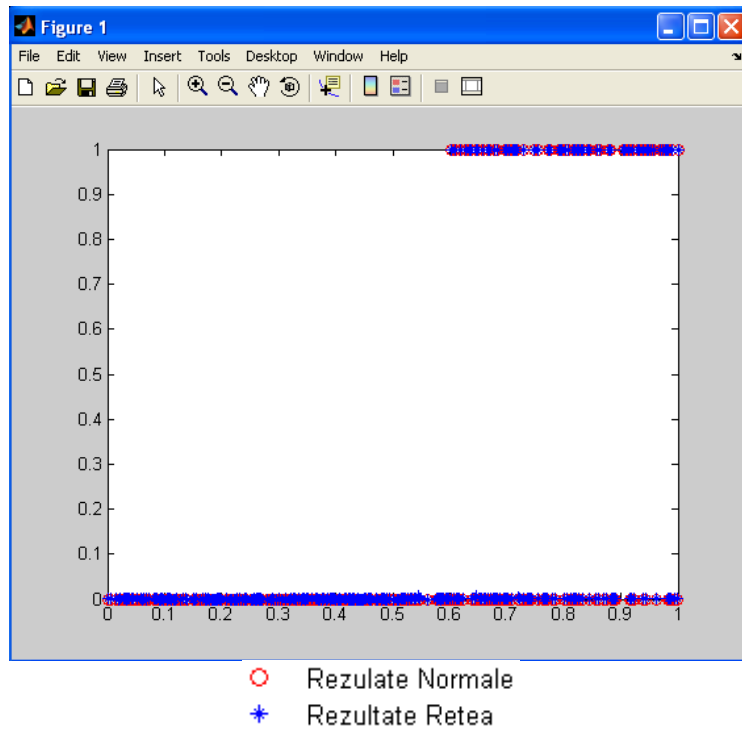


Fig. 4.22 Testarea sistemului neuronal propus

Următoarea etapă a constat în implementarea RSD și RS (asemănător fazei de antrenare descrisă anterior), după care a urmat antrenarea acestora. Odată terminată antrenarea rețelelor, întregul sistem neuronal a putut fi testat. Acesta a recunoscut în proporție de 100% toate datele care i-au fost aduse la intrare (Fig.4.22).

Implementarea software a sistemului este prezentată în **Anexa 3**.

4.4 Date de intrare pentru RSD și RS concepute.

4.4.1. Date de intrare pentru RSD

Determinări experimentale în vederea obținerii datelor de intrare pentru RSD

În vederea obținerii datelor de intrare pentru RSD s-au efectuat măsurători experimentale asupra procesului de turnare continuă de la AM-HD. Instalația de Turnare Continuă din cadrul Secției „Turnare Continuă” de la AM-HD este o instalație de turnare concepută și realizată de firma Manesman și cuprinde cinci fire pentru turnat țagle pentru țevi cu diametrul ϕ 150mm, ϕ 180mm, sau blumuri pentru relaminare cu dimensiunile de 240 x 240mm[***95].

Cristalizadorul reprezintă partea cea mai importantă a instalației de turnare continuă datorită construcției, a conductibilității termice, a preciziei de prelucrare și de asamblare, toate acestea având o influență majoră în obținerea unei productivități maxime și a unei calități superioare a semifabricatelor. Acesta constituie elementul pe care s-au realizat determinările experimentale prezentate în cadrul acestui subcapitol.

Cristalizadorul cu care funcționează momentan instalația este cel pentru turnarea continuă a semifabricatelor 240 x 240mm. Caracteristicile tehnice ale cristalizadorului sunt: lungimea 700 mm; raza de turnare 10000 mm; debit maxim al apei de răcire 123 m³/h pentru un fir; grosimea peretelui 12 mm[***95],[***98].

În Fig.4.23 este prezentat cristalizadorul din cadrul instalației de turnare continuă pe care s-au realizat determinările experimentale.



Fig.4.23 Cristalizadorul din cadrul instalației de turnare continuă pe care s-au realizat determinările experimentale

Cristalizorul are pereți dubli (Fig.4.24) iar între aceștia sunt prevăzute canale prin care circulă apa de răcire. În Fig.4.25 se prezintă circuitul apei de răcire în exteriorul cristalizorului, iar în Fig.4.26 circuitul apei de răcire în interiorul cristalizorului.

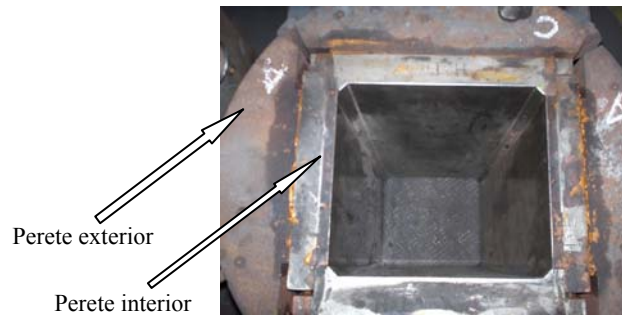


Fig.4.24 Cristalizor cu pereți dubli



Fig.4.25 Circuitul apei de răcire în exteriorul pereților cristalizorului

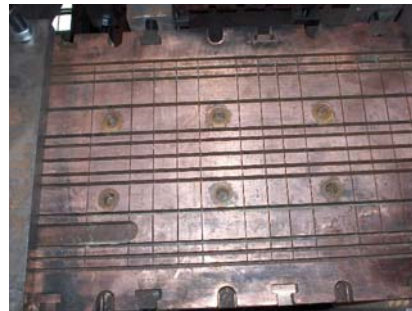


Fig.4.26 Circuitul apei de răcire în interiorul pereților cristalizorului

În vederea realizării determinărilor experimentale se efectuează un program de măsurători, care are ca scop determinarea datelor de intrare pentru RSD concepută. Acest program cuprinde următoarele etape:

- pregătirea măsurătorilor, alegerea aparatelor, a senzorilor de temperatură, a materialelor și a accesoriilor necesare efectuării determinărilor experimentale;
- stabilirea condițiilor concrete de efectuare a măsurătorilor în incinta halei de la secția „Turnare Continuă”;
- montarea senzorilor de temperatură pe peretele cristalizorului;
- efectuarea determinărilor experimentale și prelucrarea rezultatelor;
- obținerea datelor de intrare pentru RSD.

În vederea efectuării măsurătorilor experimentale se realiza desfacerea pereților dubli ai cristalizorului și montarea pe fațada interioară a peretelui interior a cristalizorului a unor senzori pentru măsurarea temperaturii (termorezistențe). La montarea senzorilor de temperatură trebuie să se țină cont de faptul că fațada interioară a peretelui interior al cristalizorului este străbătută de canale prin care circulă apa de răcire, ceea ce a conduce la dificultăți de amplasare. Distanța de la

canalul de apă la senzorii de temperatură, atât pe verticală cât și pe orizontală, trebuie să fie aceeași pentru toți senzorii, astfel se întocmesc plane de operații și se efectuează măsurători în vederea amplasării senzorilor de temperatură pe peretele cristalizorului. În Fig. 4.27 se prezintă schema de amplasare a senzorilor de temperatură pe peretele cristalizorului.

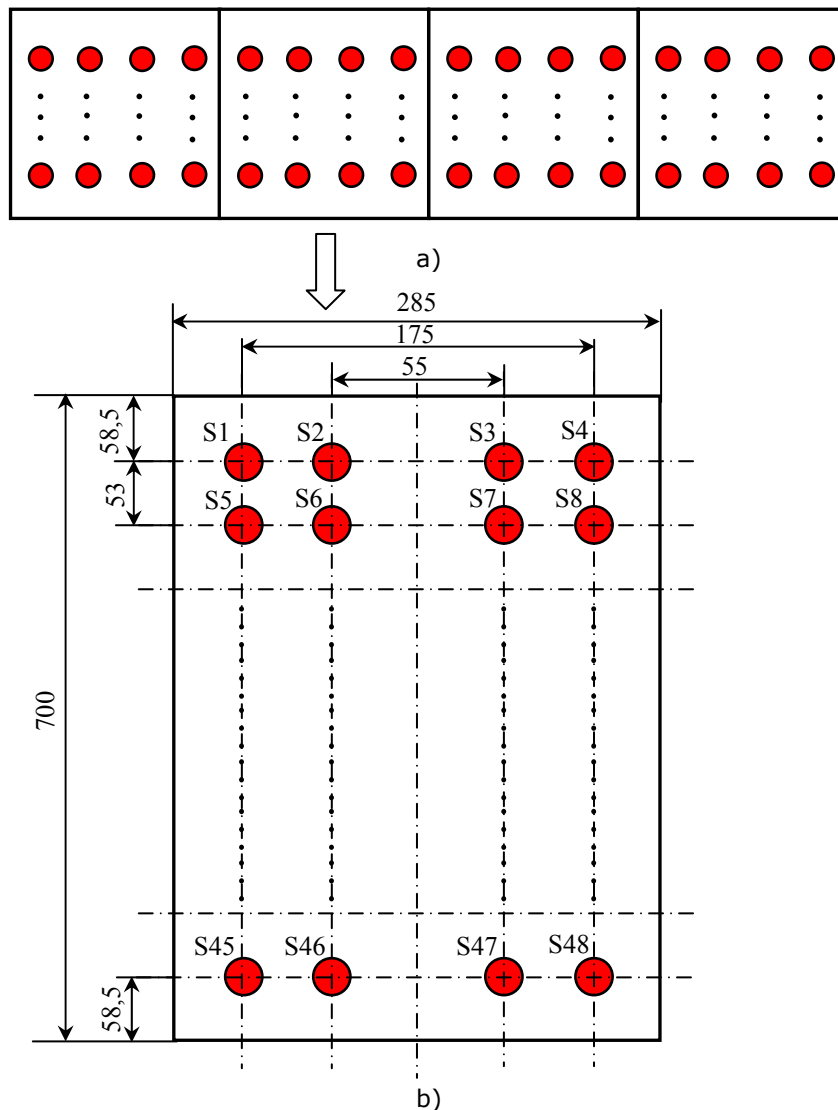


Fig.4.27 Amplasarea senzorilor de temperatură

a) Cristalizor desfășurat;

b) Schema de amplasare a senzorilor de temperatură pe fațada interioară a peretelui interior

● Senzor de temperatură

În cadrul prezentei teze, pentru măsurarea variațiilor de temperatură din cristalizor s-au montat 8 senzori de temperatură (termorezistențe), de tipul Pt 1000 care corespund așezării senzorilor din coloanele 2 și 3 - Fig.4.27. S-a considerat că un număr de 8 senzori este suficient pentru obținerea unor informații despre modul de variație a temperaturii în cristalizor. După montarea senzorilor pe peretele cristalizorului, aceștia au fost conectați la sistemul de achiziții de date ICP CON, format dintr-un modul Data Acquisition Module ICP CON 7017 și un modul Ethernet Communication ICP CON 7188, acesta este prezentat în Fig. 4.28. În Fig.4.29 se prezintă sistemul de achiziții de date în timpul realizării măsurărilor.



Fig. 4.28 Sistemul de achiziții de date ICP CON

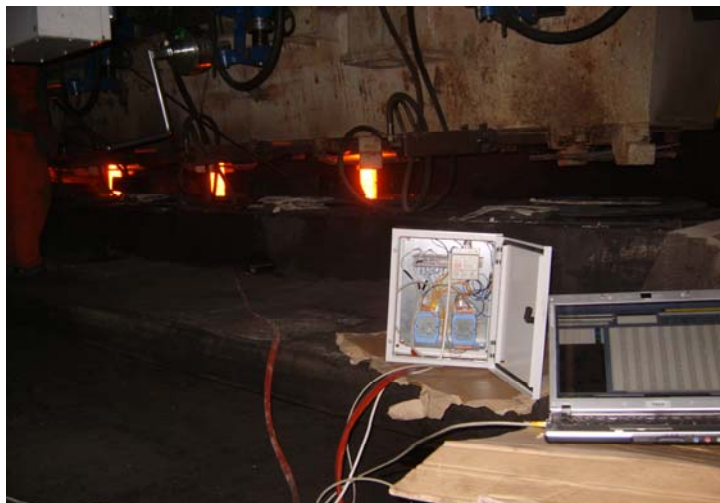


Fig. 4.29 Sistemul de achiziții de date în timpul realizării măsurărilor

S-au înregistrat temperaturile furnizate de către fiecare senzor cu un pas de eșantionare egal cu 1 secundă. Înregistrarea datelor s-a până în momentul apariției unei fisuri. Datele au fost preluate la diferite momente temporale ale procesului de turnare continuă: faza de început a turnării (Fig. 4.30), la 10 de minute de la începutul turnării (Fig.4.31) și la 20 de minute de la începutul turnării, moment în care a apărut fisura (Fig.4.32).

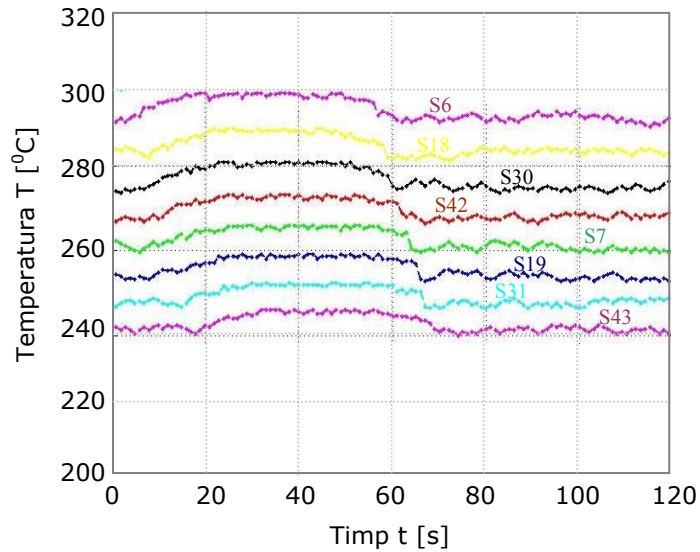


Fig. 4. 30 Diagrama de variație a temperaturii măsurată de cei 8 senzori, în momentul începerii turnării

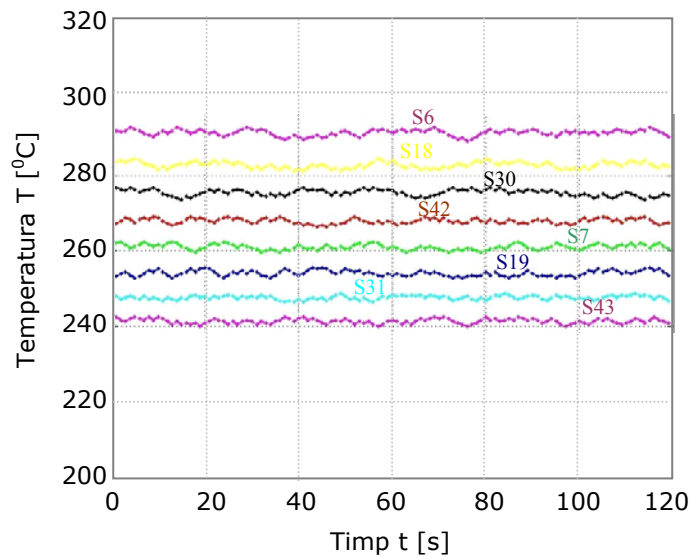


Fig. 4.31 Diagrama de variație a temperaturii măsurată de cei 8 senzori, la 10 minute de la începutul turnării

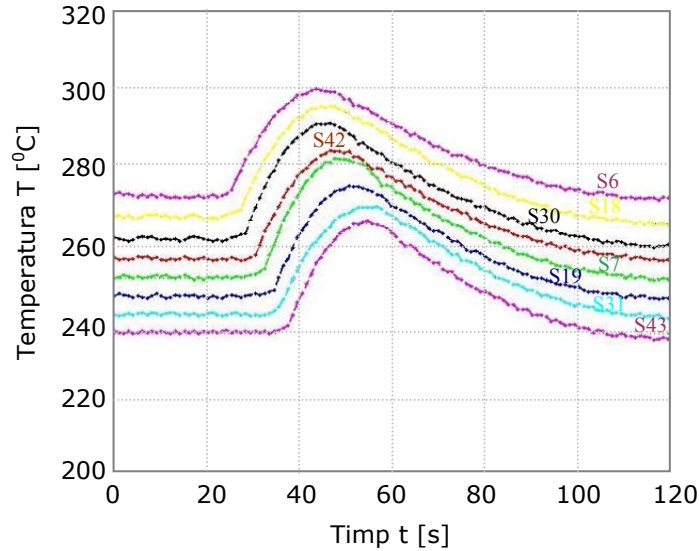


Fig. 4.32 Diagrama de variație a temperaturii măsurată de cei 8 senzori, la 20 de minute de la începutul turnării, moment în care a apărut fisura

În cazul apariției fisurii (Fig. 4.32) se observă că temperatura crește mult, pentru ca după ce atinge o valoare maximă să scadă asimptotic sub valoarea normală.

Datele de intrare pentru RSD (variația temperaturii furnizate de către senzori) sunt obținute prin diferențiere. Aceasta constă în memorarea creșterii temperaturii de la momentul de timp t_2 față de temperatura de la momentul de timp t_1 , unde $t_2 = t_1 + 1$ [s]. Antrenarea și testarea rețelei necesită un număr mult mai mare de date decât cele măsurate, motiv pentru care s-a impus necesitatea realizării unor programe care să genereze acest tip de variații (diferențiate) pentru a fi aplicate la intrarea RSD.

S-au generat două variabile, pentru stocarea datele de intrare ("In.m") respectiv a datelor de ieșire ("Out.m"), sub forma a două matrici (Tabelul 4.1):

Tabelul 4.1

Nume Variabilă	Nume Matrice	Dimensiune
In.m	Pantr1	10 x n
Out.m	Tantr1	1 x n

unde n reprezintă numărul de coloane ale celor două matrici.

Diagrama variației de temperatură a fost eșantionată cu un pas egal cu 1, fiind preluate date corespunzătoare atât cazului în care fisura este inexistentă, (Fig.4.33), cât și cazului în care ea există (Fig. 4.34).

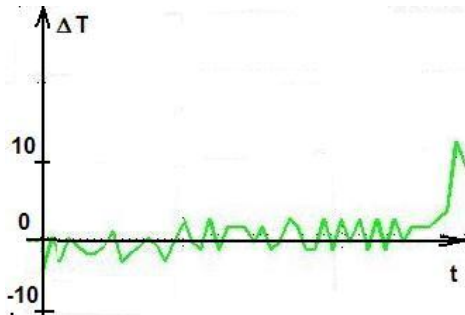


Fig.4.33 Eșantionarea diagramei de variație a temperaturii în cazul inexistenței fisurii

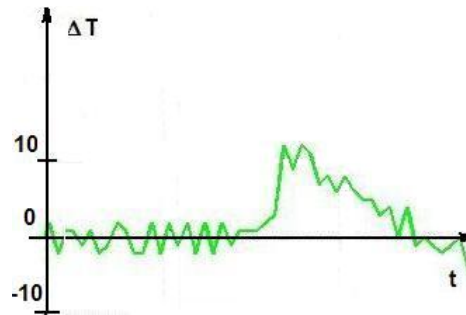


Fig.4.34 Eșantionarea diagramei de variație a temperaturii în cazul existenței fisurii

La intrarea RSD s-au aplicat succesiv seturi de câte 10 valori, pentru fiecare set programul a generat pentru variabila de ieșire a RSD răspunsul dorit. Astfel s-a realizat scalarea datelor de intrare, prezentată în Tabelul 4.2:

Tabelul 4.2

Date intrare (x_i)	Date ieșire (y_i)
$\max x_i \leq 0$	0
$\max x_i \in (0, 10)$	$x_i/10 \Rightarrow x_i = 0.1 \dots 0.9$
$\max x_i \geq 10$	1

S-a considerat că peste o anumită valoare limită impusă ($y_i = 0.6$), RSD trebuie să recunoască apariția fisurii. Testând rețeaua cu diverse serii de date reale corespunzătoare existenței fisurii, precum și a inexistenței acesteia, (date măsurate în cadrul procesului industrial), rețeaua a recunoscut cu o precizie de 100% toate cazurile care i-au fost aduse la intrare.

În Tabelul 4.4 sunt prezentate câteva exemple de date de la intrarea RSD, precum și rezultatele pe care aceasta ar trebui să le furnizeze la ieșire. Aceste date au fost simulate în MATLAB cu ajutorul scripturilor și funcțiilor din Tabelul 4.3:

Tabelul 4.3

Nume Funcție	Utilizare
Antrenare_RNA_1.m	Scriptul se utilizează pentru antrenarea și testarea rețelei serie - dinamică.
Date_Ant_RNA_1.m	Funcția se utilizează pentru generarea datelor de intrare și de ieșire corespunzătoare rețelei serie - dinamică, precum și pentru setarea unor parametri necesari simulării procesului
DifRowGen.m	Funcția se utilizează pentru realizarea diferențierii temperaturilor furnizate de senzorii de temperatură

Nume Funcție	Utilizare
FirstRowGen.m	Funcția se utilizează pentru generarea unor date pentru primul rând de senzori în anumite situații.
FisuraRowGen.m	Funcția se utilizează pentru generarea datelor pentru toate rândurile unde s-a sesizat fisura.
In_Out.m	Funcția se utilizează pentru generarea datelor de intrare și ieșire corespunzătoare rețelei serie - dinamică, precum și pentru realizarea scalării și salvării datelor în cele două variabile.
NormRowGen_dupa_t.m	Funcția se utilizează pentru generarea datelor pentru toate rândurile în cazul inexistenței fisurii.

Codul sursă pentru aceste scripturi și funcții este prezentat în **ANEXA 3**.

Tabelul 4.4

Date Intrare (seturi de câte 10)	3	1	3	-1	-1	3
	1	3	2	-1	2	1
	3	2	2	2	1	2
	2	2	3	1	2	4
	2	3	1	2	3	8
	3	1	1	3	11	7
	1	1	1	11	9	7
	1	1	1	9	10	6
	1	1	0	10	8	7
	1	0	-1	8	7	8
Rezultat RNA 1	0.3	0.3	0.3	1.0	1.0	0.8

Pentru antrenarea RSD s-au utilizat 330 de seturi de date, dintre care 20 pentru cazul existenței fisurii, iar restul pentru cazul inexistenței acesteia.

Antrenarea s-a încheiat când diferența dintre valoarea semnalului de ieșire a rețelei neuronale și semnalul dorit a fost ≤ 0.001 pentru fiecare set de date, sau atunci când calculul convergenței iterative atinge 5000 de epoci.

4.4.2 Date de intrare pentru RS

Datele de intrare pentru RS sunt alcătuite din datele de ieșire de la două RSD corespunzătoare. Cum rezultatul acestor rețele este un număr în intervalul $[0,1]$ rezultă că și datele de intrare pentru RS sunt situate în același interval.

RS are la intrare două noduri. Una dintre valorile de intrare provenită de la ieșirea unei RSD este aplicată în vederea eșantionării celor 6 buffere și reținută în 6 unități de stocare. Valoarea maximă furnizată de cele 6 unități de stocare este introdusă în nivelul de intrare al rețelei spațiale.

Cunoscând modul cum arată în realitate datele de intrare pentru cea de-a II-a rețea neuronală (se cunoaște diagrama de variație a datelor de ieșire din RSD), se poate realiza o simulare a unui număr mult mai mare de date decât în cazul real,

date care vor fi folosite pentru antrenarea unei singure RS.

Au fost generate două variabile în care au fost stocate datele de intrare ("Pin.m"), respectiv cele de ieșire ("Tout.m"), sub forma a două matrici, după cum urmează: (Tabelul 4.5)

Tabelul 4.5

Nume Variabilă	Nume Matrice	Dimensiune
Pin.m	Pantr2	2 x n
Tout.m	Tantr2	1 x n

unde **n** reprezintă numărul de coloane ale celor două matrici care a rezultat din program.

Au fost generate aleator numere în intervalul [0,1]. Cum rețeaua are doar doi neuroni la intrare, rezultă că este nevoie de o matrice care să aibă doar două linii. Pentru generarea răspunsului rețelei funcție de datele de intrare aplicate, s-a procedat în modul următor: în cazul în care ambele valori de intrare depășesc o valoare prag impusă, de exemplu 0.5, rețeaua neuronală spațială va furniza la ieșire valoarea 1, adică va da o alarmă de apariție a fisurii. În caz contrar, ieșirea RS primește valoarea 0, iar rețeaua neuronală nu mai furnizează alarma de apariție a fisurii. Testând rețeaua cu diverse serii de date provenite de la ieșirile RSD corespunzătoare, date care să indice atât existența, cât și inexistența fisurii, rețeaua a recunoscut cu o precizie de 100% toate cazurile care i-au fost aduse la intrare. În Tabelul 4.7 sunt prezentate câteva seturi de date care se generează la intrarea RS, precum și rezultatele pe care aceasta ar trebui să le furnizeze la ieșire. Aceste date au fost simulate în MATLAB cu ajutorul scripturilor și funcțiilor din Tabelul 4.6:

Tabelul 4.6

Nume Funcție	Utilizare
Antrenare_RNA_2.m	Scriptul se utilizează pentru antrenarea și testarea rețelei spațiale.
Date_Ant_RNA_2.m	Funcția se utilizează pentru generarea și salvarea datelor de intrare respectiv de ieșire, corespunzătoare rețelei spațiale, precum și pentru eliminarea unor posibile surse de erori în cadrul datelor.

Codul sursă pentru aceste scripturi și funcții se găsește în **ANEXA 2**.

Tabelul 4.7

Date Intrare (seturi de câte 2)	0.8	0.3	0.7	0.2	0.5	0.7	0.1	1.0	0.1	0.9	0.0
	0.9	0.6	1.0	0.1	0.6	0.6	0.6	0.9	0.0	0.6	0.5
Rezultat RNA 2	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0

Pentru antrenarea RS s-au utilizat 200 de seturi de date, dintre care 20 pentru cazul existenței fisurii, iar restul pentru cazul inexistenței acesteia. Antrenarea s-a încheiat când diferența dintre valoarea semnalului de ieșire a rețelei neuronale și semnalul dorit a fost ≤ 0.001 pentru fiecare set de date, sau atunci când calculul convergenței iterative atinge 10000 de epoci.

4.5 Concluzii

În timpul procesul de turnare continuă, în cristalizor începe procesul de solidificare a oțelului. Datorită contactului direct dintre oțelul topit și pereții cristalizorului răciți cu apă se formează o crustă de grosime mică, una dintre problemele majore fiind fisurarea acesteia. În vederea detecției fisurilor care pot apărea în crustă, în prezentul capitol s-a conceput un sistem multi-neuronal, care analizează semnalele primite de la niște senzori de temperatură montați pe peretele cristalizorului și care furnizează la ieșire un semnal de existență sau inexistență a fisurii.

Sistemul propus, conceput și dezvoltat s-a implementat software, utilizând ca și mediu de implementare, mediul Matlab. Sistemul astfel implementat a recunoscut toate cazurile care i-au fost aduse la intrare. Astfel, din numărul total de seturi de intrare, 120 erau cazuri în care nu a existat fisură, iar 30 cazuri în care a existat fisura. Sistemul neuronal antrenat în prealabil cu un set de date total diferit de cel de testare, a recunoscut cu o acuratețe de 100%, atât cazurile în care s-a produs fisurarea crustei, cât și cazurile în care nu s-a produs fisurarea acesteia.

Astfel, față de vechile metode de abordare a problemei fisurării crustei în procesul de turnare continuă a oțelului, cum ar fi metodele de natură tehnologică (impunerea unei anumite viteze de turnare, reglarea compoziției și cantității prafurilor de turnare, etc.), noua metodă propusă și dezvoltată bazată pe rețele neuronale, aduce siguranță și precizie în cadrul acestui proces complex fiind înlăturate orice dubii cu privire la existența sau inexistența fisurii. Pentru detecția fisurilor s-au preferat rețele neuronale deoarece acestea sunt ușor de construit și de antrenat, fiind ușor de modificat și de perfecționat în timpul aplicației. Utilizând sistemul neuronal conceput, fisurile pot fi detectate mult mai devreme și cu o mai mare acuratețe decât în cazul metodelor convenționale.

Răspunsul furnizat la ieșirea din sistemul propus este utilizat ca și semnal de intrare pentru un sistem de decizie fuzzy, care are rolul de a modifica parametrii procesului tehnologic în vederea eliminării fisurilor.

5. SISTEM FUZZY PENTRU PREDICȚIA ȘI ELIMINAREA FISURILOR ÎN PROCESUL DE TURNARE CONTINUĂ

5.1. Preliminarii

În Capitolul 4 a fost expusă structura unui sistem de detecție a fisurilor care pot apărea în procesul de turnare continuă, bazat pe o rețea neuronală (RN), rețeaua produce la ieșire un semnal logic „1” în momentul când a fost detectată o fisură primară în cristalizor, în rest producând la ieșire un semnal „0”. Această informație trebuie folosită în mod corespunzător de către sistemul de conducere al procesului, pentru a elimina fisura înainte de ieșirea materialului din cristalizor **[Tir08_1],[Tir09_3]**.

În prezentul capitol se propune o soluție fuzzy care, grefată pe structura existentă a sistemului de conducere a turnării continue, elimină fisurile apărute în cristalizor prin generarea corecțiilor necesare modificării valorii impuse pentru debitul apei de răcire primară și respectiv viteza de turnare. Sistemele de eliminare a fisurilor, existente în acest moment pe plan mondial [Ada99], [Bha05], [Bou02], [Duk09], [Hor98], [Kom91], [Nak96], nu pot elimina fisurile dacă acestea sunt detectate în partea finală a cristalizorului. Utilizând principiul predictiv propus, acest dezavantaj este eliminat. Practic, baza de reguli „0” a fost concepută special pentru acest scop și ea conține măsurile care trebuie luate pentru a diminua riscul de apariție a unei fisuri, atunci când încă nu a apărut. Acest principiu este original, ca și structura sistemului propus. În plus față de cele precizate, folosind facilitățile logicii fuzzy [Gal95],[Lee90], s-a realizat o predicție a posibilelor fisuri, propunându-se acțiuni pentru a împiedica formarea lor primară în cristalizor.

Prin sistemul fuzzy dezvoltat nu se realizează conducerea propriu-zisă a procesului, el este conceput ca un sistem suplimentar, care generează corecțiile necesare modificării valorii mărimii de referință pentru doi parametri esențiali în conducerea procesului (debitul apei de răcire primară și viteza de turnare), în vederea eliminării fisurilor detectate de rețeaua neuronală și a posibilității de apariție a unor noi fisuri încă nedetectate. Efectele economice ale acestei acțiuni sunt deosebit de importante avându-se în vedere faptul că un semifabricat ieșit din cristalizor cu fisură este un rebut.

Structura propusă poate fi aplicată la orice instalație de turnare continuă, dar numai împreună cu rețeaua neuronală de detecție a fisurilor primare, astfel informația primită de la RN este utilizată de către sistemul fuzzy pentru predicția și eliminarea fisurilor, numit în continuare sistem de decizie fuzzy(SDF) **[Tir10_7]**. În acest mod, având în vedere și principiul predictiv adoptat, se consideră că pot fi eliminate toate cazurile în care materialul turnat iese fisurat din cristalizor.

5.2. Structura sistemului fuzzy pentru predicția și eliminarea fisurilor

Spre deosebire de logica binară care lucrează cu variabile 0 și 1, logica fuzzy permite tratarea variabilelor vagi ale căror valori pot varia continuu în intervalul $[0,1]$, realizând practic o cuantizare probabilistică a măsurii de certitudine sau incertitudine în producerea unui anumit eveniment [Zad65],[Zim85],[Zad88],[Lyg97],[Fil99].

Domeniile de aplicabilitate ale logicii fuzzy sunt foarte variate [Dub80],[Fil98],[Fil99],[Gâr00],[Vol07], domeniul metalurgic fiind unul în care sistemele fuzzy sunt tot mai frecvent utilizate.

Metodele bazate pe logica fuzzy nu au algoritmi foarte strict definiți ele făcând apel în mare măsură la experiența specialistului în domeniu [Dri92],[Jam93][Pre97],[Ngy98],[Cox02],[Vol07]. Pentru problematica în discuție s-a construit o bază de date constituită din informațiile culese de la experții tehnologi. Această bază de date a fost completată și cu informațiile obținute din modelul matematic al procesului de solidificare care a fost prezentat în Capitolul 3.

Sistemul fuzzy conceput primește din proces următoarele mărimi momentane:

- debitul apei de răcire primară, q ;
- viteza de turnare, v ;
- temperatura otelului din distribuitor, T

Totodată, acesta primește de la rețeaua neuronală informații asupra existenței, sau inexistenței unor fisuri primare în semifabricatul din cristalizor, și de la o consolă valoarea riscului tehnologic [Fle02], calculată de inginerul tehnolog. Această mărime are de obicei o valoare constantă dacă se toarnă același tip de oțel, cu aceeași compoziție chimică și cu aceleași date tehnologice [Pin08]. Primele trei mărimi sunt furnizate de traductoarele existente deja în sistemul de conducere al turnării continue.

În urma prelucrării datelor de intrare, folosind una dintre bazele de reguli, se generează corecțiile necesare pentru a modifica valorile impuse ale vitezei de turnare și respectiv ale debitului apei de răcire primară, cu scopul ca la ieșirea semifabricatului din cristalizor acesta să nu conțină nici o fisură [Tir09_8]. Se precizează faptul că vechile valori (necorectate) ale mărimilor impuse menționate, sunt furnizate de sistemul existent în prezent pentru conducerea procesului de turnare continuă [Sie97], pe baza unor algoritmi care nu fac obiectul lucrării de față.

Este pentru prima dată pe plan național și mondial, când se comandă modificarea a două mărimi (viteza de turnare și debitul apei de răcire primară), pentru eliminarea fisurilor din semifabricatul turnat continuu [Tir09_5]. Bazele de reguli sunt astfel concepute încât, prima mărime care se modifică este debitul apei de răcire, iar după aceea se modifică viteza de turnare. Acest principiu s-a folosit pentru a menține pe cât posibil productivitatea instalației (diminuarea vitezei de turnare duce la scăderea productivității), conceptul propus fiind original.

SDF funcționează cu două baze de reguli diferite, selectate în funcție de semnalul primit de la rețeaua neuronală pentru detecția fisurilor primare concepută și dezvoltată în Capitolul 4. În figura 5.1 se prezintă schema bloc a ansamblului RN-SDF.

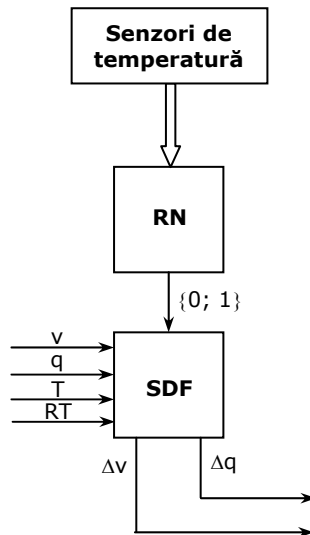
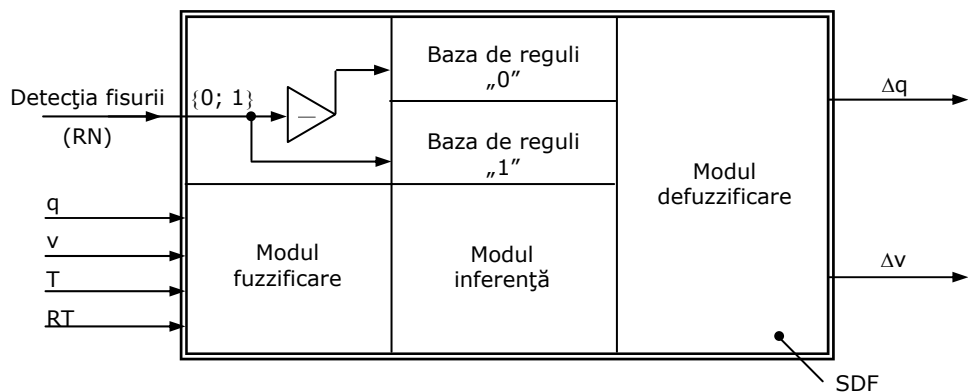


Fig. 5.1 Schema bloc a ansamblului RN-SDF

În Fig.5.2 este prezentată schema bloc a structurii propuse, care este un sistem de decizie fuzzy (SDF), cu două baze de reguli diferite (baza de reguli „0” și baza de reguli „1”, numite așa după cum RN dă la ieșire un semnal „0” sau „1”) [Tir09_7].



q – debitul apei de răcire primară; v – viteza de turnare; T – temperatura din distribuitor;
RT – riscul tehnologic; Δv – corecție viteza de turnare; Δq – corecție debit apă răcire primară.

Fig. 5.2 Schema bloc a sistemului de decizie fuzzy

Se fac următoarele precizări:

- a) baza de reguli „0” (225 reguli) este activă când rețeaua neuronală nu a detectat fisuri primare în cristalizor, caz în care se utilizează patru mărimi de intrare:
- viteza curentă de turnare;
 - debitul curent al apei de răcire primară;
 - temperatura din distribuitor;
 - riscul tehnologic.

În această situație, SDF va comanda modificări ale vitezei de turnare și ale debitului apei de răcire primară, pentru eliminarea riscului de apariție a unei fisuri **[Tir09_8]**.

Se remarcă faptul că, pentru prima dată, este luat în considerare riscul de fisurare a crustei în conducerea procesului de turnare continuă, în literatura de specialitate neexistând referiri la acest aspect.

- b) baza de reguli „1” (75 reguli) este activă când rețeaua neuronală a detectat fisuri primare în materialul aflat în cristalizor **[Tir10_1]**. În acest caz, riscul tehnologic nu mai este luat în considerare, restul mărimilor analizate rămânând același. Necesitatea celei de a doua baze de reguli apare datorită faptului că în acest caz, chiar pentru aceleași valori ale mărimilor de intrare, SDF trebuie să producă modificări mai „energice” ale debitului apei de răcire primară și ale vitezei de turnare decât în cazul precedent.
- c) riscul tehnologic (RT) conține o serie de considerente, stabilite de tehnologi, pe baza cărora apariția unei fisuri este sau nu favorizată de compoziția chimică a oțelului. Astfel, un procent ridicat de carbon (curent $0,05 \div 0,17\%$), al raportului Mangan/Sulf etc. constituie un factor care, predispune la apariția fisurilor **[Pin08]**. Stabilirea exactă a valorilor riscului tehnologic a fost efectuată în prezenta lucrare pe baza consultării experților tehnologici. De asemenea, modelul matematic al procesului de solidificare a crustei **[Tir10_5]** (prezentat în Capitolul 3) a permis obținerea unor concluzii importante privind riscul tehnologic în apariția fisurilor, prin rularea acestuia pentru mai multe tipuri de oțel turnat curent. În acest mod s-a putut observa influența compoziției chimice a acestuia asupra formării crustei de solidificare **[Ian94]**, **[Fle02]**.
- d) cele două baze de reguli vor fi selectate secvențial, în funcție de mărimea de ieșire momentană a rețelei neuronale pentru detecția fisurilor.
- e) stabilirea bazelor de reguli a necesitat o analiză a tuturor cazurilor posibile. În acest scop, au fost contactați o serie de experți tehnologi cu o bogată experiență în exploatarea instalațiilor de turnare continuă. De asemenea, pentru fiecare caz în parte s-a efectuat o analiză a fenomenului de solidificare a crustei, utilizând modelul matematic prezentat în Capitolul 3. Desigur, bazele de reguli obținute astfel nu sunt perfecte, ele fiind influențate și de o serie de factori care țin cont de starea echipamentelor și de alte considerente practice. De aceea, ele

urmează să fie perfecționate la punerea în funcțiune și testarea schemei propuse, cum de altfel, se întâmplă totdeauna la sistemele expert [Bas94],[Lie10],[Câr94].

Modelul matematic realizat în capitolul 3 a permis o analiză exactă a fenomenului de solidificare a oțelului și o filtrare a bazei de cunoștințe a experților tehnologi. Desigur aceasta a presupus un număr foarte mare de rulări ale programului (practic fiind analizat fiecare caz caracteristic). Efectul acestei acțiuni a fost obținerea unei baze de reguli cât mai veridice.

5.3 Proiectarea SDF

Proiectarea propriu-zisă a SDF s-a realizat în Matlab [***93],[***97] folosind toolbox-ul fuzzy. Practic sunt două SDF-uri, primul este numit SDF-0, deoarece este activă baza de reguli „0” (RN da la ieșire un semnal „0”), și are ca mărimi de intrare debitul apei de răcire primară q , viteza de turnare v , temperatura oțelului din distribuitor T , riscul tehnologic RT . Al doilea este numit SDF-1, deoarece este activă baza de reguli „1” (RN da la ieșire un semnal „1”) și are ca mărimi de intrare debitul apei de răcire primară q , viteza de turnare v , temperatura oțelului din distribuitor T [Tir10_1].

Ambele produc la ieșire câte 2 mărimi și anume: corecția debitului apei de răcire primară și respectiv corecția vitezei de turnare.

După cum s-a menționat, selectarea la un moment dat a primului (SDF-0) sau a celui de al doilea sistem (SDF-1), depinde de faptul că RN produce la ieșirea sa un semnal „0” sau „1” [Tir10_4].

5.3.1 Proiectarea SDF-0

În vederea realizării SDF-0 s-au ales patru mărimi de intrare și două mărimi de ieșire, fiind stabiliți termenii lingvistici (atât pentru intrări cât și pentru ieșiri), funcțiile de apartenență și baza de reguli.

În figura 5.3 este prezentată schema bloc a SDF-0.

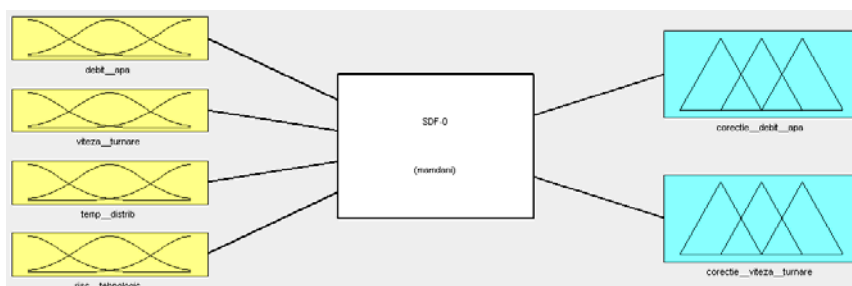
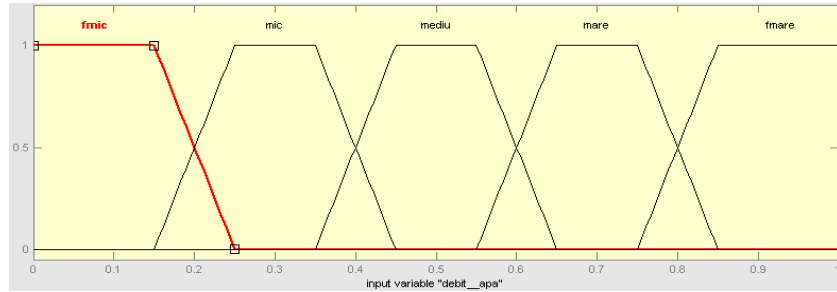
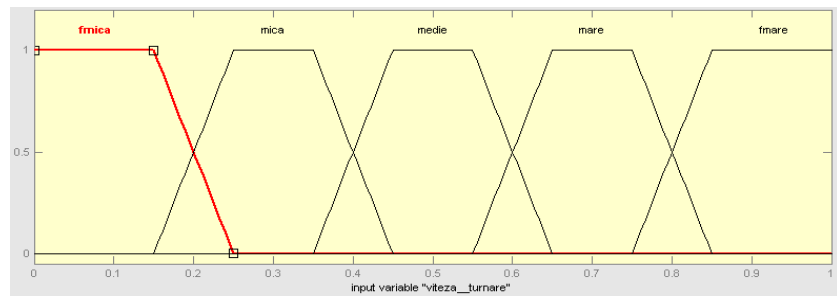


Fig. 5.3 Schema bloc a SDF-0

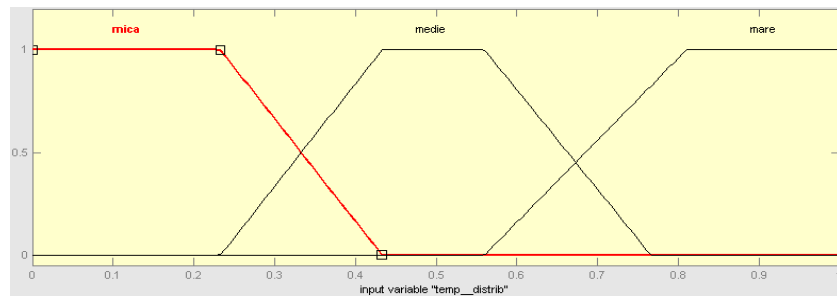
Având în vedere caracteristicile procesului precum și faptul că procesul este un proces lent au fost adoptate funcții de apartenență de tip trapezoidal, atât pentru mărimile de intrare cât și pentru cele de ieșire [Pre97]. Forma funcțiilor de apartenență pentru mărimile de intrare este cea dată în figura 5.4.



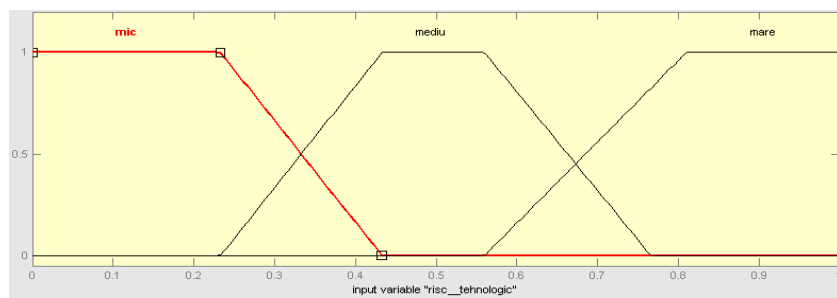
a) Funcții de apartenență „debit apă”



b) Funcții de apartenență „viteza turnare”



c) Funcții de apartenență „temperatură distribuitor”



d) Funcții de apartenență „ risc tehnologic”

Fig. 5.4 Funcțiile de apartenență pentru mărimile de intrare

I. Informații „ mărimi intrare”

Pentru două dintre mărimile de intrare (debit apă și viteză turnare) s-au ales câte cinci termeni lingvistici, iar pentru celelalte două (temperatură distribuitor și risc tehnologic) s-au ales câte trei termeni lingvistici. În Tabelul 5.1 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru debitul apei de răcire.

1) debit apă (debitul apei de răcire în cristalizor, [l/min])

Număr stări: 5

Tabelul 5.1

Stări	Domeniul real [l/min]	Domeniul valorilor normate
fmic	700 ÷ 940	0÷0,25
mic	940 ÷ 980	0,15÷0,45
mediu	980 ÷ 1020	0,35÷0,65
mare	1020 ÷ 1060	0,55÷0,85
fmare	1060 ÷ 1100	0,75÷1

În Tabelul 5.2 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru viteza de turnare.

2) viteza turnare(viteza de turnare, [m/min])

Număr stări: 5

Tabelul 5.2

Stări	Domeniul real [m/min]	Domeniul valorilor normate
fmică	0,7 ÷ 1	0÷0,25
mică	1 ÷ 1,3	0,15÷0,45
medie	1,3 ÷ 1,6	0,35÷0,65
mare	1,6 ÷ 1,9	0,55÷0,85
fmare	1,9 ÷ 2,2	0,75÷1

În Tabelul 5.3 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru temperatura otelului în distribuitor.

3) temp distribuitor (temperatura otelului în distribuitor [°C])

Număr stări:3

Tabelul 5.3

Stări	Domeniul real [°C]	Domeniul valorilor normate
mică	1540 ÷ 1550	0÷0,42
medie	1550 ÷ 1560	0,22÷0,68
mare	1560 ÷ 1570	0,56÷1

În Tabelul 5.4 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru riscul tehnologic.

4) risc tehnologic [%]

Număr stări: 3

Tabelul 5.4

Stări	Domeniul real [%]	Domeniul valorilor normate
mic	0÷20	0÷0,42
mediu	20÷40	0,22÷0,68
mare	40÷60	0,56÷1

II. Informații „mărimi ieșire”

Pentru fiecare dintre cele două mărimi de ieșire (corecție debit apă și corecție viteză turnare) s-au ales câte cinci termeni lingvistici .

În Tabelul 5.5 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru corecția debitul apei de răcire în cristalizor.

1) corecție debit apă (corecția debitul apei de răcire în cristalizor, [l/min])

Număr stări: 5

Tabelul 5.5

Stări	Domeniul real [%]	Domeniul valorilor normate
fmică	0÷4	0÷0,25
mică	4÷8	0,15÷0,45
medie	8÷12	0,35÷0,65
mare	12÷16	0,55÷0,85
fmare	16÷20	0,75÷1

În Tabelul 5.6 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru corecția vitezei de turnare.

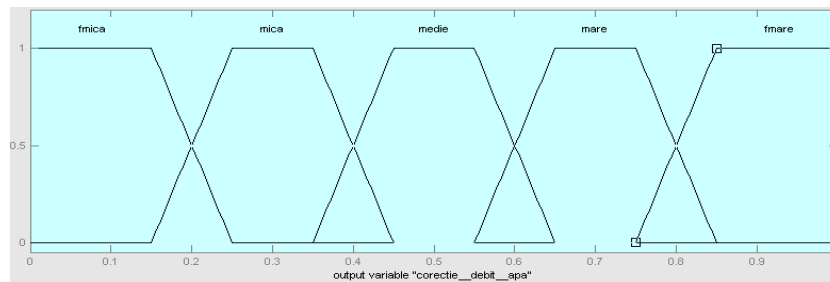
2) corecție viteză turnare(corecția vitezei de turnare, [m/min])

Număr stări: 5

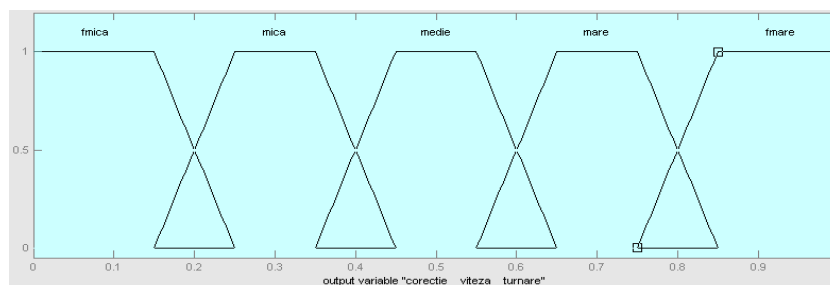
Tabelul 5.6

Stări	Domeniul real [%]	Domeniul valorilor normate
fmică	0÷4	0÷0,25
mică	4÷8	0,15÷0,45
medie	8÷12	0,35÷0,65
mare	12÷16	0,55÷0,85
fmare	16÷20	0,75÷1

Forma funcțiilor de apartenență pentru mărimile de ieșire este cea dată în figura 5.5.



a) Funcții de apartenență „corecție debit apă”



b) Funcții de apartenență „ corecție viteza turnare”

Fig. 5.5 Funcțiile de apartenență pentru mărimile de ieșire

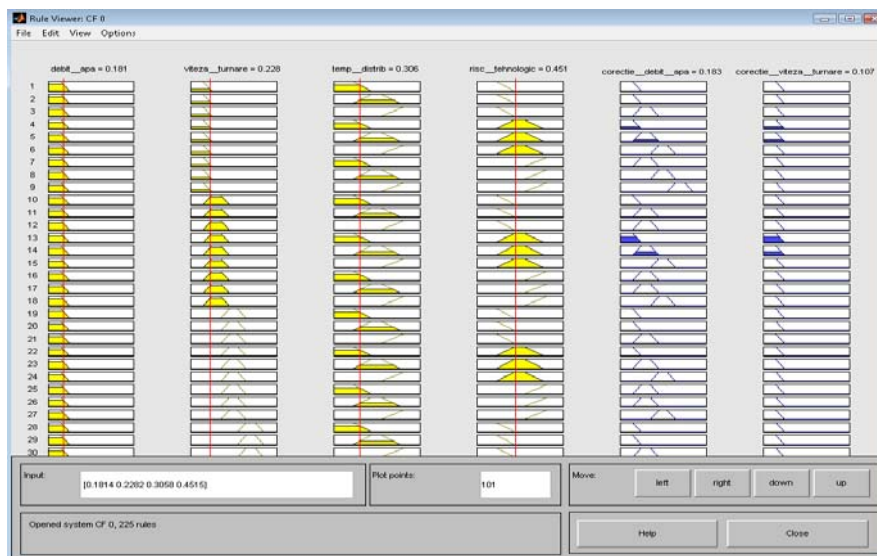


Fig. 5.6 Tabela de inferență pentru SDF-0

Inferența utilizată este de tip Mamdani max-min [Zim85],[Pre97], iar Tabela de inferență pentru o parte din reguli este prezentată în figura 5.6. Sunt surprinse valorile la un moment oarecare de timp pentru mărimile de intrare (debit apă=0.181, viteză turnare=0.228, temperatura distribuitor=0.451) și valorile corecțiilor efectuate de către SDF-0 (corecție debit apă=0.183, corecție viteză turnare=0.107).

5.3.2 Proiectarea SDF-1

În vederea realizării SDF-1 s-au ales trei mărimi de intrare și două mărimi de ieșire, fiind stabiliți termenii lingvistici (atât pentru intrări cât și pentru ieșiri), funcțiile de apartenență și bază de reguli.

În figura 5.7 este prezentată schema bloc a SDF-1.

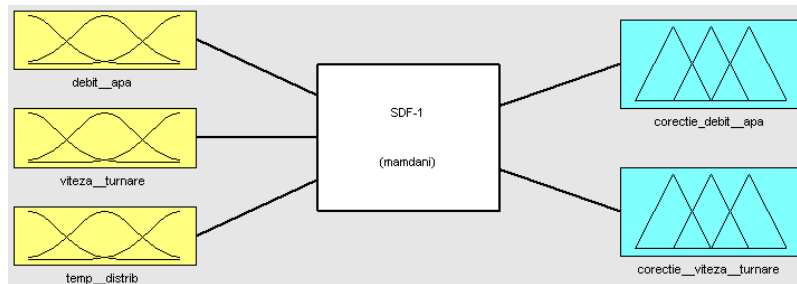
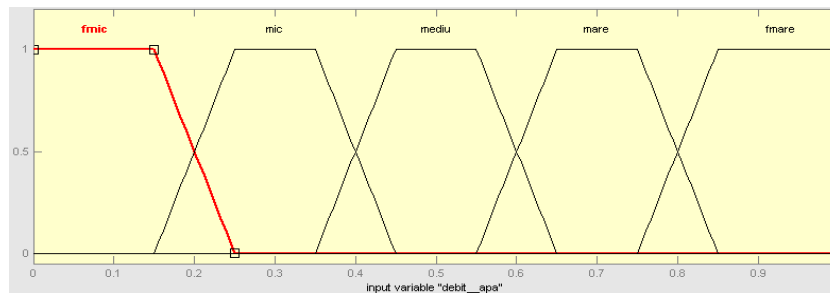
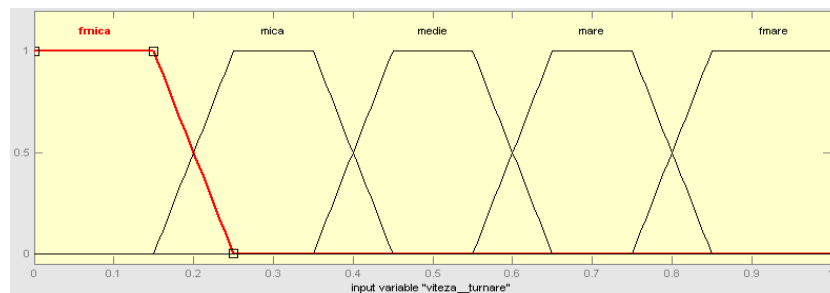


Fig.5.7 Schema bloc a SDF-1

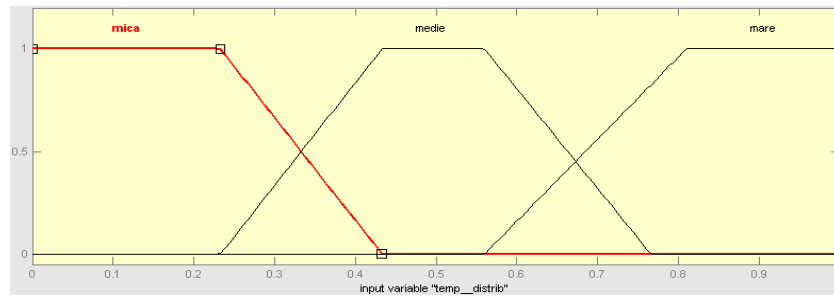
Având în vedere caracteristicile procesului, precum și faptul că procesul este un proces lent au fost adoptate funcții de apartenență de tip trapezoidal atât pentru mărimile de intrare cât și pentru cele de ieșire [Pre97]. Forma funcțiilor de apartenență pentru mărimile de intrare este cea dată în figura 5.8.



a) Funcții de apartenență „debit apa”



b) Funcții de apartenență „viteză turnare”



c) Funcții de apartenență „temperatură distribuitor”

Fig. 5.8 Funcțiile de apartenență pentru mărimile de intrare

I. Informații „mărimi intrare”

Pentru două dintre mărimile de intrare (debit apă și viteză turnare) s-au ales câte cinci termeni lingvistici, iar pentru a treia (temperatură distribuitor) s-au ales trei termeni lingvistici.

În Tabelul 5.7 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru debitul apei de răcire.

- 1) debit apă (debitul apei de răcire în cristalizor, [l/min])

Număr stări: 5

Tabelul 5.7

Stări	Domeniul real [l/min]	Domeniul valorilor normate
fmic	700 ÷ 940	0 ÷ 0,25
mic	940 ÷ 980	0,15 ÷ 0,45
mediu	980 ÷ 1020	0,35 ÷ 0,65
mare	1020 ÷ 1060	0,55 ÷ 0,85
fmare	1060 ÷ 1100	0,75 ÷ 1

În Tabelul 5.8 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru viteza de turnare.

- 2) viteza turnare(viteza de turnare, [m/min])

Număr stări: 5

Tabelul 5.8

Stări	Domeniul real [m/min]	Domeniul valorilor normate
fmică	0,7 ÷ 1	0 ÷ 0,25
mică	1 ÷ 1,3	0,15 ÷ 0,45
medie	1,3 ÷ 1,6	0,35 ÷ 0,65
mare	1,6 ÷ 1,9	0,55 ÷ 0,85
fmare	1,9 ÷ 2,2	0,75 ÷ 1

În Tabelul 5.9 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru temperatura oțelului în distribuitor.

3) temperatură distribuitor (temperatura oțelului în distribuitor [$^{\circ}\text{C}$])

Număr stări: 3 Tabelul 5.9

Stări	Domeniul real [$^{\circ}\text{C}$]	Domeniul valorilor normate
mică	1540 ÷ 1550	0 ÷ 0,42
medie	1550 ÷ 1560	0,22 ÷ 0,68
mare	1560 ÷ 1570	0,56 ÷ 1

II. Informații „mărimi ieșire”

Pentru fiecare dintre cele două mărimi de ieșire (corecție debit apă și corecție viteză turnare) s-au ales câte cinci termeni lingvistici .

În Tabelul 5.10 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru corecția debitul apei de răcire în cristalizor.

1) corecție debit apă (corecția debitul apei de răcire în cristalizor, [l/min])

Număr stări: 5 Tabelul 5.10

Stări	Domeniul real [%]	Domeniul valorilor normate
fmică	0 ÷ 4	0 ÷ 0,25
mică	4 ÷ 8	0,15 ÷ 0,45
medie	8 ÷ 12	0,35 ÷ 0,65
mare	12 ÷ 16	0,55 ÷ 0,85
fmare	16 ÷ 20	0,75 ÷ 1

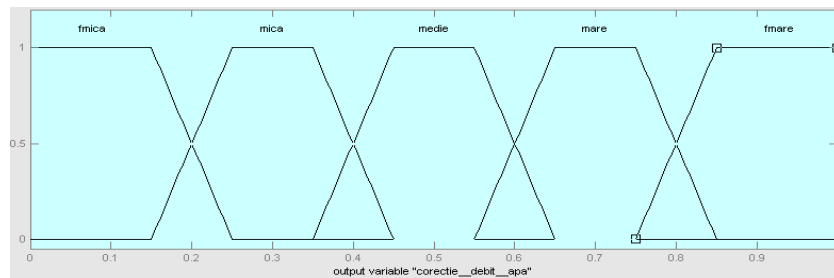
În Tabelul 5.11 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru corecția vitezei de turnare.

2) corecție viteză turnare(corecția vitezei de turnare, [m/min])

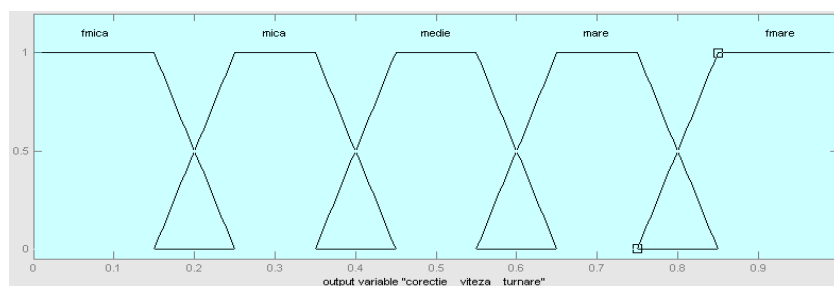
Număr stări: 5 Tabelul 5.11

Stări	Domeniul real [%]	Domeniul valorilor normate
fmică	0 ÷ 4	0 ÷ 0,25
mică	4 ÷ 8	0,15 ÷ 0,45
medie	8 ÷ 12	0,35 ÷ 0,65
mare	12 ÷ 16	0,55 ÷ 0,85
fmare	16 ÷ 20	0,75 ÷ 1

Forma funcțiilor de apartenență pentru mărimile de ieșire este cea dată în figura 5.9.



a) Funcții de apartenență „corecție debit apă”



b) Funcții de apartenență „ corecție viteză turnare”

Fig. 5.9 Funcțiile de apartenență pentru mărimile de ieșire

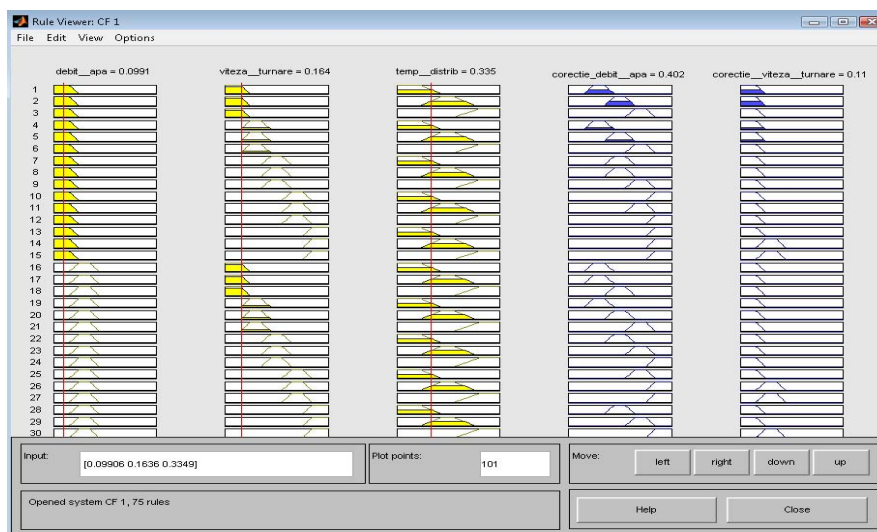


Fig. 5.10 Tabela de inferență pentru SDF-1

Inferența utilizată este de tip Mamdani max-min [Zim85],[Pre97], iar Tabela de inferență pentru o parte din reguli este prezentată în figura 5.10. Sunt surprinse valorile la un moment oarecare de timp pentru mărimile de intrare (debit apă=0.099, viteză turnare=0.164, temperatură distribuitor=0.033) și valorile corecțiilor efectuate de către SDF-1 (corecție debit apă=0.402, corecție viteză turnare=0.11).

5.4 Simularea funcționării sistemului de decizie fuzzy

Pentru analiza calitativă a funcționării SDF, se propune simularea acestuia cu ajutorul mediului Matlab-Simulink [Cav94]. În figura 5.11 se prezintă implementarea SDF-0 în Matlab-Simulink [Tir10_6]. Mărimile de intrare au fost generate aleator [Pro06], cu ajutorul unor blocuri care generează mărimi aleatoare în intervalul 0-1, pentru a acoperi toate cazurile posibile. Ieșirile SDF-0 au fost puse în evidență cu ajutorul unor blocuri de vizualizare.

În cazul SDF-0, se generează 4 mărimi de intrare, deoarece este activă baza de reguli „0”, rețeaua neuronală nu detectând fisuri primare în cristalizor, caz în care este luat în calcul și riscul tehnologic.

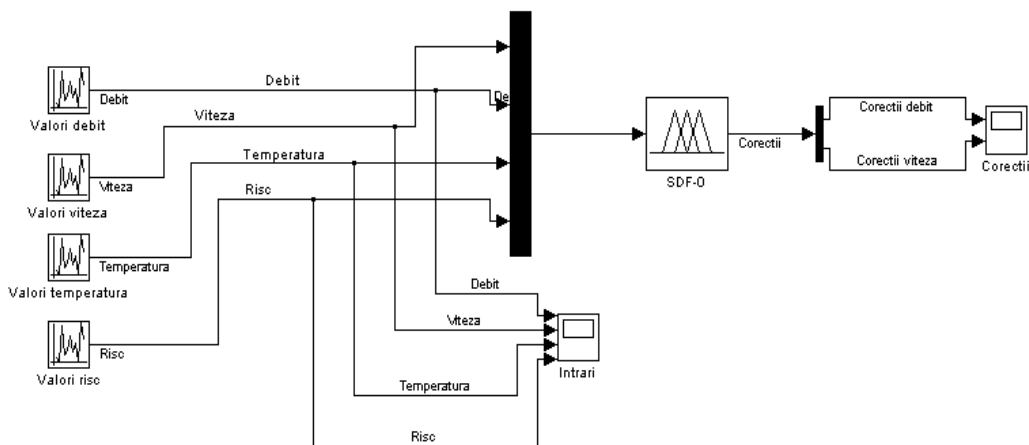


Fig. 5.11 Implementarea în Simulink a SDF-0

În figura 5.12 se prezintă valorile variabilelor de intrare, cuprinse între 0 și 1, generate aleator pe un interval de 60 de secunde. Se poate observa că o valoare este menținută constantă 2 secunde, rezultând câte un set de 30 valori pentru fiecare dintre cele 4 mărimi de intrare.

În figura 5.13 se prezintă corecțiile de debit și respectiv viteză realizate de către SDF-0. Se constată că la fiecare 2 secunde, când se realizează o modificare a valorilor mărimilor de intrare SDF-ul efectuează corecțiile aferente.

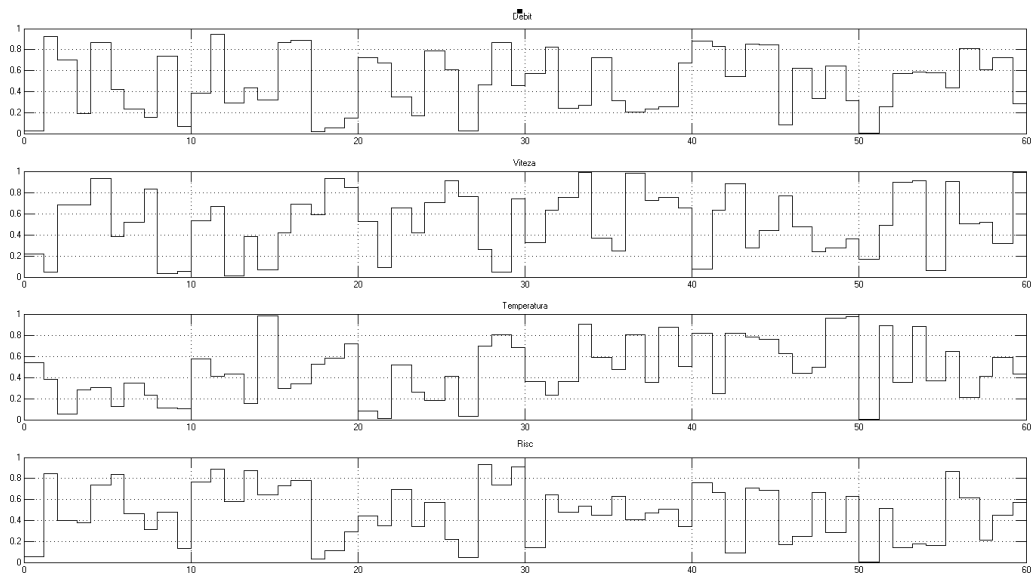
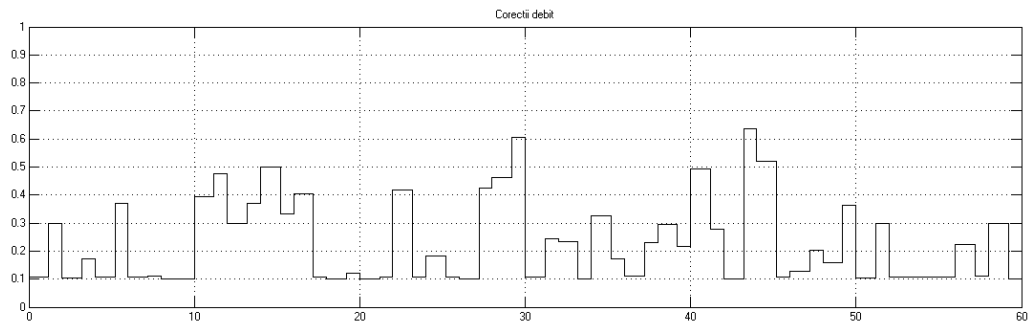
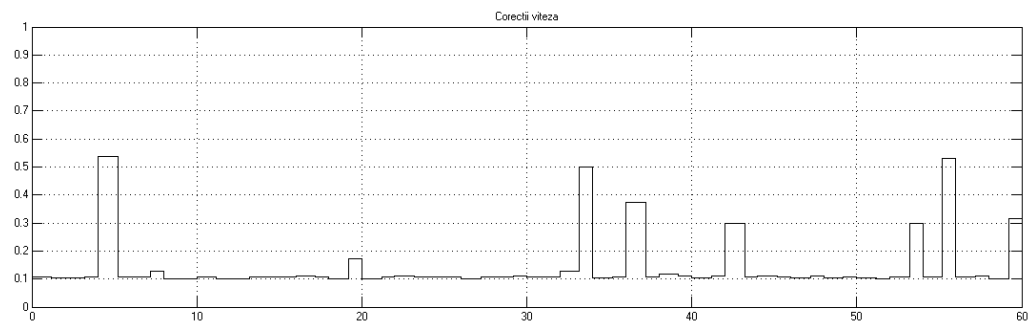


Fig. 5.12 Valorile variabilelor de intrare pentru SDF-0



a) corecție debit



b) corecție viteză

Fig. 5.13 Corecțiile realizate de către SDF-0

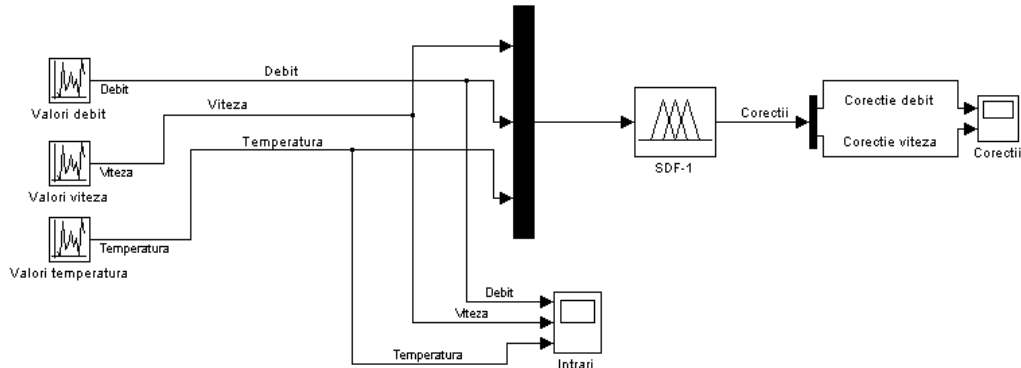


Fig. 5.14 Implementarea în Simulink a SDF-1

În figura 5.14 se prezintă implementarea SDF-1 în Matlab-Simulink [Tir10_6]. Mărimile de intrare au fost generate aleator [Pro06], ca și în cazul precedent cu ajutorul unor blocuri care generează mărimi aleatoare în intervalul 0-1, pentru a acoperi toate cazurile posibile. Ieșirile SDF-1 au fost puse în evidență cu ajutorul unor blocuri de vizualizare.

Se constată că în cazul SDF-1, când este activă baza de reguli „1” se generează doar 3 marimi de intrare. În acest caz riscul tehnologic nu mai este luat în considerare, deoarece rețeaua neuronală a detectat o fisură în cristalizor.

În figura 5.15 se prezintă valorile variabilelor de intrare, cuprinse între 0 și 1, generate aleator pe un interval de 60 de secunde. Se poate observa că o valoare este menținută constantă 2 secunde, rezultând câte un set de 30 valori pentru fiecare dintre cele 3 mărimi de intrare.

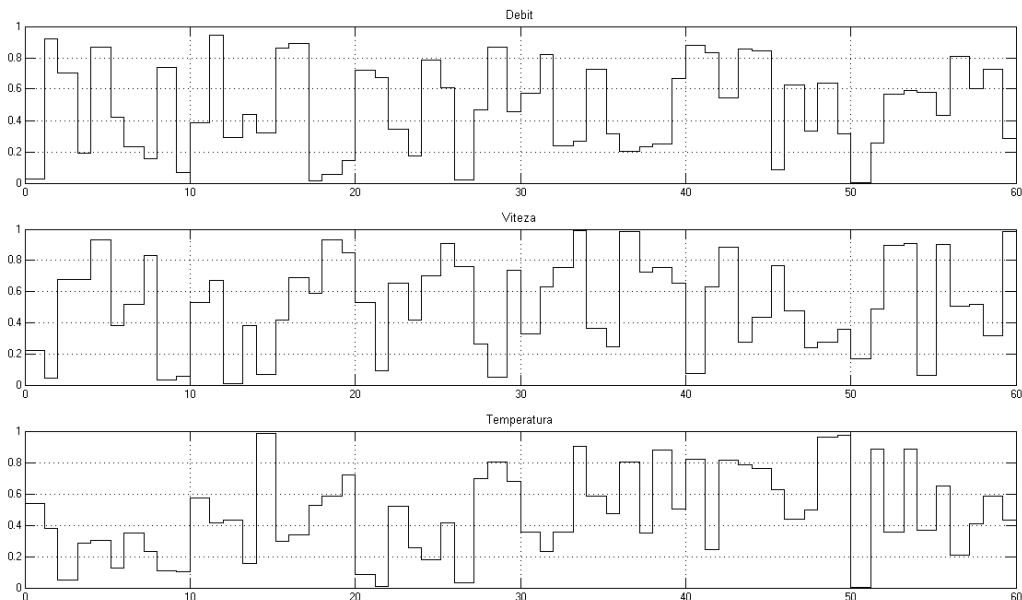


Fig. 5.15 Valorile variabilelor de intrare pentru SDF-1

În figura 5.16 se prezintă corecțiile de debit și respectiv viteză realizate de către SDF-1. Se constată că la fiecare 2 secunde, când se realizează o modificare a valorilor mărimilor de intrare SDF-ul efectuează corecțiile aferente.

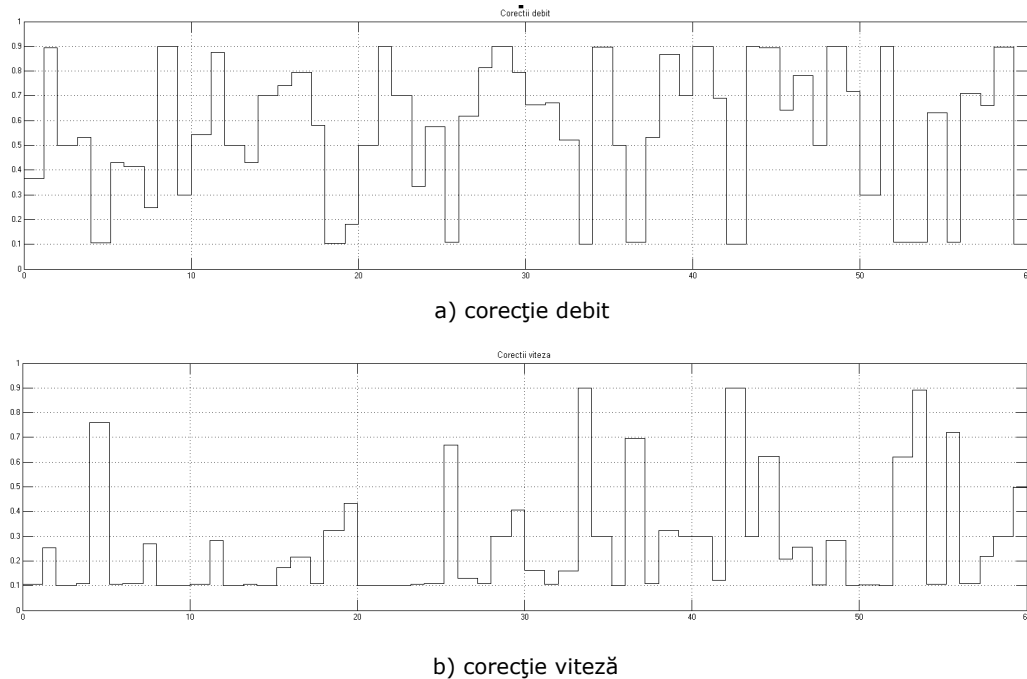


Fig. 5.16 Corecțiile realizate pentru SDF-1

Se precizează că, în aplicația industrială, SDF primește la intrare 4 mărimi (SDF – „0”) sau 3 mărimi (SDF – „1”), în funcție de mărimea de ieșire a sistemului neuronal de detecție a fisurilor (0 sau 1). Aceste mărimi sunt măsurate continuu din proces, iar SDF, prin mecanismul de inferență (max-min), elaborează corecțiile necesare pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire primară. Aceste corecții sunt aplicate blocurilor de calcul, care calculează și generează noile valori impuse buclilor existente în instalația de automatizare a procesului **[Tir10_6]**.

Având în vedere faptul că mărimile de intrare reale (din proces) pot lua, în orice moment, valori normate între 0 și 1, iar SDF va trebui să le poată analiza pe baza setului de reguli și să producă cele două mărimi de ieșire, s-a considerat că, pentru simulare, generarea aleatoare a valorii mărimilor de intrare acoperă orice situație reală.

După cum se observă din fig. 5.12 și 5.15, ținând cont de comportarea dinamică a procesului real (care este un proces lent), o valoare este menținută constantă 2 secunde, rezultând câte un set de 30 valori pentru fiecare mărime. Pentru fiecare 2 secunde, s-a citit setul de valori ale mărimilor de intrare, s-au poziționat acestea pe graficele funcțiilor de apartenență prezentate în subcapitolul anterior și s-a căutat în baza de reguli, regula exactă pentru cazul respectiv. Având valorile lingvistice ale mărimilor de ieșire ale SDF, acestea au fost comparate cu valorile rezultate prin simulare (fig. 5.13 și 5.16), rezultând o corespondență perfectă în toate cazurile analizate.

Utilizarea mediului Matlab-Simulink pentru simularea SDF a permis analiza calitativă a acestuia pentru diverse situații reale, rezultând că SDF satisface toate cerințele impuse și menționate anterior.

În figura 5.17 se prezintă tabela de inferență pentru SDF-0, la 15 secunde de la începutul simulării, când debitul de apă=0.359, viteza de turnare=0.316, temperatura din distribuitor=0.974 și riscul tehnologic=0.632, observându-se și valorile corecțiilor efectuate de către SDF-0 (corecție debit apă=0.364, corecție viteză turnare=0.107).

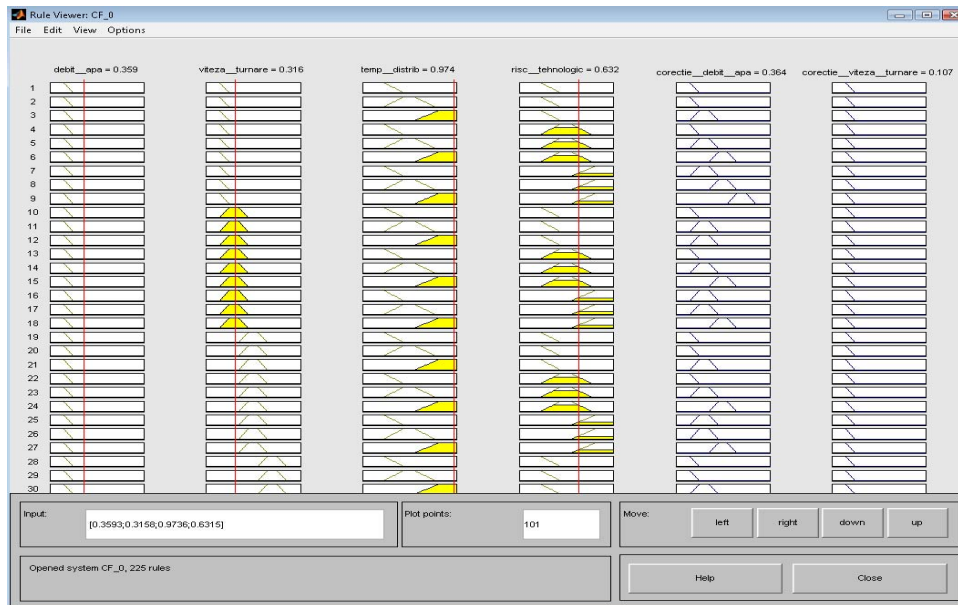


Fig. 5.17 Tabela de inferență pentru SDF-0 după 15s de la începutul simulării

La 45 de secunde de la începutul simulării debitul de apă=0.885, viteza de turnare=0.544, temperatura din distribuitor=0.816 și riscul tehnologic=0.088, tabela de inferență este dată în figura 5.18, de unde se observă corecțiile efectuate de către SDF-0 (corecție debit apă=0.099, corecție viteză turnare=0.3).

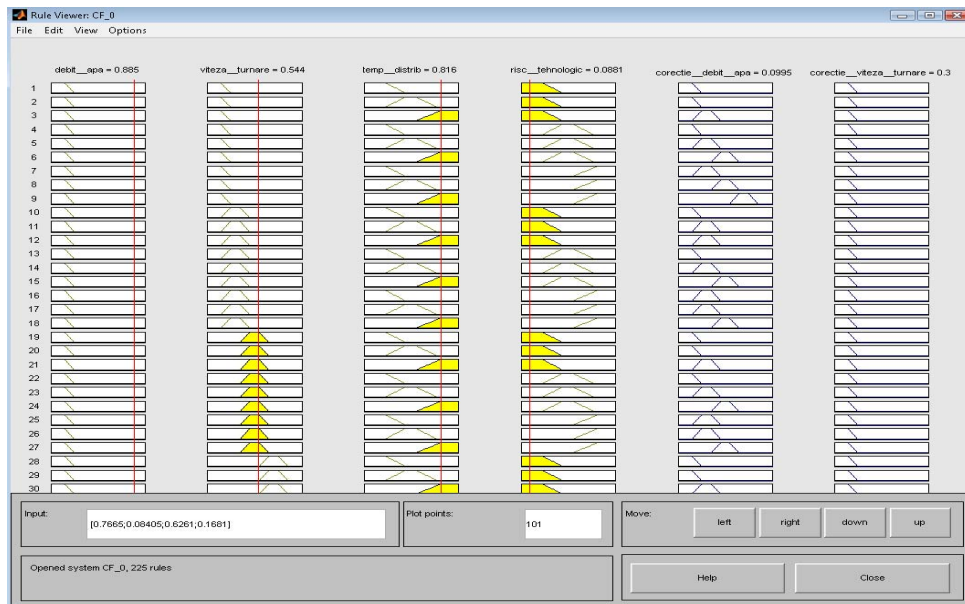


Fig. 5.18 Tabela de inferență pentru SDF-0 după 45s de la începutul simulării

In figura 5.19 se prezintă tabela de inferență pentru SDF-1, la 15 secunde de la începutul simulării, când debitul de apă=0.359, viteza de turnare=0.316, temperatura din distribuitor=0.974, observându-se valorile corecțiilor efectuate de către SDF-0 (corecție debit apă=0.716, corecție viteză turnare=0.101).

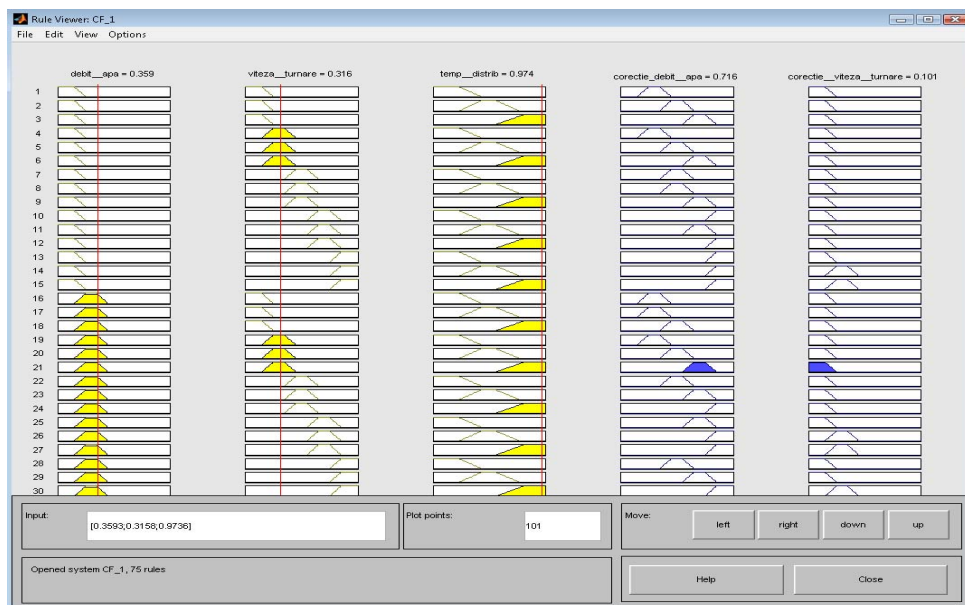


Fig. 5.19 Tabela de inferență pentru SDF-1 după 15s de la începutul simulării

La 45 de secunde de la începutul simulării, tabela de inferență este dată în figura 5.20, debitul de apă=0.384, viteza de turnare=0.092, temperatura din distribuitor=0.139, observându-se corecțiile efectuate de către SDF-1 (corecție debit apă=0.3, corecție viteză turnare=0.107).

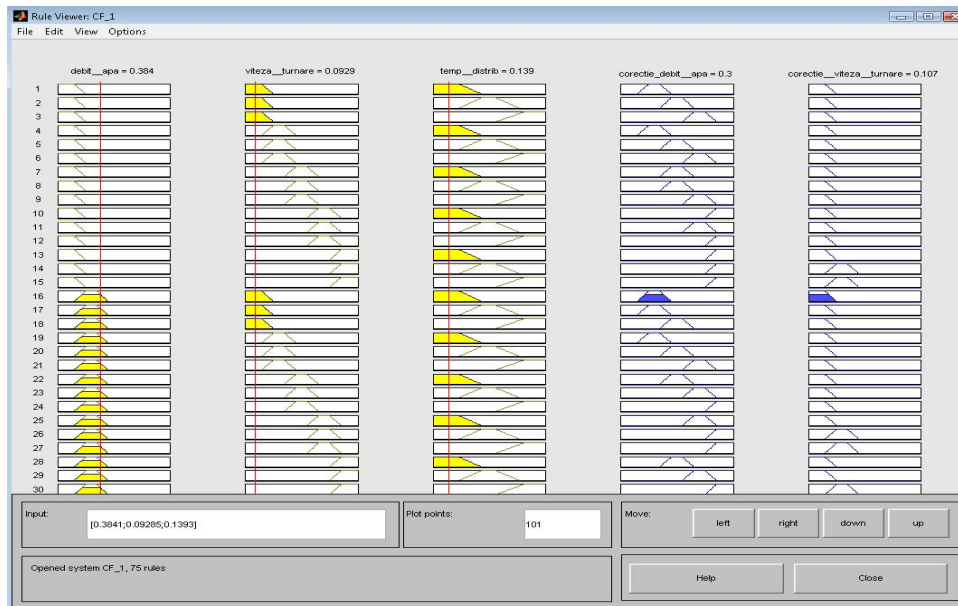


Fig. 5.20 Tabela de inferență pentru SDF-1 după 45s de la începutul simulării

Se observă că în toate cazurile, corecțiile elaborate de către SDF corespund cu cele din figurile 5.13 și 5.16 (ieșirile lui SDF-0 și SDF-1).

5.5. Concluzii

În capitolul de față a fost propusă o soluție fuzzy originală care grefată pe structura existentă a sistemului de conducere a turnării continue elimină fisurile apărute în materialul turnat în cristalizor și de asemenea, reduce posibilitatea formării de fisuri primare.

În acest scop a fost concepută schema unui sistem de decizie fuzzy cu două baze de reguli, care analizând o serie de mărimi preluate din proces produce modificări ale debitului apei de răcire și ale vitezei de turnare astfel încât să fie realizat dezideratul menționat.

Acest principiu de eliminare a fisurilor deja detectate cât și de eliminare a riscului primar de apariție a acestora este o contribuție originală a autorului. În literatura de specialitate, de pe plan național cât și de pe plan mondial, neexistând referiri la măsuri predictive de formare a fisurilor.

De asemenea, principiul modificării a doi parametri tehnologici (debitul apei de răcire și viteza de turnare) nu există în literatura de specialitate fiind un concept original, conceput și dezvoltat în cadrul acestui capitol.

Se menționează faptul că metodele propuse în literatură nu pot elimina total riscul de ieșire a materialului fisurat, dacă fisura este detectată în partea finală a cristalizorului.

Întocmirea bazelor de reguli s-a făcut utilizând experiența operatorilor umani și informații culese direct din proces la instalația de turnare continuă, din cadrul A.M.-HD. De asemenea, a fost folosit modelul matematic al procesului de solidificare a oțelului în cristalizor elaborat în Capitolul 3 pentru a obține o mai mare precizie a bazei de reguli. Verificarea și confirmarea bazei de reguli și a SDF proiectat a fost efectuată prin simulare în Simulink.

Analizând rezultatele simulării se constată că, indiferent de valorile mărimilor generate la intrare, SDF-ul elaborează corecțiile necesare pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire primară, ceea ce confirmă validitatea funcționării sistemului.

Se consideră că, din punct de vedere calitativ, utilizarea sistemului de decizie fuzzy este o metodă eficientă, practică și ușor de implementat, în scopul analizei unor fenomene complexe și neliniare. Scopul declarat: predicția și eliminarea fisurilor din semifabricat este obținut pe baza unor raționamente, materializate în bazele de reguli.

6. IMPLEMENTAREA SISTEMELOR DE DETECȚIE, PREDICȚIE ȘI ELIMINARE A FISURILOR ÎN CADRUL PROCESULUI DE TURNARE CONTINUĂ

6.1. Preliminarii

Instalațiile de turnare continuă sunt conduse în prezent de sisteme automate organizate pe mai multe niveluri ierarhice [Sie97],[**Tir09_3**], așa cum au fost prezentate în Capitolul 2.

Sistemele de conducere asigură respectarea unor algoritmi de funcționare impuși de desfășurarea corectă a procesului din punct de vedere tehnologic. În general nu sunt prevăzute acțiuni pentru analiza situației fisurilor, motiv pentru care apar în mod accidental rebuturi (zeci de tone de oțel). În aceste cazuri, personalul de exploatare modifică regimurile de funcționare ale instalației, pe baza unor instrucțiuni interne, programul de turnare fiind puternic perturbat, cu consecințe economice importante [Ard01_1].

Pe plan mondial există unele cercetări [Ada99],[Bha05],[Bou02][Duk09],[Hor98],[Kom91],[Nak96] privind detecția fisurilor deja formate (în cristalizor) și eliminarea lor în produsul finit. Metodele propuse nu elimină total fisurile deja apărute, eficiența lor depinzând de o serie de factori obiectivi (detecția unei fisuri în zona de ieșire din cristalizor, caracterul destul de lent al fenomenului de închidere a unei fisuri etc.).

În capitolele anterioare au fost propuse o serie de soluții originale care permit eliminarea totală a fisurilor din semifabricat, la ieșirea din cristalizor. În acest scop, s-a conceput o rețea neuronală (RN) care permite, prin analiza în timp real a informației furnizate de o matrice de senzori de temperatură, să se detecteze apariția unei fisuri primare [**Tir08_1**],[**Tir09_5**]. Această informație este folosită de un sistem de decizie fuzzy (SDF), care produce corecții corespunzătoare ale vitezei de turnare și ale debitului apei de răcire primară. Deoarece, așa cum s-a menționat, această metodă nu poate conduce la eliminarea totală a fisurilor (deși față de precizările din literatură, unde se propune numai modificarea vitezei de turnare, s-a propus în plus și modificarea debitului apei de răcire primară), s-a adoptat un nou principiu, predictiv, care elimină posibilitatea apariției fisurilor primare. În acest scop, SDF propus analizează o serie de mărimi caracteristice pentru proces și, chiar dacă RN nu a detectat apariția unei fisuri, dar se consideră că sunt îndeplinite condiții apriorice ca ele să apară, se produc corecții ale vitezei de turnare și ale debitului apei de răcire primară. Desigur, soluția propusă presupune un SDF complex, cu două baze de reguli distincte. Acesta a fost detaliat în Capitolul 5 (proiectare, simulare, rezultate).

Astfel, se consideră că utilizând un asemenea principiu dual de predicție și detecție, semifabricatul nu va mai avea fisuri la ieșirea din cristalizor.

6.2. Implementarea propriu-zisă a RN și a SDF în structura sistemului de conducere a procesului de turnare continuă

Pentru implementarea sistemului propus de predicție, detecție și eliminare a fisurilor în semifabricat, la ieșirea din cristalizor, au fost luate în considerare următoarele aspecte **[Tir10_4]**:

- sistemul propus să poată fi implementat în orice instalație de turnare continuă, automatizată convențional, fără modificări esențiale ale sistemului original de conducere;
- în orice moment să fie posibilă trecerea la schema originală de conducere și invers;
- pe baza analizei funcționării în instalația reală a sistemului propus, să fie posibilă efectuarea de corecții ale bazelor de reguli, astfel încât să se poată ține cont de unele particularități ale procesului propriu-zis și de rezultatele reale obținute.

În figura 6.1 este prezentată structura sistemului de conducere a procesului de turnare continuă existent la **A.M.-HD** [Ang01_2], [Cun02]. Acest tip de schemă se întâlnește în prezent la majoritatea instalațiilor de turnare continuă actuale și a fost descris în Capitolul 2.

Plecând de la această structură, s-au grefat (linie roșie) blocurile suplimentare pentru implementarea sistemului conceput, pentru predicția, detecția și eliminarea fisurilor din semifabricat la ieșirea din cristalizor **[Tir09_7]**. Din figura 6.1 se observă că cele două ieșiri ale SDF (corecția de viteză Δ_v și cea de debit Δ_q) se aplică unor blocuri de calcul a valorii impuse corectate de viteză (v_c) și de debit (q_c), care la rândul lor, se aplică sistemelor de control a parametrilor respectivi, existente în instalație. Deci, aceste valori vor înlocui valorile impuse v^* , respectiv q^* furnizate de sistemul original pentru cele două bucle de reglare. Funcționarea blocurilor de calcul se bazează pe relațiile **[Tir09_8]**:

$$v_c = (1 - \Delta_v) \cdot v^* \quad (6.1)$$

$$q_c = (1 + \Delta_q) \cdot q^* \quad (6.2)$$

Prin poziționarea comutatoarelor K_1 și K_2 pe 1 sau 2 se poate trece cu ușurință între regimul upgradat cu soluția propusă și sistemul inițial de conducere.

Se observă că modificările propuse nu afectează instalația de automatizare existentă, ele având un caracter aditiv, iar trecerea dintr-un regim în altul este facilă. Aceasta este o cerință impusă de toți beneficiarii, atât din considerente economice cât și din considerente legate de siguranța instalației. Cele precizate largesc aria de aplicabilitate a soluției propuse pentru eliminarea fisurilor la turnarea continuă. Ea se poate grefa pe orice instalație aflată în funcțiune, cu costuri minime.

Cu excepția temperaturilor din cristalizor (matricea de senzori de temperatură) **[Tir09_1]**, restul mărimilor pe care le utilizează ca date de intrare SDF sunt preluate de la traductoarele care există deja în schemele practice utilizate (sunt traductoare numerice și analogice, de precizie ridicată). Riscul tehnologic (RT) se determină de tehnolog, în funcție de tipul oțelului care se toarnă și se introduce la schimbarea mărcii acestuia (de obicei, odată la câteva zile sau mai rar).

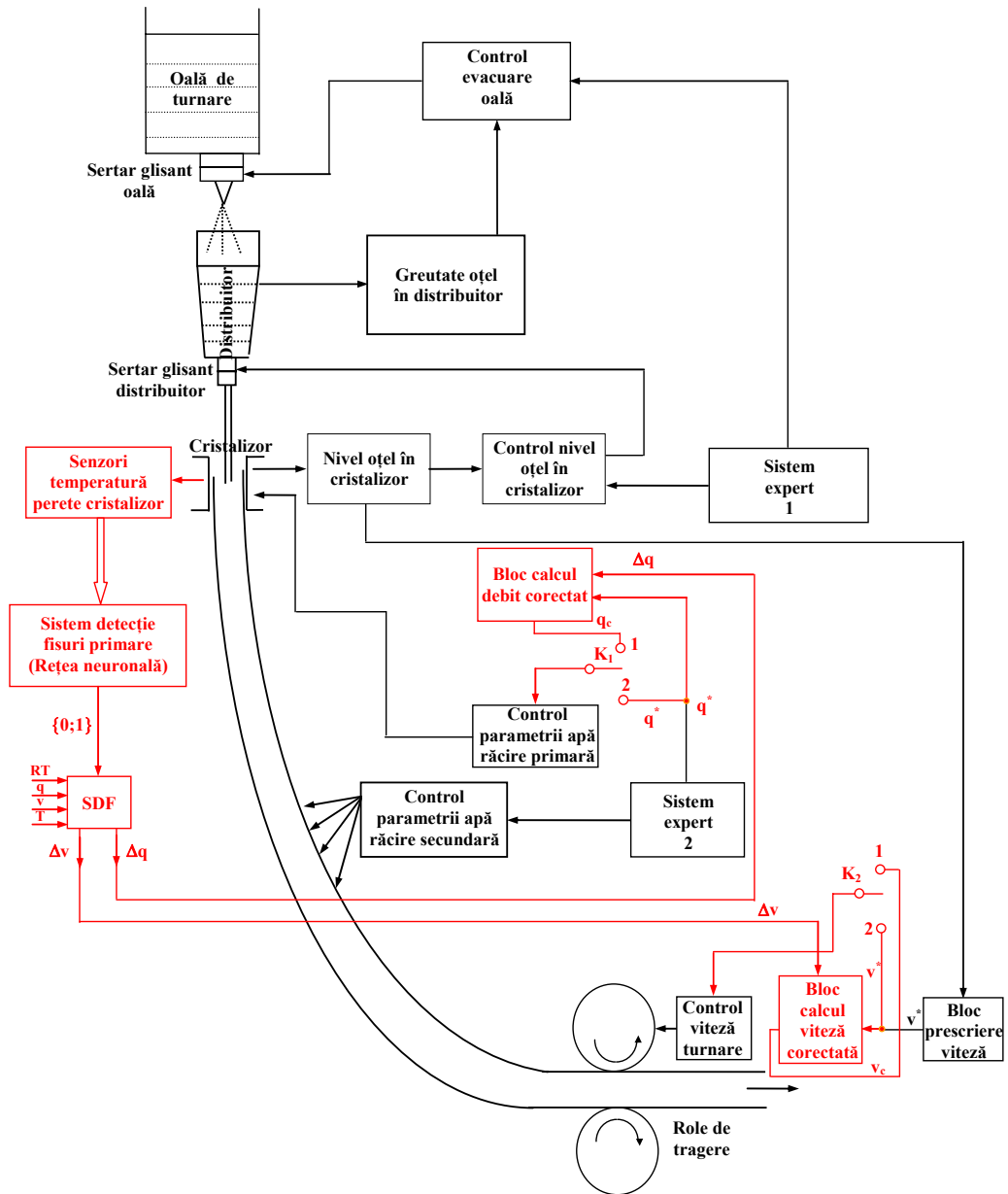


Fig. 6.1 Structura sistemului de conducere a procesului de turnare continuă

6.3 Simularea funcționării sistemului neuronal și fuzzy pentru detecția, predicția și eliminarea fisurilor în procesul de turnare continuă

6.3.1. Descrierea funcționării sistemului simulat

Pentru analiza funcționării întregului sistem neuronal și fuzzy propus în Capitolele 4 și 5, s-a efectuat simularea acestuia în mediul Matlab-Simulink [Cav94],[Fil07]. Schema de implementare este redată în fig. 6.2 [Tir10_6].

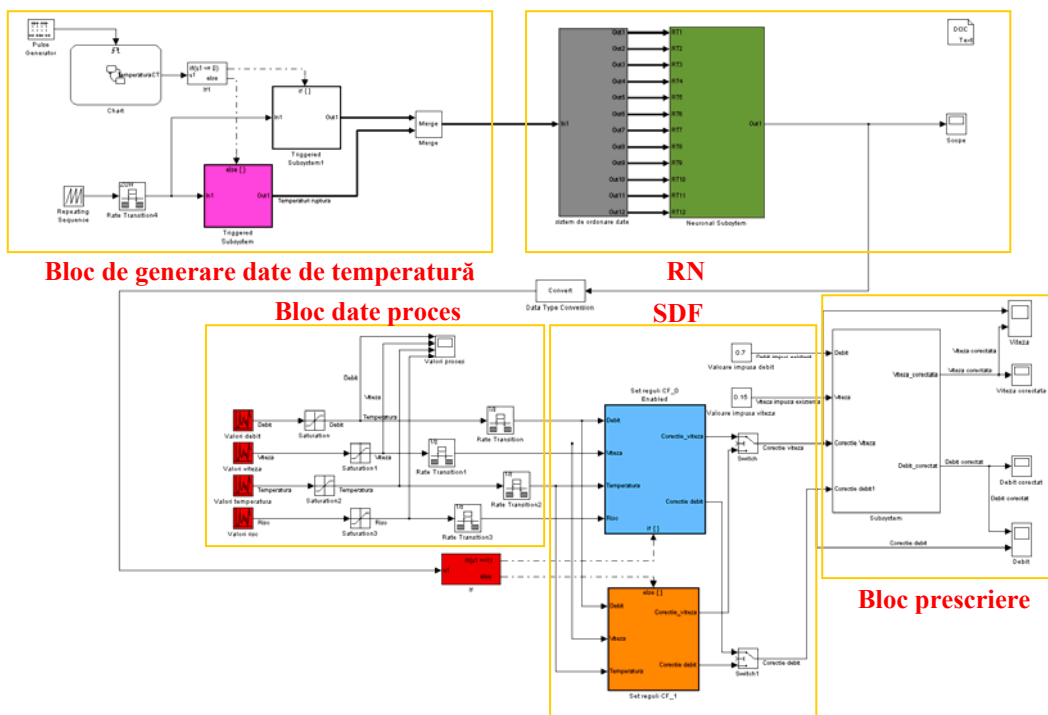


Fig. 6.2 Implementarea în Matlab-Simulink a sistemului neuronal și fuzzy

Sistemul este format dintr-un bloc de generare a valorilor de temperatură, rețeaua neuronală de detecție a fisurilor, blocul de generare a datelor din proces, sistemul de decizie fuzzy și blocul de prescriere a noilor valori pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire primară.

În vederea generării valorilor de temperatură se utilizează două seturi distincte de date, unul pentru situația în care procesul se desfășoară normal și nu există fisură și unul pentru situația în care apare o fisură.

Pentru a comuta între cele două seturi de date, se utilizează un switch – control implementat în Simulink-Stateflow. Acesta comută între cele două seturi de date (1 – cu fisură; 0 – fără fisură).

Un bloc activează succesiv (câte 120 s), baza de date „0”, respectiv „1”, ceea ce, practic, face să alterneze o situație fără fisuri, cu o situație cu fisuri. Toate datele sunt memorate în tabele „look-up data”.

Identificarea unei fisuri se face de către RN, care este formată din două tipuri de rețele (serie-dinamică și spațiale). O rețea serie-dinamică face procesarea a 10 valori de temperatură consecutive. Datele de la fiecare rețea serie-dinamică sunt apoi procesate de către o rețea spațială care analizează valorile primite de la două serie-dinamică. Valoarea mărimii de ieșire a acestor rețele spațiale (0 sau 1) este introdusă într-un bloc logic SAU (OR). În funcție de rezultatul operației logice (efectuată între rețelele spațiale), la ieșirea blocului neuronal se va obține 0 (nu există fisură primară), respectiv 1 (există fisură primară).

În funcție de valoarea mărimii de ieșire a rețelei neuronale, SDF va activa două baze de reguli diferite: pentru „0”, baza corespunzătoare inexistenței fisurilor primare (225 reguli), iar pentru „1”, baza corespunzătoare existenței unei fisuri primare (75 reguli). Primul set are patru intrări (viteza de turnare, debit apă de răcire primară, temperatura în distribuitor și riscul tehnologic), toate citite din proces (în realitate). Pentru simulare a fost folosit „Blocul date proces”, descris în Capitolul 5 (simularea SDF). Parametrul „risc tehnologic” nu mai este necesar pentru al doilea set de reguli, deoarece valoarea acestuia este acum maximă, pentru că s-a detectat deja apariția unei fisuri. Cele două ieșiri ale SDF (Δ_v - corecția de viteză, respectiv Δ_q - corecția de debit), se aplică blocului de prescriere (Bloc calcul debit corectat și respectiv Bloc calcul viteză corectată). El are rolul de a înlocui valorile impuse pentru viteză și debit (v^* , q^*), produse de instalația de automatizare existentă, cu noile valori corectate ale acestora (v_c , q_c), rezultate din ieșirile SDF și calculate cu relațiile (6.1) și (6.2). Pentru simulare, valorile v^* și q^* au fost luate egale cu mărimile respective măsurate din proces (din „Bloc date proces”) **[Tir10_1]**.

6.3.2. Validarea funcționării sistemului simulat

În vederea validării funcționării sistemului simulat, la intrarea rețelei neuronale de detecție a fisurilor, au fost aplicate două seturi diferite de date măsurate în procesul real și memorate sub formă tabelară. Unul dintre seturi se referă la situația când nu există fisură, iar celălalt se referă la situația când o fisură a fost detectată. Ieșirile din rețeaua neuronală sunt 0, respectiv 1 (fig. 6.3.a, respectiv 6.3.b) și demonstrează că rețeaua funcționează corect și a detectat fisura, în cazul apariției sale.

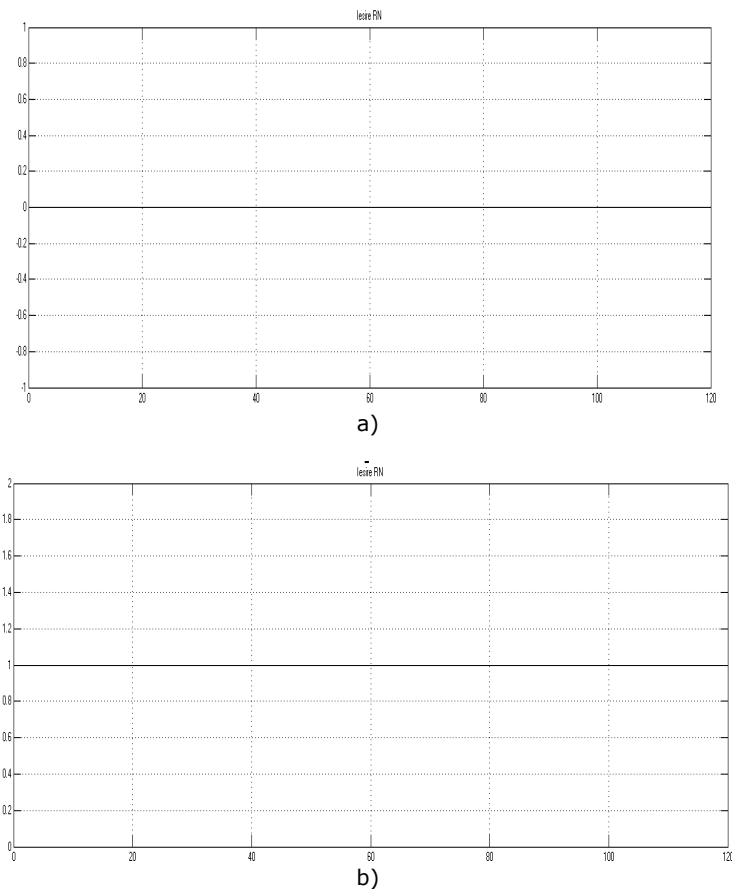
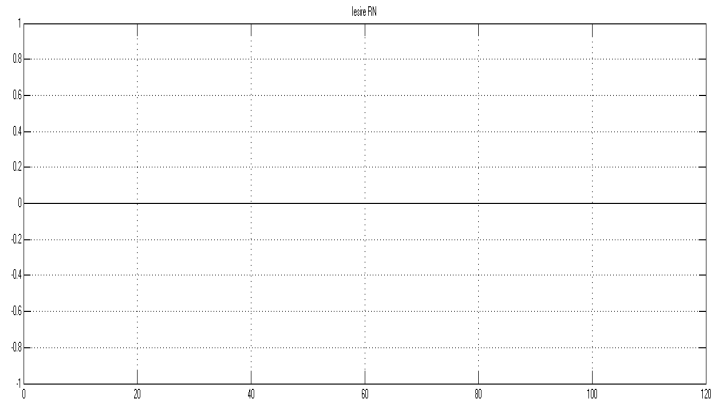


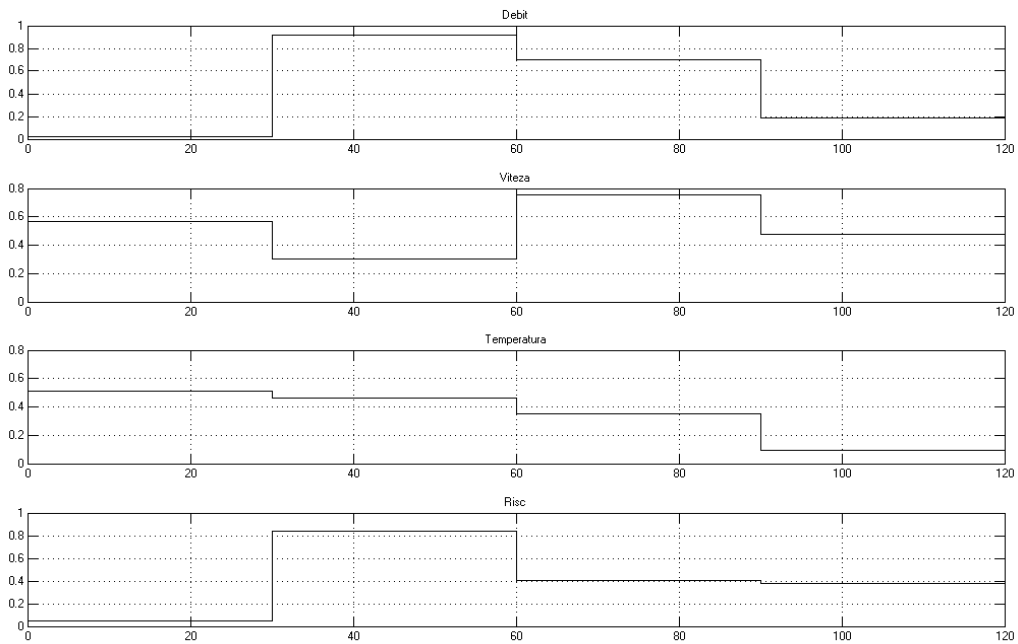
Fig. 6.3 Semnalul de ieșire a rețelei neuronale
a) RN=0; b) RN=1

Pentru fiecare din cele două cazuri au fost generate la intrarea SDF, în mod aleator[Pro06], mai multe valori pentru mărimile de intrare (debit, viteză, temperatură, risc , dacă rețeaua neuronală a produs la ieșire „0” - nu există fisuri sau debit, viteză, temperatură, dacă rețeaua neuronală a produs la ieșire „1” – există fisuri primare). Aceste valori sunt prezentate în Fig 6.4 și 6.5. a – ieșirea RN; b – variația în timp (120 secunde) a mărimilor de intrare a SDF. La ieșirea sistemului s-au obținut valorile aferente corecției de viteză, și valorile corectate ale vitezei (noile valori prescrise – Fig.6.5. c), precum și valorile aferente corecției de debit, și valorile corectate ale debitului (noile valori prescrise - Fig,6.5. d).



a) Ieșirea RN

În figura 6.4.b se prezintă valorile variabilelor de intrare (debit, viteză, temperatură, risc) cuprinse între 0 și 1, generate aleator pe un interval de 120 de secunde. Se poate observa că o valoare este menținută constantă 30 secunde, rezultând câte un set de 4 valori pentru fiecare dintre cele 4 mărimi de intrare.



b) Date de intrare în SDF

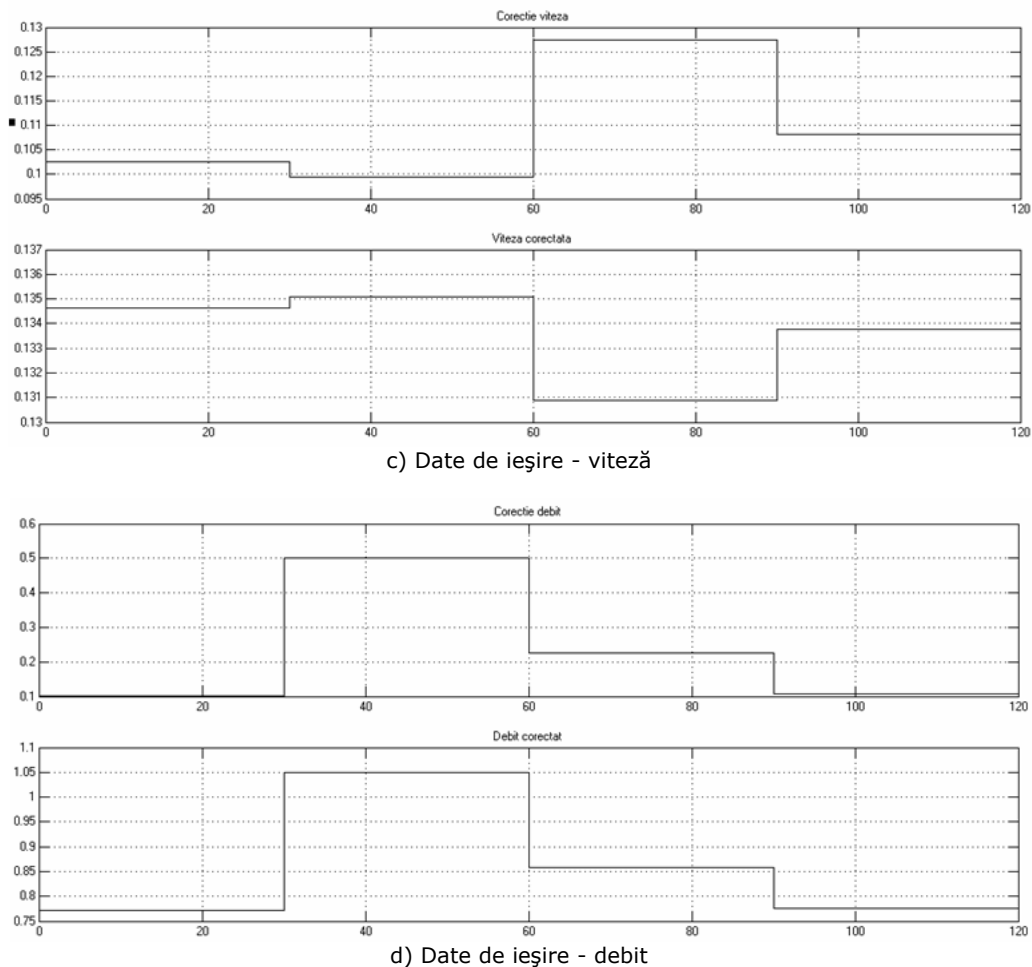
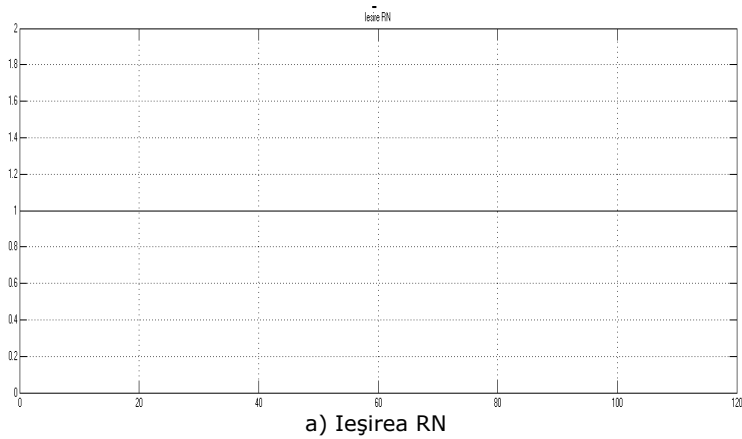


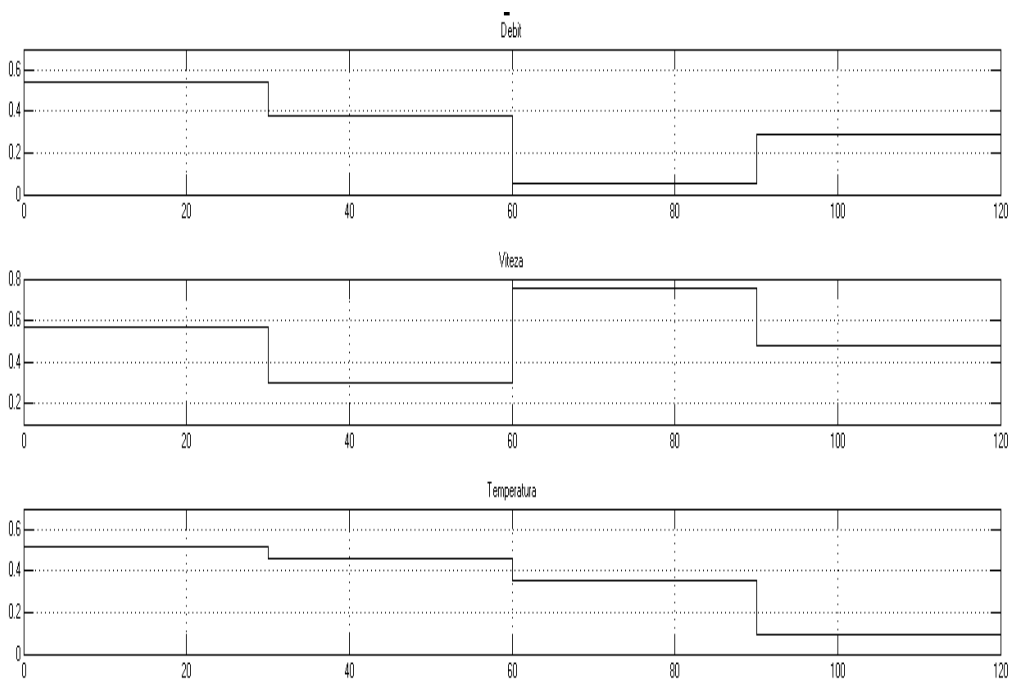
Fig. 6.4 Validarea SDF (cazul RN=0)

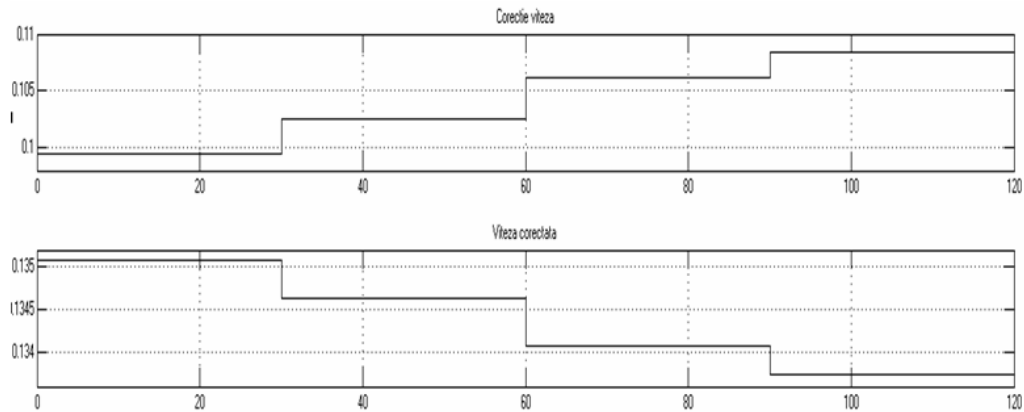
Din analiza graficelor din Fig. 6.4 c și d, se observă corecțiile impuse de viteză și debit, precum și noile valori corectate (noile mărimi prescrise). În primele 30s, când valoarea debitului era mică, viteza mare, temperatura mare și riscul mic, iar semnalul dat de RN era 0, SDF-ul a efectuat corecție mică de viteză și o corecție foarte mică de debit. Se observă de asemenea, că viteza corectată a scăzut iar valoarea debitului corectat a crescut, aceste valori fiind calculate de către blocul de prescriere.

Evoluția graficelor menționate, în următoarele perioade de câte 30s confirmă faptul că utilizarea sistemului conceput conduce la obținerea dezideratului impus: realizarea efectivă a corecțiilor de viteză și debit, precum și modificarea valorilor prescrise pentru viteză și debit. Acest fapt a fost confirmat și în cursul experimentărilor industriale realizate pe instalația de turnare continuă de la A.M.-HD [Tir10_7].

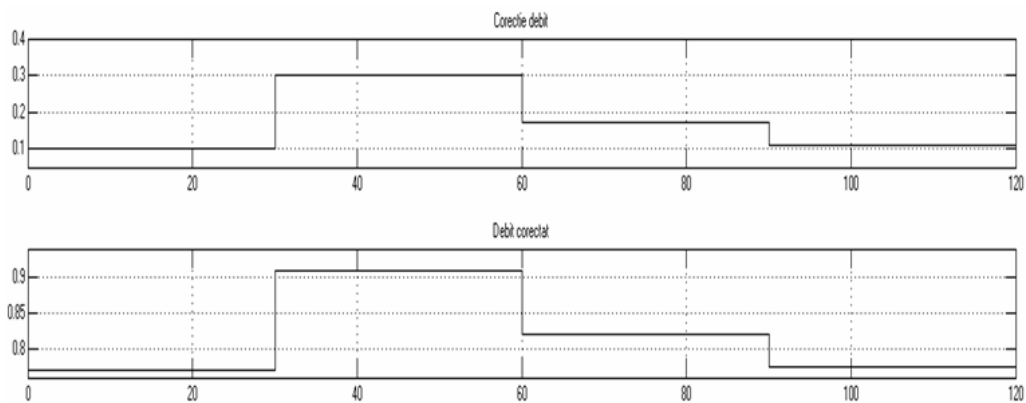


În figura 6.5.b se prezintă valorile variabilelor de intrare (debit, viteză, temperatură), cuprinse între 0 și 1, generate aleator pe un interval de 120 de secunde. Se poate observa că o valoare este menținută constantă 30 secunde, rezultând câte un set de 4 valori pentru fiecare dintre cele 3 mărimi de intrare.





c) Date de ieșire – viteză



d) Date de ieșire – debit

Fig. 6.5 Validare SDF (cazul RN=1)

Analizând graficele din Fig. 6.5 c și d, se observă corecțiile impuse de viteză și debit, precum și noile valori corectate (noile mărimi prescrise). În primele 30s, când valoarea debitul era mare, viteza mare, temperatura mare, iar semnalul dat de RN era 1, SDF-ul a efectuat o corecție mică de viteză și o corecție mare de debit. Se observă de asemenea, că viteza corectată a scăzut iar valoarea debitul corectat a crescut, aceste valori fiind calculate de către blocul de prescriere.

Evoluția graficelor menționate, în următoarele perioade de câte 30s confirmă faptul că utilizarea sistemului conceput conduce la obținerea dezideratului impus: realizarea efectivă a corecțiilor de viteză și debit, precum și modificarea valorilor prescrise pentru viteză și debit. Acest fapt a fost confirmat și în cursul experimentărilor industriale realizate pe instalația de turnare continuă de la A.M.-HD [Tir10_7].

Analizând cazurile prezentate în Fig. 6.4 și 6.5, se pot trage următoarele concluzii :

- SDF prelucrează mărimile de intrare și elaborează corecțiile de viteză și de debit în mod corect, conform celor două baze de reguli aferente ieșirilor rețelei neuronale;
- Blocul de prescriere corectează valorile prescrise pentru viteză și debit, în conformitate cu ieșirile SDF;

Prin simulare în Matlab-Simulink [Cov94],[Fil07] s-a demonstrat corectitudinea soluțiilor propuse pentru predicția, detecția și eliminarea fisurilor din semifabricat la turnarea continuă, în sensul că în oricare dintre situațiile în care s-a simulat apariția unei fisuri RN le-a detectat, iar SDF a luat măsurile necesare (modificarea debitului apei de răcire primară și/sau a vitezei de turnare) [Tir10_].

6.4 Experimentări industriale. Validarea soluțiilor propuse

În vederea validării industriale a soluțiilor propuse pentru eliminarea fisurilor prezentate anterior s-a procedat la implementarea acestora într-o instalație de turnare continuă reală, în funcțiune, existentă la **A.M.-HD** (fig.6.6). Fiind o instalație în funcțiune, implementarea s-a realizat fără perturbarea semnificativă a procesului de producție.



Fig. 6.6 Instalația de turnare continuă de la A.M.-HD.

În fig.6.7 se prezintă instalația de turnare continuă (print-screen de pe sistemul SCADA al procesului industrial) precum și parametrii cei mai importanți de funcționare (pentru firul 1) în momentele când s-au făcut încercările.

În vederea evidențierii parametrilor de funcționare în momentele când s-au făcut încercările pentru o parte dintr-e elemente componente ale instalației de turnare continuă, se prezintă print-screenuri de pe sistemul SCADA al procesului industrial după cum urmează: fig.6.7 pentru distribuitor, fig.6.8 pentru cristalizor, fig.6.9 pentru răcirea primară.

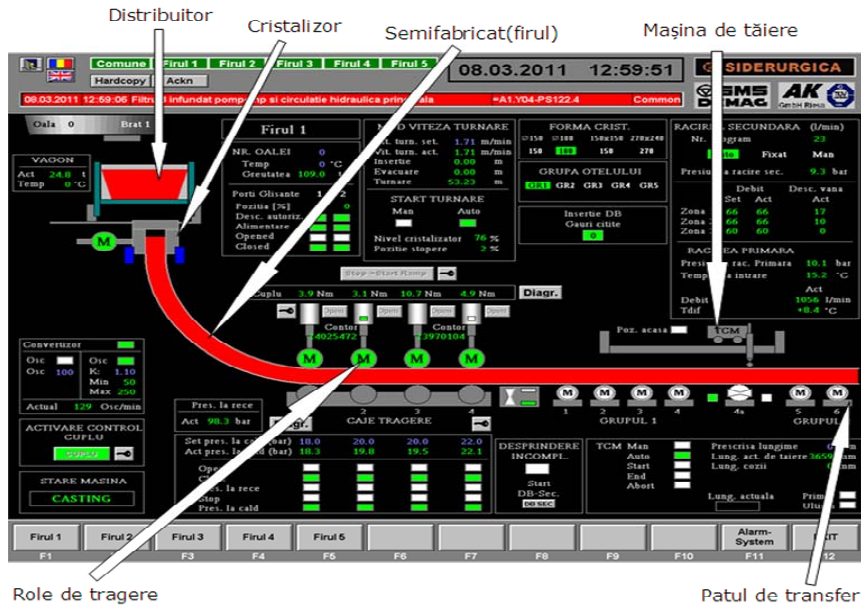


Fig. 6.7 Instalația de turnare continuă - print-screen de pe sistemul SCADA al procesului industrial



Fig. 6.7 Prezentarea parametrilor de funcționare în momentele când s-au făcut încercările pentru distribuitor, print – screen de pe sistemul SCADA al procesului industrial (A.M.-HD)

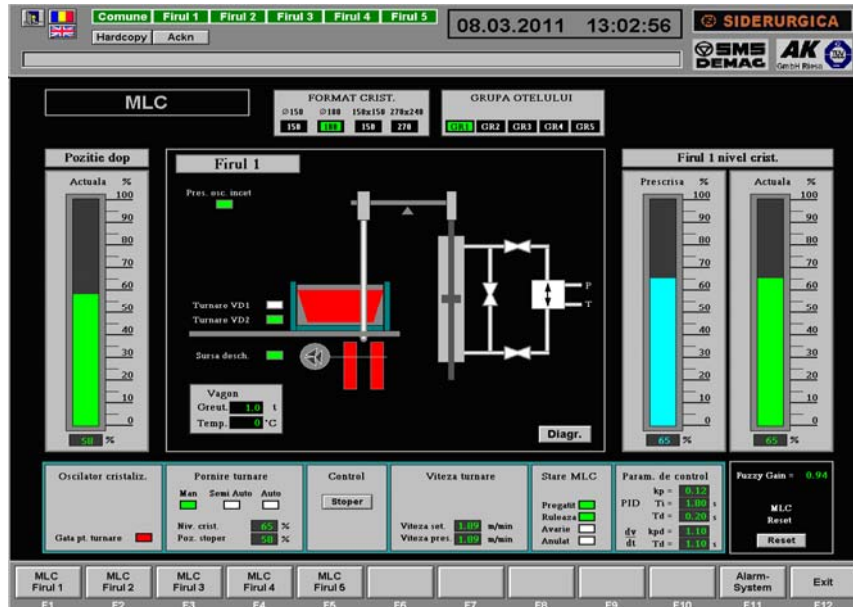


Fig. 6.8 Prezentarea parametrilor de funcționare în momentele când s-au făcut încercările pentru cristalizor (fir1), print – screen de pe sistemul SCADA al procesului industrial (A.M.-HD)

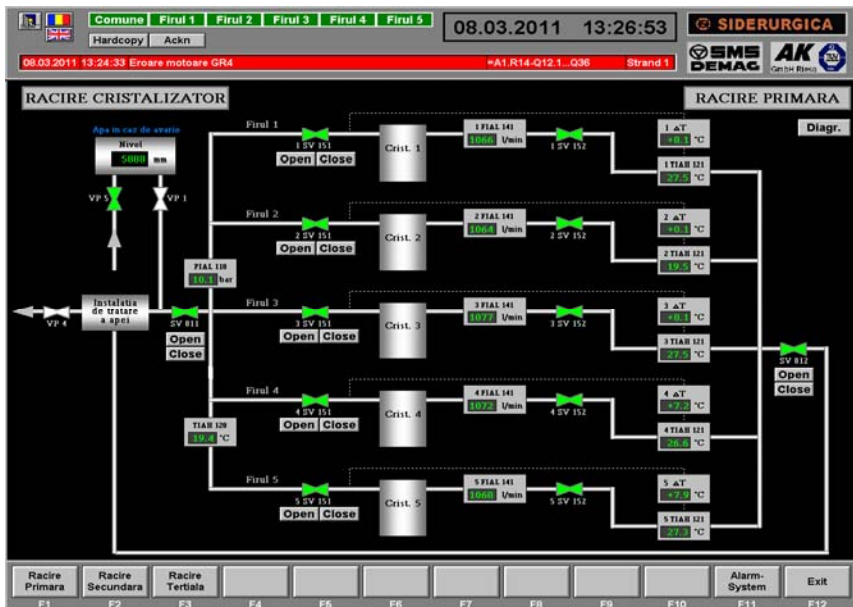


Fig. 6.9 Prezentarea parametrilor de funcționare în momentele când s-au făcut încercările pentru răcirea primară, print – screen de pe sistemul SCADA al procesului industrial (A.M.- HD)

Din motive obiective, nu au putut fi analizate toate cazurile tratate teoretic, de aceea s-a pus accentul pe două categorii de probleme:

- a) datorită faptului că sistemul de eliminare a fisurilor produce corecții de viteză care se aplică sub formă de treaptă, a fost necesară analiza posibilității de apariție a alunecării între semifabricat și rolele de tragere (alunecare care, de altfel, există la pornirea turnării, dar atunci nu este importantă)[Che10]. Pentru eliminarea acestei alunecări, care poate compromite reglajul de viteză, s-a propus și dezvoltat *un sistem fuzzy adaptiv (SFA)* [Cox93],[Wan94],[Tir10_02] care va fi prezentat în paragraful 6.4.1.
- b) SDF și SFA au fost implementate pe un PLC Simatic S7 300, echipat cu procesorul CPU 315-2DP [***_2] după care acesta a fost testat în instalație [Tir10_7]. Precizări vor fi efectuate în paragraful 6.4.2.

6.4.1. Sistem fuzzy adaptiv pentru eliminarea alunecării semifabricat-role de tragere

După cum se observă din fig. 6.7, sistemul de antrenare a semifabricatului este compus din 4 motoare asincrone, alimentate de la convertizoare de frecvență și a fost proiectat și realizat de firma SIEMENS (sistemul SIMOVERT) [Sie97],[***_4]. Convertizoarele de frecvență primesc valoarea mărimilor de referință, de la PLC-ul master S7 400 care conține un regulator de tip PI [Ast95],[Pro95],[Use03],[Bra03]. Totodată, pentru repartizarea uniformă a efortului de tragere între cele 4 subunități, un convertizor lucrează în regim de master, iar celelalte 3 – slave [Sie97]. Această configurație permite ca, din exterior, valoarea impusă de turație să fie aplicată doar convertizorului master, urmând ca el să o transmită și celorlalte (slave), asigurând totodată un cuplu egal pentru cele 4 motoare care antrenează rolele de tragere. Toți parametrii acordabili pot fi modificați și din exterior [Qia96],[Hua02],[Pro04] prin magistrala de date la care sunt conectate convertizoarele [Sie98].

Din analiza SDF de predicție și eliminare a fisurilor, precum și din simularea acestuia în Simulink, s-a observat că, în funcție de anumite cazuri specifice, acesta produce corecții de viteză care se aplică buclei existente de reglare. Aplicarea bruscă a acestor corecții va conduce la apariția alunecării semifabricat-role de antrenare, prelungind practic timpul scurs între apariția corecției și momentul în care semifabricatul (nu motorul) ajunge la noua valoare prescrisă de viteză. Apariția alunecării conduce și la micșorarea coeficientului de frecare semifabricat-rolă, mărind și mai mult timpul menționat [Won01],[Cam03], [Tir10_6].

Datorită faptului că eficiența metodei de predicție și eliminare a fisurilor depinde critic de rapiditatea cu care corecțiile de viteză sunt realizate, s-a conceput un sistem de control al alunecării și de eliminare, pe cât posibil, a acesteia. Principiul metodei este prezentat în fig. 6.11 [Tir10_2].

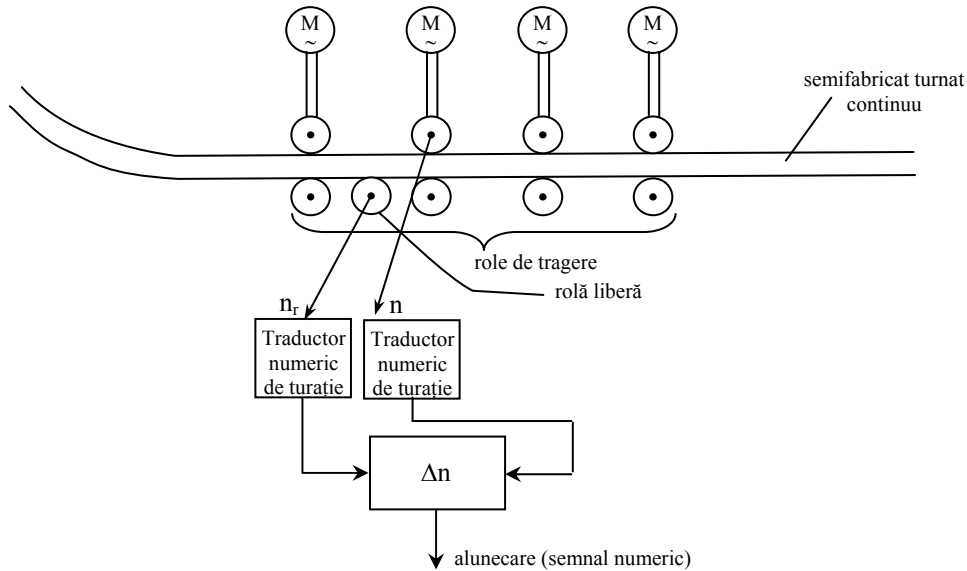


Fig. 6.11 Sistemul de determinare a alunecării

După cum se observă, a fost montată o rolă suplimentară liberă care este antrenată de bara turnată (semifabricat). Dacă bara nu alunecă pe rolele de tragere (antrenate, fiecare, de motorul respectiv), turațiile celor două role vor fi egale și deci nu există alunecare. Cu cât alunecarea este mai mare, cu atât cele două turații vor diferi mai mult. Turațiile sunt măsurate cu traductoare numerice existente în instalație. Un element de scădere din PLC va produce semnalul „alunecare”. În Fig.6.12 rola suplimentară liberă în ansamblul instalației de turnare continuă, iar în Fig.6.13 rola suplimentară liberă în timpul turnării.

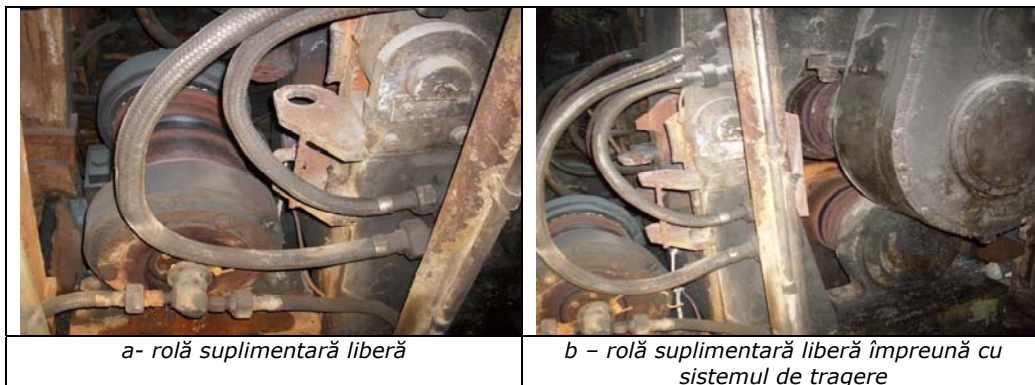


Fig. 6.12 Rola suplimentară liberă în ansamblul instalației de turnare continuă



Fig. 6.13 Rola suplimentară liberă în timpul turnării

Pentru eliminarea alunecării a fost conceput un **sistem fuzzy adaptiv (SFA)** [Tir10_2] care, analizând două mărimi de intrare (corecția de viteză (Δv), impusă de SDF de eliminare a fisurilor și alunecarea (s) propriu-zisă), produce o modificare a comportării dinamice a buclei de reglare a vitezei motoarelor de tragere, modificând coeficientul T_i (constanta de timp de integrare) al regulatorului PI din PLC [Won92],[He93],[Hua99],[Kim00]. În fig.6.14 se prezintă structura sistemului adaptiv pentru reglarea vitezei [Pro04],[Tir10_2].

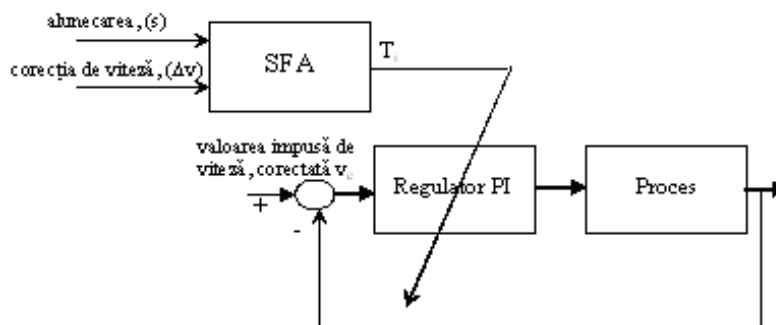


Fig. 6.14 Sistem adaptiv pentru reglarea vitezei

6.4.1.1 Proiectarea SFA

În vederea realizării SFA [Tir09_2],[Tir10_2] s-au ales două mărimi de intrare și o mărime de ieșire, fiind stabiliți termenii lingvistici (atât pentru intrări cât și pentru ieșiri), funcțiile de apartenență și baza de reguli [Wan94],[Pre97],[Zul09]. În figura 6.15 este prezentată schema bloc a SFA realizată în Matlab[***93],[***97].

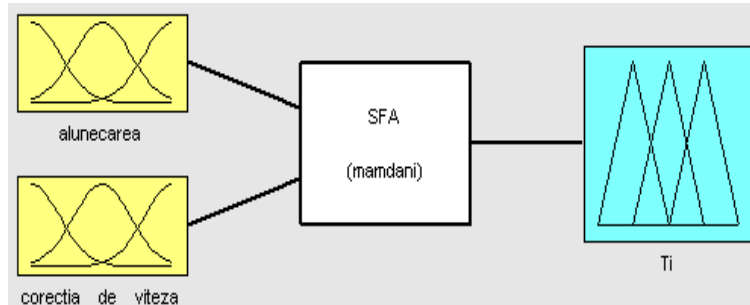


Fig. 6.15 Schema bloc a SFA

În figurile 6.16, 6.17, 6.18 se prezintă funcțiile de apartenență ale celor două mărimi de intrare și a mărimii de ieșire. Având în vedere caracteristicile procesului au fost adoptate funcții de apartenență de tip trapezoidal, atât pentru mărimile de intrare cât și pentru cea de ieșire [Pre97],[Bou07]. Astfel, pentru mărimea de intrare „alunecare” s-au ales trei termeni lingvistici, pentru „corecția de viteză” s-au ales cinci termeni lingvistici, iar pentru mărimea de ieșire „Ti” s-au ales trei termeni lingvistici. Întregul domeniu de „alunecare” și respectiv de „corecție de viteză” este acoperit cu termeni lingvistici.

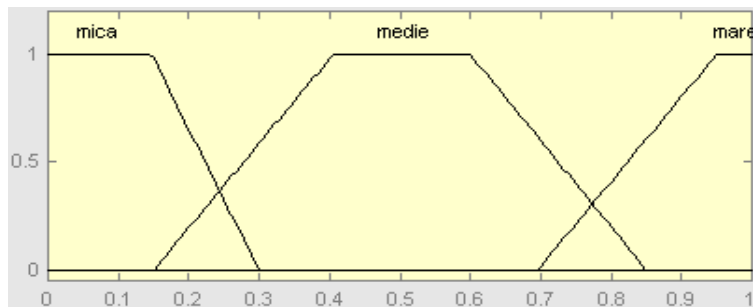


Fig. 6.16 Funcție de apartenență „alunecare”

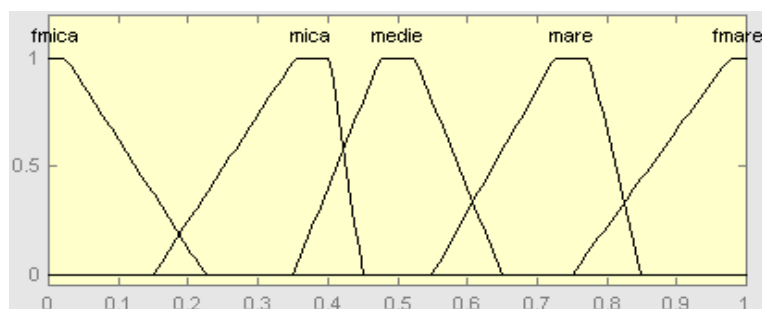


Fig. 6.17 Funcție de apartenență „corecție de viteză”

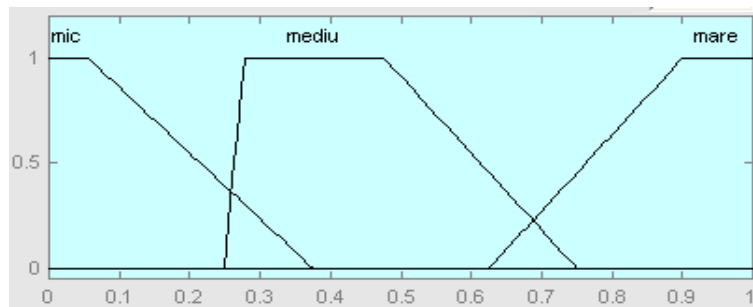


Fig. 6.18 Funcție de apartenență „Ti”

În Tabelele 6.1, 6.2, 6.3 se prezintă valorile reale și valorile normate pentru termenii lingvistici aleși, atât pentru mărimile de intrare cât și pentru cea de ieșire.

1) alunecare (s)

Număr stări: 3

Tabel 6.1

Stări	Domeniul real [%]	Domeniul valorilor normate
mica	0÷30	0 ÷0,3
medie	15÷85	0,15 ÷0,85
mare	70÷100	0,7 ÷1

2) corecție viteză turnare (corecția vitezei de turnare, [m/min])

Număr stări: 5

Tabel 6.2

Stări	Domeniul real [%]	Domeniul valorilor normate
Fmică	0÷4	0÷0,25
Mică	4÷8	0,15÷0,45
Medie	8÷12	0,35÷0,65
Mare	12÷16	0,55÷0,85
Fmare	16÷20	0,75÷1

3) Ti (constanta de timp de integrare)

Număr stări: 3

Tabel 6.3

Stări	Domeniul real [Ti(s)]	Domeniul valorilor normate
Mic	35÷40	0 ÷0,375
Medie	38÷50	0,25 ÷0,75
mare	48÷62	0,625 ÷1

Inferența utilizată este de tip Mamdani max-min [Zim85],[Pre97], iar Tabela de inferență pentru o parte din reguli este prezentată în Fig. 6.19. Sunt surprinse valorile ferme la un moment oarecare de timp pentru mărimile de intrare (alunecare=0.229, corecție de viteză=0.682) și valoarea fermă a constantei de timp

de integrare ($T_i=0.845$). Se observă că pentru aceste valori sunt active 2 reguli, regula 4 și regula 9.

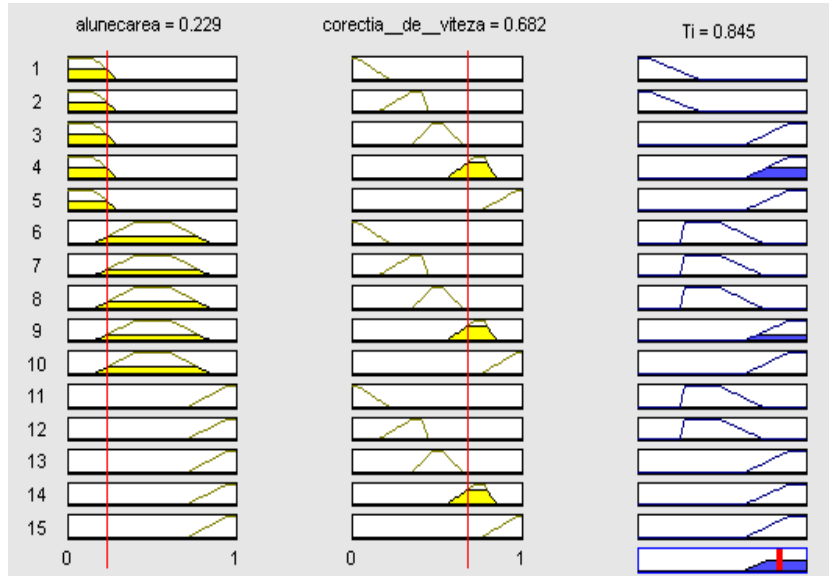


Fig. 6.19 Tabela de inferență pentru SFA

Suprafețele de control obținute prin simulare conform schemei din Fig. 6.15 sunt prezentate în Fig. 6.20 și Fig. 6.21. Se poate observa că acestea nu prezintă discontinuități.

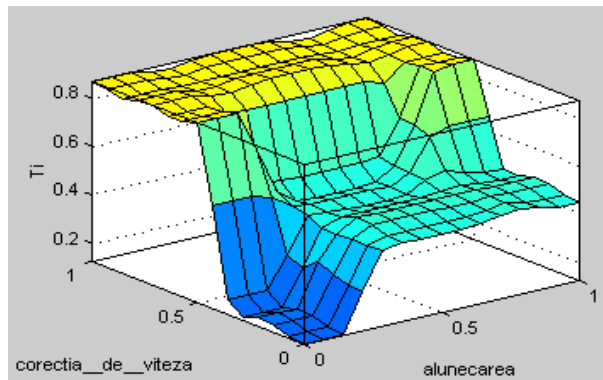


Fig. 6.20 Suprafata de control
 $T_i=f(\text{corectie de viteza, alunecare})$

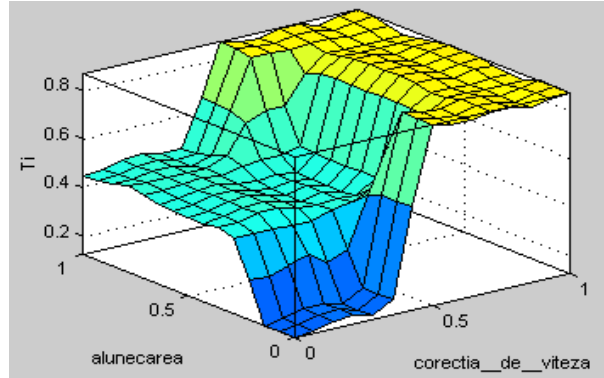


Fig. 6.21 Suprafata de control
 $T_i = f(\text{alunecare, corectie de viteza})$

6.4.1.2 Simularea sistemului actual de reglare a vitezei

Simularea sistemului actual de reglare a vitezei s-a efectuat pentru a determina în ce plajă de variație trebuie să se modifice T_i , astfel încât să se elimine alunecările.

În figura 6.22 este prezentată implementarea în Simulink [Cav94] a buclei de reglare a vitezei existente în instalație [Tir08_3]. Partea fixă a sistemului poate fi considerată ca fiind de ordinul 2, cu funcția de transfer:

$$H_L(s) = \frac{T_2 \cdot T_1 \cdot K_L}{\left(s + \frac{1}{T_1}\right)\left(s + \frac{1}{T_2}\right)} \quad (6.3)$$

cu: $K_L=10$, $T_1=1s$, $T_2=2s$.

Pentru simulare s-au folosit datele reale, care realizează această operație în mod automat [Yes04].

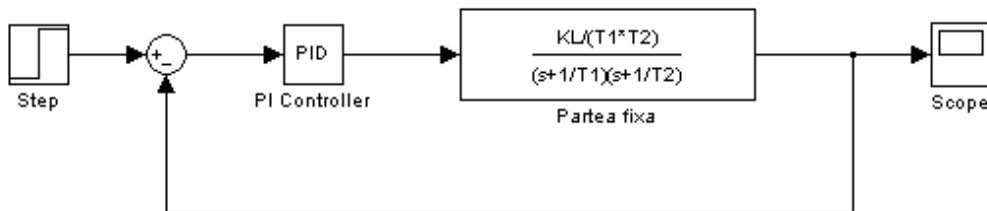
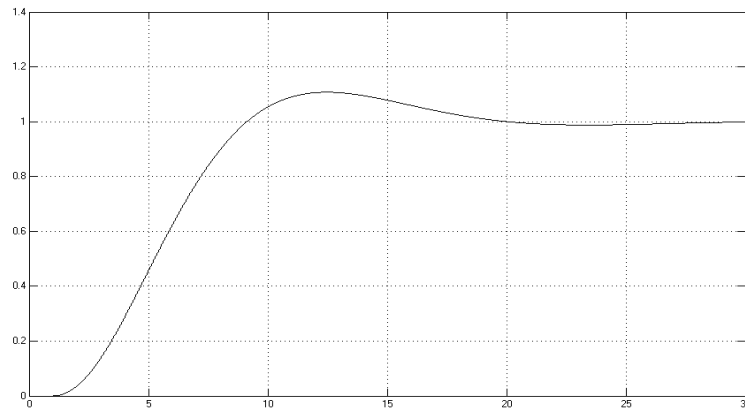


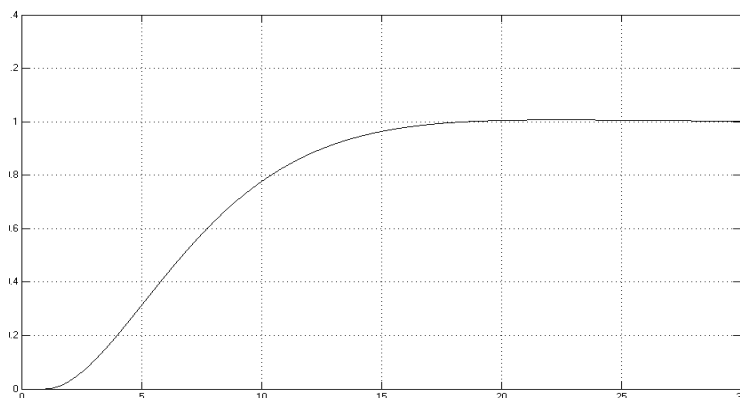
Fig. 6.22 Schema de simulare a sistemului de reglare a vitezei

Parametrii de acordare ai regulatorului PI [Pro95], existenți inițial, au fost $K_p=0.0125$ și $K_i=1/T_i=0.027$ ($T_i=37s$), răspunsul buclei de viteză fiind prezentat în figura 6.23.

Fig. 6.23 Răspunsul sistemului pentru $T_i=37s$

Se observă că în acest caz, timpul de creștere este de aproximativ 8s, suficient de rapid pentru a conduce la apariția alunecării material-rol de tragere la impunerea unei trepte de viteză.

Modificând parametrii de acordare ai regulatorului PI la valorile $K_p=0.0125$ și $K_i=1/T_i=0.016$ ($T_i=62,5s$), s-a obținut răspunsul din figura 6.24.

Fig. 6.24 Răspunsul sistemului pentru $T_i=62,5s$

În acest caz, timpul de creștere a devenit de aproximativ 16s, care, verificat experimental, a asigurat dispariția completă a alunecării. De asemenea, se observă dispariția suprareglajului și scăderea generală a pantei de creștere a vitezei, care favorizează și mai mult eliminarea alunecării.

6.4.1.3 Implementarea și simularea sistemului de reglare a vitezei echipat cu SFA

Sistemul adaptiv de eliminare a alunecării a fost implementat în Simulink și este prezentat în figura 6.25 [Tir10_2].

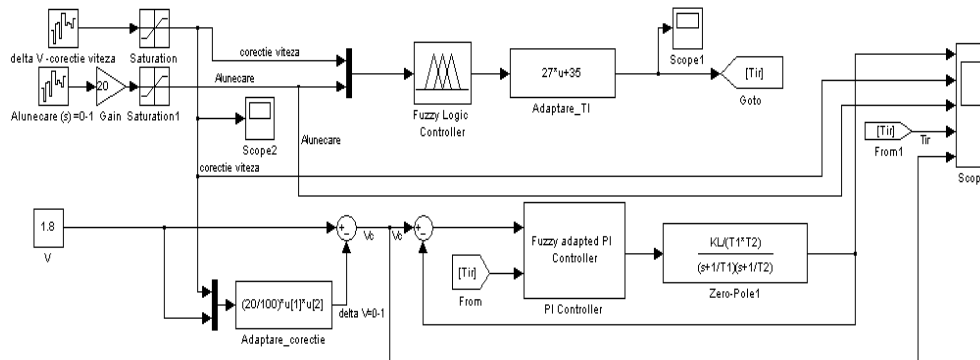


Fig. 6.25 Implementarea Simulink a sistemului de reglare a vitezei echipat cu SFA

La cele două intrări (alunecare și corecție de viteză) au fost aplicate semnale aleatoare[Pro06], iar la ieșire se obține răspunsul sistemului pentru fiecare combinație a intrărilor (fig. 6.25). Se precizează faptul că mărimile de intrare sunt în realitate generate de sistemul conceput pentru predicția și eliminarea fisurilor (corecția de viteză Δv și valoarea corectată pentru viteză), respectiv de sistemul de detecție a alunecării.

În figura 6.26 se prezintă rezultatele simulării sistemului de reglare a vitezei cu sistem fuzzy adaptiv.

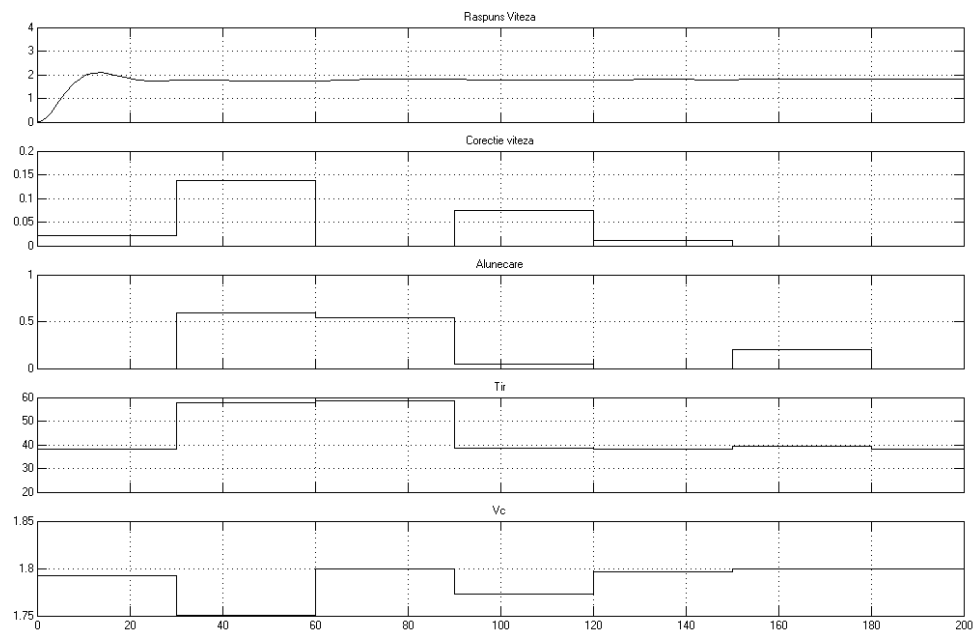


Fig. 6.26 Rezultatele simulării sistemului de reglare a vitezei echipat cu SFA

Analizând graficele din figura 6.26 rezultate din implementarea în Simulink a sistemului adaptiv de reglare a vitezei (Fig. 6.25) se observă că:

- corecția de viteză Δv (produsă de sistemul de predicție și eliminare a fisurilor) este transformată în valori reale (în blocul „adaptare corecție”) și împreună cu valoarea impusă pentru viteză v (considerată constantă și egală cu 1.8 [m/min]) formează valoarea corectată de viteză, v_c , impusă buclei de reglare.

- mărimea de ieșire T_i a SFA (valori 0÷1) este transformată în valori reale (blocul „adaptare T_i ”), formând variabila T_{ir} (timpul de integrare al regulatorului, cu valori între 37 s și 62 s).

- la intrarea SFA au fost aplicate semnale aleatoare cu valori între 0 și 1 și durata de 30 s. Acestea au condus la modificarea T_{ir} și în final, a răspunsului sistemului de reglare a vitezei (Fig.6.26). Din analiza acestui ultim grafic, se observă că au fost realizate corecțiile impuse de viteză obținându-se: în primele 30 [s], corecția de viteză este foarte mică, alunecarea zero, T_{ir} elaborat de SFA mic, viteza de turnare crește rapid și se stabilizează la aproximativ 1.8 m/min; în următoarele 30 [s], crește atât alunecarea cât și corecția de viteză, viteza impusă scade la 1.75 m/min, T_{ir} crește la 58 [s], iar răspunsul scade lent la 1.75 m/min fără alunecare. Evoluția graficelor menționate, în următoarele perioade de câte 30 [s] confirmă faptul că utilizarea sistemului conceput conduce la obținerea dezideratului impus: realizarea efectivă a corecțiilor de viteză fără alunecări. Acest fapt a fost confirmat și în cursul experimentărilor industriale realizate pe instalația de turnare continuă de la A.M.-HD [Tir10_7].

6.4.2. Rezultate experimentale

După cum s-a precizat în prima parte a paragrafului 6.4., au fost implementate în regim industrial cu ajutorul unui PLC S7 300 atât SDF de predicție și eliminare a fisurilor cât și sistemul fuzzy adaptiv de eliminare a alunecării semifabricat-rol de tragere (SFA).

În Fig.6.27 se prezintă modul de conectare a PLC-ului în schema de conexiuni a procesului de turnare continuă.

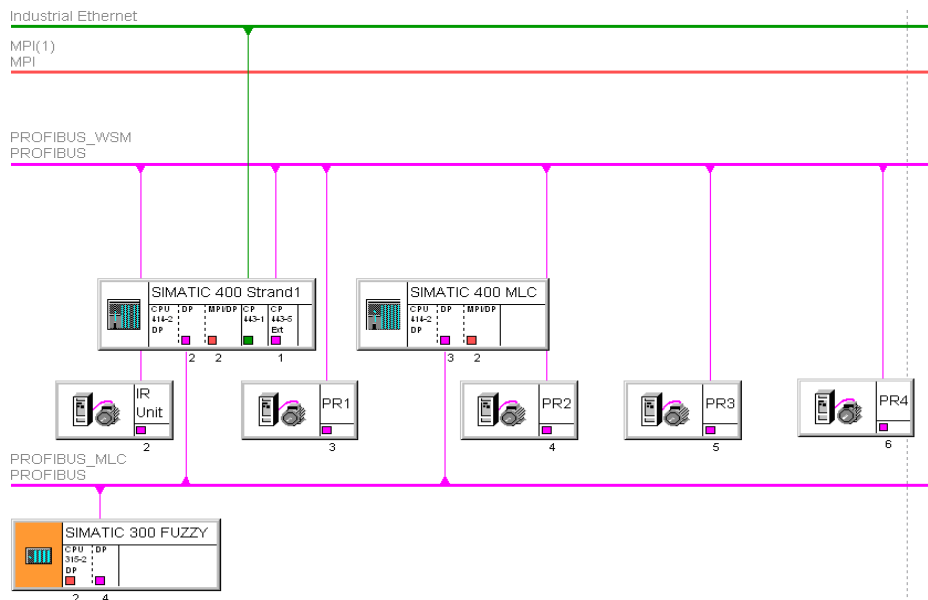


Fig. 6.27 Implementarea PLC-ului în schema de conexiuni a turnării continue

Pentru implementarea PLC-ului S7 300 [***_2] s-au respectat următoarele etape:

- se modifică configurația cu introducerea modului S315-2DP aferent SDF și SFA;
- se alege tipul procesorului din biblioteca hardware;
- se conectează noul PLC S315-2DP pe rețeaua Profibus;
- se stabilesc variabilele de comunicație între cele două PLC-uri;
- se programează interblocajele pe modul de funcționare sisteme fuzzy în S414-2DP;
- se descarcă noua configurație hardware și modificările software, se testează partea de comunicație și funcționarea interblocajelor - funcționarea sistemelor fuzzy;
- se modifică sistemul SCADA pentru observarea corecțiilor și a alunecării (validare/invalidare sistem).

Implementarea soluției în cadrul instalației industriale a constat în principal în următorul parcurs **[Tir10_7]**:

1. Pe un PLC Simatic S7 300 au fost implementate SDF și SFA. Configurarea și programarea PLC-ului s-a făcut utilizând software-ul Step 7 [***_3]. Încărcarea în PLC a configurației hardware și respectiv software s-a realizat cu ajutorul unei console de programare pe MPI/DP (Fig.6.28). Programele aferente, editate în limbaj STL (listă de instrucțiuni) sunt prezentate în Anexa 4.



Fig. 6.28 Încărcarea în PLC a configurației hardware și software utilizând o consolă de programare pe MPI

2. Cu colaborarea specialiștilor A.M.-HD, PLC-ul a fost introdus în schema de conducere a procesului de turnare continuă. Implementarea și simularile s-au efectuat când instalația de turnare continuă era oprită pentru efectuarea reviziilor tehnice. În momentul repornirii turnării sistemul a fost pus în funcțiune. În Fig.6.29 se prezintă implementarea PLC-ului S7300 în schema reală de conducere a turnării continue.



Fig. 6.29 Implementarea PLC-ului în schema reală de conducere a turnării continue

3. În timpul turnării, au fost urmăriți parametri tehnologici: la ora 14⁴³, debitul apei de răcire a fost foarte mic, viteza de turnare mică, temperatura din distribuitor mare, semnalul de la RN fiind setat pe 1 logic. În acest moment sistemul a detectat apariția unei fisuri și a luat măsurile necesare, dictând o corecție de debit foarte mare (Fig.6.30) și o corecție de viteză mică (Fig.6.31). Verificând în baza de reguli se poate afirma că SDF-ul a luat corect măsurile necesare.



Fig. 6.30 Evoluția debitului de răcire primară în momentul apariției unei fisuri



Fig. 6.31 Evoluția vitezei de turnare in momentul apariției unei fisuri

De asemenea, la ora 13²² debitul apei de răcire era mic, viteza de turnare mare, temperatura in distribuitor medie, riscul tehnologic mediu, semnalul de la RN fiind setat pe 0 logic. În acest moment sistemul a detectat riscul apariției unei fisuri și a luat măsurile necesare. În acest moment sistemul a detectat riscul de apariție a unei fisuri și a luat măsurile necesare, dictând o corecție de debit foarte mare (Fig.6.32) și o corecție de viteză foarte mică (Fig.6.33). Verificand in baza de reguli se poate afirma că SDF-ul a luat corect măsurile necesare.



Fig. 6.32 Evoluția debitului de racire primara in momentul riscului de apariției a unei fisuri



Fig. 6.33 Evoluția vitezei de turnare în momentul riscului de apariția a unei fisuri

4. Pentru verificarea funcționării SFA au fost efectuate de asemenea o serie de teste, urmărindu-se pe sistemul SCADA variația vitezei rolei libere și a rolei antrenate, cu SFA în funcțiune, respectiv scos din funcțiune.

Inițial, SFA a fost scos din funcție. La ora 10^{30} , s-a impus o creștere a vitezei de turnare de la 1,3 la 2 m/min. În Fig. 6.34 se observă această creștere la rola activă (cu o ușoară suprareglare, timp de creștere aprox. 5 s). Datorită acestei creșteri rapide, apare alunecare între rola de tragere și materialul turnat. Viteza rolei pasive se modifică ca în Fig. 6.35, accelerarea barei turnate durând 40 s (deci foarte mult). La ora 10^{36} , fenomenele s-au repetat în sens invers (comandă de scădere a vitezei de tragere). S-a confirmat deci faptul că apariția alunecării conduce la creșterea timpului de modificare a vitezei efective de turnare.



Fig. 6.34 Variația vitezei rolei active fără acțiunea SFA



Fig. 6.35 Variația vitezei rolei pasive fără acțiunea SFA

În continuare, a fost pus în funcțiune SFA. La ora 10⁴¹, a fost comandată din nou o creștere a vitezei de la 1,2 la 2 m/min (Fig. 6.36). Se observă că, viteza rolei active de tragere variază mai lent (timp de creștere aprox. 15 s), iar viteza barei turnate crește fără alunecări (Fig. 6.37) în 15 s.

În concluzie rezultă că, SFA a acționat conform bazei de reguli (în cazul de față a fost activă regula 15).



Fig. 6.36 Variația vitezei rolei active cu SFA în funcțiune



Fig. 6.37 Variația vitezei rolei pasive cu SFA în funcțiune

Se menționează faptul că toate înregistrările prezentate au fost preluate direct din sistemul SCADA al procesului de turnare continuă.

Obținerea acordului de implementare a PLC-ului (cu SDF și SFA), pe linia de turnare continuă (firul 1) în producție curentă a firmei A.M.-HD (cu toate riscurile aferente) a fost obținut pe baza interesului manifestat de specialiștii firmei față de soluțiile propuse în urma cercetărilor din cadrul tezei, propunându-se chiar o colaborare pentru aplicarea industrială a soluției.

6.5 Concluzii

Plecând de la structura reală a unui sistem de conducere pentru o instalație modernă de turnare continuă existentă, în prezentul capitol se propune o metodă de implementare a sistemului de detecție, predicție și eliminare a fisurilor din semifabricatul turnat. Acesta conține, în principal, o rețea neuronală pentru detecția fisurilor și un sistem de decizie fuzzy care elaborează, pe baza unor date din proces, corecții corespunzătoare pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire primară, în vederea realizării dezideratului menționat. Implementarea propriu-zisă se poate efectua, cu modificări minime, pe orice instalație în funcțiune, la un preț de cost care permite amortizarea cheltuielilor într-un timp relativ scurt (prin eliminarea rebuturilor de turnare).

Datorită faptului că sistemul de eliminare a fisurilor produce corecții de viteză care se aplică sub formă de treaptă, a fost necesară analiza posibilității de apariție a alunecării între semifabricat și rolele de tragere (alunecare care, de altfel, există la pornirea turnării, dar atunci nu este importantă). Pentru eliminarea acestei alunecări, care poate compromite reglajul de viteză, s-a conceput un SFA care a fost implementat și testat în instalație și care a confirmat în totalitate eliminarea alunecării.

Pentru efectuarea experimentărilor industriale s-au implementat SDF-ul și SFA-ul în instalație cu ajutorul unui PLC.

În timpul turnării, au fost urmăriți parametri tehnologici: când debitul apei de răcire a fost foarte mic, viteza de turnare mică, temperatura din distribuitor mare, semnalul de la RN fiind setat pe 1 logic, sistemul a detectat apariția unei fisuri și a luat măsurile necesare, dictând o corecție de debit foarte mare și o corecție de viteză mică.

De asemenea, când debitul apei de răcire era mic, viteza de turnare mare, temperatura în distribuitor medie, riscul tehnologic mediu, semnalul de la RN fiind setat pe 0 logic, sistemul a detectat riscul apariției unei fisuri și a luat măsurile necesare dictând o corecție de debit foarte mare și o corecție de viteză foarte mică.

Verificând în baza de reguli se poate afirma că în ambele cazuri SDF-ul a luat corect măsurile necesare.

Pentru verificarea funcționării SFA au fost efectuate de asemenea o serie de teste, urmărindu-se pe sistemul SCADA variația vitezei rolei libere și a rolei antrenate, cu SFA în funcțiune, respectiv scos din funcțiune. S-a constatat dispariția alunecării, atunci când SFA era în funcțiune ceea ce confirmă dezideratul impus.

În urma experimentărilor industriale s-a implementat SDF-ul în instalație. Au fost urmăriți parametri tehnologici și deoarece debitul apei de răcire a fost foarte mare, viteza de turnare a fost medie, temperatura din distribuitor a fost mare, riscul tehnologic fiind și el mare, SDF a apreciat o posibilitate destul de mare de producere a unei fisuri, efectuând o corecție foarte mică a debitului apei de răcire și o corecție mare a vitezei de turnare. În momentul în care temperatura în distribuitor a scăzut, devenind mică, SDF a sesizat o scădere a posibilității de producere a unei fisuri, dictând o corecție de viteză mică.

De asemenea și atunci când semnalul de la RN era setat pe 1 logic, sistemul a detectat apariția unei fisuri și a luat măsurile necesare. Debitul a crescut, iar viteza de turnare a scăzut. În consecință, se poate concluziona că SDF a interpretat corect situațiile apărute și a dictat măsurile de corecție aferente.

În ceea ce privește implementarea SFA în instalația industrială s-a constatat că atunci când acesta nu era pus în funcțiune și s-a impus o creștere a vitezei de turnare s-a observat apariția alunecării între rola de tragere și materialul turnat. În momentul în care SFA a fost pus în funcțiune și s-a comandat din nou creșterea vitezei s-a constatat dispariția alunecării, ceea ce confirmă dezideratul impus.

Obținerea acordului de implementare a PLC-ului (cu SDF și SFA), pe linia de turnare continuă (firul 1) în producție curentă a firmei A.M.-HD (cu toate riscurile aferente) a fost obținut pe baza interesului manifestat de specialiștii firmei față de soluțiile propuse în urma cercetărilor din cadrul tezei, propunându-se chiar o colaborare pentru aplicarea industrială a soluției.

7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

7.1 Concluzii

Lucrarea de față este dedicată cercetărilor din domeniul de actualitate al conducerii proceselor metalurgice folosind metode neconvenționale, (rețele neuronale și sisteme fuzzy) care permit predicția, detecția și eliminarea fisurilor din semifabricat.

Lucrarea este concepută ca o dezvoltare succesivă de problematici specifice aplicațiilor cu rețele neuronale și sisteme fuzzy, sfârșitul fiecărui capitol evidențiind particularități, recomandări și concluzii particulare sau generale.

Obiectivul principal al prezentei teze îl constituie concepția, sinteza, implementarea și dezvoltarea unor structuri de conducere a procesului de turnare continuă în vederea predicției, detecției și eliminării fisurilor din semifabricat.

În contextul acestui obiectiv se pot evidenția următoarele direcții de cercetare abordate în teză:

- modelarea matematică a procesului de solidificare a oțelului în vederea cunoașterii mai exacte a fenomenului de formare a fisurilor;
- concepția și dezvoltarea unei structuri de rețele neuronale care să detecteze în timp real apariția unei fisuri;
- sinteza și dezvoltarea unor soluții de conducere a procesului de turnare continuă bazate pe logica fuzzy, care să permită eliminarea fisurilor detectate de rețeaua neuronală și totodată să prevină formarea unor potențiale fisuri;
- simularea și implementarea în practică a rezultatelor cercetării.

În cadrul tezei s-a realizat modelarea fenomenului de solidificare a semifabricatelor turnate continuu, bazată pe metoda diferențelor finite. A fost conceput un program de simulare intitulat „**TirSim**”, realizat în limbajul C++.

Rezultatele obținute în urma simulărilor efectuate cu ajutorul programului „**TirSim**”, pentru un semifabricat cu secțiunea de **240x240 mm**, pe baza MM dezvoltat au dus la următoarele concluzii :

- Rezultatele obținute în urma simulării cu programul „**TirSim**” fiind în concordanță cu datele din literatura de specialitate demonstrează că ipotezele simplificatoare adoptate în scopul calculului sunt bine justificate;
- Temperatura din punctele aflate spre centrul semifabricatului este mai mare decât temperatura punctelor de pe perete, ceea ce presupune că centrul semifabricatului se răcește cel mai lent, iar colțul acestuia cel mai intens;
- Modificând o serie de parametri se pot obține valori adecvate, aplicabile și pentru alte mărci de oțeluri turnate continuu;

- Metoda de modelare propusă permite o analiză suficient de precisă a fenomenului de formare a crustei de solidificare și deci de formare a eventualelor fisuri;
- Datele obținute prin simulare s-au folosit ulterior la conceperea și antrenarea rețelei neuronale, conceperea bazei de reguli a SDF și stabilirea ponderii corecției debitului de apă pentru răcirea primară, respectiv a vitezei de turnare.

Tot în cadrul tezei, în vederea detecției fisurilor care pot apărea în crustă, s-a conceput un sistem multi-neuronal, care analizează semnalele primite de la senzori de temperatură montați pe pereții cristalizorului sub forma unei matrici și care furnizează la ieșire un semnal de existență sau inexistență a fisurii.

Sistemul propus, conceput și dezvoltat s-a implementat software, utilizând mediul Matlab. Sistemul astfel implementat a recunoscut toate cazurile care i-au fost aduse la intrare. Astfel, din numărul total de seturi de intrare, 120 erau cazuri în care nu a existat fisură, iar 30 cazuri în care a existat fisura. Sistemul neuronal antrenat în prealabil cu un set de date total diferit de cel de testare, a recunoscut cu o acuratețe de 100%, atât cazurile în care s-a produs fisurarea crustei, cât și cazurile în care nu s-a produs fisurarea acesteia.

Astfel, față de vechile metode de abordare a problemei fisurării crustei în procesul de turnare continuă a oțelului, cum ar fi metodele de natură tehnologică (impunerea unei anumite viteze de turnare, reglarea compoziției și cantității prafurilor de turnare, etc.), noua metodă propusă și dezvoltată bazată pe rețele neuronale, aduce siguranță și precizie în cadrul acestui proces complex fiind înlăturate orice dubii cu privire la existența sau inexistența fisurii. Pentru detecția fisurilor s-au preferat rețele neuronale deoarece acestea sunt ușor de construit și de antrenat, fiind ușor de modificat și de perfecționat în timpul aplicației. Utilizând sistemul neuronal conceput și dezvoltat, fisurile pot fi detectate mult mai devreme și cu o mai mare acuratețe decât în cazul metodelor convenționale.

Răspunsul furnizat la ieșirea din sistemul neuronal propus, conceput și dezvoltat este utilizat ca și semnal de intrare pentru un sistem de decizie fuzzy care are rolul de a modifica doi parametri esențiali ai procesului tehnologic în vederea eliminării fisurilor.

În cadrul tezei a fost propusă o soluție fuzzy originală care grefată pe structura existentă a sistemului de conducere a turnării continue elimină fisurile apărute în materialul turnat în cristalizor și de asemenea, reduce posibilitatea formării de fisuri primare.

În acest scop a fost concepută schema unui sistem de decizie fuzzy cu două baze de reguli, care analizând o serie de mărimi preluate din proces produce modificări ale debitului apei de răcire primară și respectiv ale vitezei de turnare, astfel încât să fie realizat dezideratul menționat.

Acest principiu de eliminare a fisurilor deja detectate cât și de eliminare a riscului primar de apariție a acestora este o contribuție originală a autorului. În literatura de specialitate, de pe plan național cât și de pe plan mondial, neexistând referiri la măsuri predictive de formare a fisurilor.

De asemenea, principiul modificării a doi parametri tehnologici (debitul apei de răcire și viteza de turnare) nu apare în literatura de specialitate fiind un concept original, dezvoltat în cadrul acestui capitol.

Se menționează faptul că metodele propuse în literatura de specialitate nu pot elimina în totalitate riscul de apariție a rebuturilor, dacă fisura este detectată în partea finală a cristalizorului.

Întocmirea bazelor de reguli s-a făcut utilizând experiența operatorilor umani și informații culese direct din proces la instalația de turnare continuă, din cadrul A.M.-HD. De asemenea, a fost folosit modelul matematic al procesului de solidificare a oțelului în cristalizor elaborat în Capitolul 3 pentru a obține o mai mare precizie a bazei de reguli. Verificarea și confirmarea bazei de reguli și a SDF proiectat a fost efectuată prin simulare în Simulink.

Analizând rezultatele simulării se constată că, indiferent de valorile mărimilor generate la intrare, SDF-ul elaborează corecțiile necesare pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire primară, ceea ce confirmă validitatea funcționării sistemului.

Se consideră că, din punct de vedere calitativ, utilizarea sistemului de decizie fuzzy este o metodă eficientă, practică și ușor de implementat, în scopul analizei unor fenomene complexe și neliniare. Scopul declarat: predicția și eliminarea fisurilor din semifabricat este obținut pe baza unor raționamente, materializate în bazele de reguli.

Plecând de la structura reală a unui sistem de conducere pentru o instalație modernă de turnare continuă existentă, în cadrul tezei se propune o metodă de implementare a sistemului de detecție, predicție și eliminare a fisurilor din semifabricatul turnat. Acesta conține, în principal, o rețea neuronală pentru detecția fisurilor și un sistem de decizie fuzzy care elaborează, pe baza unor date din proces, corecții corespunzătoare pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire primară, în vederea realizării dezideratului menționat. Implementarea propriu-zisă se poate efectua, cu modificări minime, pe orice instalație în funcțiune, la un preț de cost care permite amortizarea cheltuielilor într-un timp relativ scurt (prin eliminarea rebuturilor de turnare).

Datorită faptului că sistemul de eliminare a fisurilor produce corecții de viteză care se aplică sub formă de treaptă, a fost necesară analiza posibilității de apariție a alunecării între bara turnată și rolele de tragere (alunecare care, de altfel, există la pornirea turnării, dar atunci nu este importantă). Pentru eliminarea acestei alunecări, care poate compromite reglajul de viteză, s-a conceput un sistem fuzzy adaptiv.

Pentru efectuarea experimentărilor industriale s-au implementat SDF-ul și SFA-ul în instalație cu ajutorul unui PLC.

În timpul turnării, au fost urmăriți parametri tehnologici: când debitul apei de răcire a fost foarte mic, viteza de turnare mică, temperatura din distribuitor mare, semnalul de la RN fiind setat pe 1 logic, sistemul a detectat apariția unei fisuri și a luat măsurile necesare, dictând o corecție de debit foarte mare și o corecție de viteză mică.

De asemenea, când debitul apei de răcire era mic, viteza de turnare mare, temperatura în distribuitor medie, riscul tehnologic mediu, semnalul de la RN fiind setat pe 0 logic, sistemul a detectat riscul apariției unei fisuri și a luat măsurile necesare dictând o corecție de debit foarte mare și o corecție de viteză foarte mică.

Verificând în baza de reguli se poate afirma că în ambele cazuri SDF-ul a luat corect măsurile necesare.

Pentru verificarea funcționării SFA au fost efectuate de asemenea o serie de teste, urmărindu-se pe sistemul SCADA variația vitezei rolei libere și a rolei

antrenate, cu SFA în funcțiune, respectiv scos din funcțiune. S-a constatat dispariția alunecării, atunci când SFA era în funcțiune ceea ce confirmă dezideratul impus.

Obținerea acordului de implementare a PLC-ului (cu SDF și SFA), pe linia de turnare continuă (firul 1) în producție curentă a firmei A.M.-HD (cu toate riscurile aferente) a fost obținut pe baza interesului manifestat de specialiștii firmei față de soluțiile propuse în urma cercetărilor din cadrul tezei, propunându-se chiar o colaborare pentru aplicarea industrială a soluției.

Concluzia care poate fi desprinsă la finele lucrării este că, pentru aplicația considerată (conducerea procesului de turnare continuă în sensul eliminării rebuturilor) metodele moderne abordate, bazate pe sisteme neuronale și sisteme fuzzy constituie soluții sigure, eficiente și performante de predicție, detecție și eliminare a fisurilor.

Problemele prezentate, precum și rezultatele obținute, conferă lucrării un real caracter de aplicabilitate practică, deschizând noi perspective cercetărilor în domeniul abordat.

7.2 Contribuții personale

Pornind de la obiectivele declarate ale acestei lucrări, în continuare se prezintă principalele contribuții originale:

- ◆ analiza și sinteza critică a bibliografiei existente în literatura de specialitate de pe plan mondial, în corelare cu documentația de firmă de la S.C. Arcelor Mittal Hunedoara;
- ◆ sistematizarea, în vederea posibilităților de conducere, a principalelor aspecte tehnologice ale procesului de turnare continuă;
- ◆ analiza critică a principalelor abordări referitoare la identificarea procesului de transfer termic și solidificare;
- ◆ analiza critică a principalelor abordări în detecția fisurilor la turnarea continuă;
- ◆ modelarea fenomenului de transfer termic și solidificare în zona de răcire primară a semifabricatelor turnate continuu, bazată pe metoda diferențelor finite;
- ◆ identificarea analitică a procesului de solidificare și răcire primară a semifabricatului cu ajutorul unei rețele de discretizare;
- ◆ conceperea, dezvoltarea și implementarea programului de simulare „**TirSim**” ;
- ◆ simularea și analiza fenomenului de transfer termic și solidificare în zona de răcire primară a semifabricatelor turnate continuu, pentru semifabricatele cu secțiunea de **240x240mm**;

- ◆ analiza parametrilor care influențează fenomenul de transfer termic și solidificare a oțelului în cristalizor, și deci de formare a posibilelor fisuri;
- ◆ proiectarea arhitecturii sistemului multi-neuronal propus, conceput și dezvoltat, pentru detecția fisurilor în semifabricat;
- ◆ concepția și dezvoltarea rețelelor serie-dinamică (RSD) pentru detecția variațiilor de temperatură la solidificarea oțelului din cristalizor;
- ◆ concepția și dezvoltarea rețelelor spațiale (RS) pentru determinarea distribuției spațiale a temperaturii în cristalizor;
- ◆ elaborarea programelor Matlab destinate antrenării, implementării și testării RSD, RS și a întregului sistem neuronal propus;
- ◆ conceperea strategiei de experimentare în vederea obținerii datelor de intrare în RSD;
- ◆ implementarea, antrenarea și testarea RSD;
- ◆ implementarea, antrenarea și testarea RS;
- ◆ implementarea și testarea întregului sistem neuronal pentru detecția fisurilor în semifabricat la turnarea continuă a oțelului;
- ◆ concepția, dezvoltarea și implementarea unui sistem fuzzy pentru predicția și eliminarea fisurilor;
- ◆ concepția și dezvoltarea unui nou principiu predictiv de eliminare a fisurilor;
- ◆ concepția unui nou sistem fuzzy bazat pe comanda a două mărimi tehnologice (debitul de apă și viteza de turnare) în vederea eliminării fisurilor;
- ◆ crearea unui sistem fuzzy cu două baze de reguli diferite pentru predicția și eliminarea fisurilor;
- ◆ conceperea bazelor de reguli pentru SDF dezvoltat;
- ◆ realizarea în Matlab a SDF de predicție și eliminare a fisurilor;
- ◆ realizarea și implementarea modelului Simulink a SDF de predicție și eliminare a fisurilor;
- ◆ simularea, analiza și validarea SDF-ului de predicție și eliminare a fisurilor;
- ◆ implementarea RN și a SDF în schema de conducere a turnării continue;
- ◆ concepția, dezvoltarea și implementarea într-o instalație reală, a sistemului pentru predicția, detecția și eliminarea fisurilor;

- ◆ realizarea modelului Simulink a întregului sistem propus pentru detecția și eliminarea fisurilor și simularea funcționării sale, pe baza unor date reale, culese din proces;
- ◆ dezvoltarea și realizarea unui sistem fuzzy adaptiv (SFA) pentru eliminarea alunecărilor care pot apărea între semifabricat și rolele de tragere la instalațiile de turnare continuă a oțelului;
- ◆ realizarea modelului Simulink a SFA în vederea implementării, analizei și validării sistemului;
- ◆ conceperea și elaborarea programelor destinate implementării SDF și SFA pe PLC;
- ◆ implementarea, analiza și validarea SDF și SFA în regim industrial cu ajutorul unui PLC;

În concluzie, se poate afirma că soluțiile propuse în lucrare, asigură rezolvarea tuturor problemelor legate de predicția, detecția și eliminarea fisurilor, cu rezultate foarte bune și implicit creșterea productivității.

Pentru elaborarea lucrării a fost utilizată o bibliografie care cuprinde 220 de titluri ale unor lucrări de specialitate, cele mai multe dintre ele de dată recentă. De asemenea, bibliografia cuprinde 27 lucrări al căror autor principal sau coautor este autorul tezei.

7.3 Direcții de cercetare generate de studiile efectuate

Dintre principalele direcții de cercetare care pot continua rezultatele obținute în cadrul acestei teze, se pot enumera:

- implementarea matricii de senzori de temperatură pe toți cei patru pereți ai cristalizorului, pentru monitorizarea variațiilor de temperatură;
- adaptarea și implementarea matricii de senzori de temperatură pentru un cristalizor rotund;
- implementarea hardware a sistemului neuronal pentru detecția fisurilor în semifabricat;
- realizarea unor sisteme fuzzy de reglare a debitului de apă pentru răcirea secundară.

ANEXA 1 – COMPOZIȚIA CHIMICĂ PENTRU OLT 35k

Nr. crt.	Temp. oțel în oală [°C]	Temp. lichidus [°C]	Compoziția chimică pentru OLT 35k								
			C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Mo	Al
1	1605	1522	0,07	0,29	0,46	0,004	0,017	0,27	0,08	0,03	0,028
2	1600	1521	0,09	0,25	0,42	0,015	0,021	0,33	0,09	0,02	0,023
3	1596	1521	0,10	0,29	0,46	0,002	0,020	0,34	0,11	0,03	0,028
4	1612	1519	0,11	0,33	0,50	0,010	0,020	0,22	0,10	0,02	0,029
5	1608	1522	0,07	0,29	0,50	0,015	0,017	0,30	0,07	0,03	0,026
6	1613	1521	0,08	0,30	0,52	0,026	0,024	0,30	0,11	0,04	0,023
7	1609	1520	0,10	0,30	0,44	0,017	0,017	0,24	0,06	0,02	0,026
8	1610	1522	0,07	0,34	0,46	0,004	0,016	0,24	0,07	0,02	0,034
9	1610	1521	0,08	0,31	0,50	0,010	0,018	0,25	0,09	0,02	0,023
10	1605	1520	0,09	0,33	0,46	0,020	0,016	0,30	0,10	0,03	0,025
11	1617	1519	0,10	0,27	0,51	0,017	0,024	0,30	0,08	0,02	0,025
12	1612	1520	0,09	0,31	0,50	0,009	0,015	0,30	0,07	0,03	0,022
13	1619	1520	0,10	0,29	0,48	0,019	0,015	0,30	0,11	0,03	0,024
14	1610	1522	0,07	0,28	0,49	0,019	0,016	0,23	0,06	0,02	0,028
15	1613	1520	0,10	0,30	0,47	0,011	0,017	0,23	0,07	0,02	0,028
16	1608	1520	0,10	0,29	0,45	0,004	0,017	0,22	0,10	0,03	0,025
17	1617	1520	0,09	0,29	0,46	0,024	0,016	0,24	0,07	0,02	0,024
18	1610	1522	0,06	0,35	0,55	0,005	0,012	0,27	0,06	0,03	0,018
19	1618	1522	0,07	0,31	0,47	0,019	0,016	0,27	0,08	0,04	0,026
20	1609	1522	0,07	0,29	0,49	0,005	0,013	0,29	0,08	0,03	0,028
21	1612	1523	0,08	0,33	0,49	0,005	0,010	0,24	0,03	0,03	0,014
22	1611	1522	0,09	0,28	0,49	0,019	0,021	0,30	0,10	0,03	0,024
23	1615	1521	0,08	0,28	0,57	0,025	0,022	0,30	0,08	0,03	0,015
24	1612	1523	0,06	0,32	0,49	0,018	0,014	0,27	0,14	0,03	0,026
25	1621	1522	0,07	0,32	0,48	0,017	0,019	0,30	0,13	0,03	0,027
26	1615	1519	0,11	0,26	0,64	0,009	0,032	0,25	0,10	0,02	0,014
27	1614	1521	0,09	0,30	0,44	0,013	0,014	0,28	0,09	0,02	0,019
28	1614	1523	0,06	0,31	0,47	0,003	0,014	0,21	0,08	0,02	0,023
29	1617	1521	0,08	0,31	0,55	0,007	0,023	0,29	0,10	0,03	0,029
30	1630	1520	0,09	0,31	0,49	0,027	0,016	0,33	0,10	0,02	0,029
31	1610	1521	0,07	0,30	0,60	0,006	0,025	0,35	0,14	0,03	0,029
32	1618	1522	0,06	0,28	0,59	0,025	0,026	0,28	0,13	0,02	0,023
33	1616	1520	0,09	0,30	0,45	0,009	0,023	0,24	0,13	0,02	0,023
34	1617	1521	0,08	0,33	0,51	0,009	0,018	0,26	0,07	0,02	0,029
35	1622	1520	0,09	0,29	0,65	0,003	0,030	0,32	0,13	0,03	0,027
36	1621	1522	0,07	0,32	0,50	0,005	0,021	0,32	0,10	0,03	0,023
37	1615	1523	0,06	0,33	0,46	0,003	0,013	0,25	0,10	0,03	0,030
38	1620	1523	0,06	0,25	0,56	0,034	0,019	0,30	0,10	0,02	0,033
39	1621	1521	0,07	0,31	0,61	0,010	0,028	0,29	0,09	0,02	0,031
40	1624	1522	0,07	0,29	0,45	0,020	0,013	0,27	0,07	0,03	0,028
41	1624	1523	0,06	0,35	0,62	0,009	0,018	0,22	0,12	0,02	0,023
42	1625	1522	0,07	0,31	0,52	0,020	0,016	0,24	0,009	0,02	0,032
43	1627	1520	0,09	0,32	0,54	0,005	0,013	0,26	0,11	0,03	0,026
44	1629	1519	0,10	0,30	0,54	0,003	0,013	0,30	0,08	0,03	0,025
45	1620	1522	0,07	0,26	0,46	0,005	0,019	0,27	0,07	0,02	0,025
46	1620	1521	0,08	0,34	0,48	0,003	0,015	0,26	0,10	0,02	0,031
47	1617	1521	0,08	0,32	0,50	0,004	0,014	0,30	0,09	0,02	0,032
48	1623	1523	0,06	0,22	0,75	0,025	0,025	0,30	0,11	0,02	0,026
49	1618	1522	0,07	0,33	0,49	0,013	0,012	0,34	0,10	0,03	0,030
50	1623	1523	0,07	0,29	0,42	0,030	0,014	0,34	0,08	0,03	0,032
51	1620	1520	0,08	0,30	0,52	0,003	0,017	0,23	0,09	0,02	0,032
52	1626	1521	0,06	0,31	0,50	0,018	0,020	0,24	0,07	0,02	0,025
Compoziția chimică a mărcii OLT 35k, STAS 8184-87			max. 0,17	0,15-0,35	0,4-0,9	max. 0,04	max. 0,04	max. 0,3	max. 0,3	max. 0,04	0,02-0,045

ANEXA 2 – CODUL SURSĂ AL PROGRAMULUI DE SIMULARE "TirSim"

StdAfx.h

```
// stdafx.h : include file for standard system include files,  
// or project specific include files that are used frequently,  
// but  
// are changed infrequently  
//  
  
#if  
!defined(AFX_STDAFX_H__19FDCEA0_D389_4391_BB5F_69534E2D56F6__INC  
LUDED_)  
#define  
AFX_STDAFX_H__19FDCEA0_D389_4391_BB5F_69534E2D56F6__INCLUDED_  
  
#if _MSC_VER > 1000  
#pragma once  
#endif // _MSC_VER > 1000  
  
#define VC_EXTRALEAN // Exclude rarely-used stuff from  
Windows headers  
  
#include <afxwin.h> // MFC core and standard components  
#include <afxext.h> // MFC extensions  
#include <afxdtctl.h> // MFC support for Internet Explorer  
4 Common Controls  
#ifndef _AFX_NO_AFXCMN_SUPPORT  
#include <afxcmn.h> // MFC support for Windows Common  
Controls  
#endif // _AFX_NO_AFXCMN_SUPPORT  
  
#pragma pack (4)  
#pragma warning (disable: 4244 4305)  
#include <stdio.h>  
#include <io.h>  
#include <math.h>  
#include <float.h>  
  
//Constante matematice  
#define NAN (sqrt(-1)) //Not a Number  
#define M_PI 3.141592653589793238  
#define M_PI_2 1.570796326794896619  
#define M_2_PI 6.283185307179586477  
#define M_PI_180 0.017453292519943296  
#define M_180_PI 57.29577951308232088
```

```

#define M_E          2.718281828459045235
#define M_1_E        0.367879441171442322

//Constante fizice
#define J_KCAL 4185.5 //transformarea kcal -> J
#define STEFAN_BOLTZMANN 5.66961E-8 //constanta Stefan-Boltzmann
#define KELVIN 273.16

#define DEL(x) if (x) {delete x; x = NULL;}
#define MIN(x, y) ((x < y) ? (x) : (y))
#define MAX(x, y) ((x > y) ? (x) : (y))
#define BRIGHT

//{{AFX_INSERT_LOCATION}}
// Microsoft Visual C++ will insert additional declarations
immediately before the previous line.

#endif //
!defined(AFX_STDAFX_H__19FDCEA0_D389_4391_BB5F_69534E2D56F6__INC
LUDED_)

```

Headers.h

```

#ifndef __HEADERS_H
#define __HEADERS_H

//#define LOGFILE "e:\\tirsim.log"

#include "tirsim.h"
#include "Bitmap.h"
#include "DataFile.h"
#include "Buffers.h"
#include "Utils.h"
#include "Config.h"
#include "Cascade.h"
#include "XText.h"
#include "Abstract2DGraph.h"
#include "Abstract3DGraph.h"
#include "Material.h"
#include "AbstractWindow.h"
#include "SimpleWindow.h"
#include "GLWindow.h"
#include "MaterialGraphs.h"
#include "MetalGraphs.h"
#include "tirsimDlg.h"
#include "ProgressDialog.h"
#include "MetalDataFile.h"
#include "MetalDialog.h"
#include "SliderDialog.h"

double __forceinline sq(double x) {return x*x;}

```

```
#endif// __HEADERS_H
```

Material.h

```
////////////////////////////////////  
////////////////////////////////////
```

```
// Material.h - header file
```

```
#ifndef __MATERIAL_H  
#define __MATERIAL_H  
#define MATERIAL_COPPER 0  
#define MATERIAL_OLC45 1  
#define MATERIAL_OLT35K 2
```

```
class Material {  
    int type;  
    double a, b, c, tpr; //pt. lambda  
    double lpr, tpr2, tpr3, fipr; //pt. accelerarea calculelor  
    lambda  
    FloatBuffer ht, hh; //entalpia prin puncte  
    double _ro; //densitatea  
    double tsol, tlich; //solidus & lichidus  
    void precalc();  
public:  
    Material();  
    Material(Material& mat);  
    void clone(Material *mat);  
    void defaults(int type = MATERIAL_OLC45);  
    void writeToFile(DataFile* df);  
    void readFromFile(DataFile* df);  
  
    double ro() {return _ro;}  
    double lambda_0() {return c;}  
    double solidus() {return tsol;}  
    double lichidus() {return tlich;}  
    double lambda_t(double t);  
    double fi_t(double t);  
    double t_fi(double fi);  
    double h_t(double t);  
    double t_h(double h);  
};
```

```
#endif// __MATERIAL_H
```

Material.cpp

```
////////////////////////////////////  
////////////////////////////////////  
// Material.cpp - implementation file
```

```

#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"

Material::Material() {
    defaults();
}
Material::Material(Material& mat) {
    mat.clone(this);
}
void Material::clone(Material *mat) {
    mat->_ro = _ro;
    mat->a = a; mat->b = b; mat->c = c;
    mat->tpr = tpr;
    mat->tsol = tsol; mat->tlich = tlich;
    mat->ht.fromFloatBuffer(ht);
    mat->hh.fromFloatBuffer(hh);
    mat->precalc();
}
void Material::defaults(int type) {
    Material::type = type;
    switch (type) {
    case MATERIAL_COPPER:
        a = b = 0;
        c = 393.86;
        tpr = 9999;
        ht.fromString("0 100");
        hh.fromString("0 38550");
        _ro = 8960;
        tsol = tlich = 0;
        break;
    case MATERIAL_OLC45:
        //coeficientii pentru calculul conductibilitatii termice
        // lambda = a*t*t + b*t + c pentru t > tpr
        // si lambda = lpr = a*tpr*tpr + b*tpr + c (constanta)
        // pentru t <= tpr
        a = -3.3253477562765E-05;
        b = -8.6288455272252E-03;
        c = 5.09286185768560E+01;
        tpr = 768;
        //solidus & lichidus
        tsol = 1440; tlich = 1500;
        //valorile pentru entalpii (hh) la diverse temperaturi
        (ht)
        ht.fromString(
            "100 200 300 400 500 600 "
            "700 800 900 1000 1100 1200 "
            "1300 1440 1500 1600");
        hh.fromString(
            "11.2 22.6 36.2 49.9 64.3 82.0 "

```

```

        "101.0 130.8 148.1 164.6 181.7 198.6 "
        "207.5 220.0 284.0 310.7");
    //entalpiile sunt date in kcal, dar le vrem in J
    hh.multiply(J_KCAL);
    _ro = 7850;
    break;
case MATERIAL_OLT35K:
    //coeficientii pentru calculul conductibilitatii termice
    // lambda = a*t*t + b*t + c pentru t > tpr
    // si lambda = lpr = a*tpr*tpr + b*tpr + c (constanta)
    // pentru t <= tpr
    a = -3.3253477562765E-05;
    b = -8.6288455272252E-03;
    c = 5.09286185768560E+01;
    tpr = 768;
    //solidus & lichidus
    tsol = 1480; tlich = 1520;
    //valorile pentru entalpii (hh) la diverse temperaturi
(ht)
    ht.fromString(
        "100 200 300 400 500 600 "
        "700 800 900 1000 1100 1200 "
        "1300 1480 1520 1600");
    hh.fromString(
        "11.2 22.6 36.2 49.9 64.3 82.0 "
        "101.0 130.8 148.1 164.6 181.7 198.6 "
        "207.5 220.0 284.0 310.7");
    //entalpiile sunt date in kcal, dar le vrem in J
    hh.multiply(J_KCAL);
    _ro = 7850;
    break;
}
precalc();
}
void Material::precalc() {
    tpr2 = tpr*tpr; tpr3 = tpr2*tpr;
    lpr = a*tpr2 + b*tpr + c;
    fipr = tpr + (tpr2/c)*(tpr*a/3 + b/2);
}
void Material::writeToFile(DataFile *df) {
    df->writeInt(type);
    df->writeDouble(a);
    df->writeDouble(b);
    df->writeDouble(c);
    df->writeDouble(tpr);
    df->writeDouble(_ro);
    df->writeDouble(tsol);
    df->writeDouble(tlich);
    ht.writeToFile(df);
}

```



```

    hh.writeToFile(df);
}
void Material::readFromFile(DataFile *df) {
    type = df->readInt();
    a = df->readDouble();
    b = df->readDouble();
    c = df->readDouble();
    tpr = df->readDouble();
    _ro = df->readDouble();
    tsol = df->readDouble();
    tlich = df->readDouble();
    ht.readFromFile(df);
    hh.readFromFile(df);
}

double Material::lambda_t(double t) {
    if (type && (t < tpr)) return a*t*t + b*t + c;
    else return lpr;
}

double Material::fi_t(double t) {
    if (t < tpr) return t + (t*t/c)*(t*a/3 + b/2);
    return fipr + (t - tpr)*lpr/c;
}

double Material::t_fi(double fi) {
    if (fi >= fipr) //ecuatie de gr. I, altfel de gr. III
        return tpr + (c/lpr)*(fi - fipr);
    double fit, dfidt, t;
    t = tpr*fi/fipr;
    while (true) { //metoda aproximarilor succesive (Newton)
        fit = t + (t*t/c)*(t*a/3 + b/2);
        if (fabs(fi - fit) < 1e-6) return t;
        dfidt = (t/c)*(a*t + b) + 1;
        t += (fi - fit)/dfidt;
    }
}

double Material::h_t(double t) {
    int n = ht.binarySearch(t);
    float t1 = ht[n], t2 = ht[n+1];
    return ((t-t1)*hh[n+1] + (t2-t)*hh[n])/(t2-t1);
}

double Material::t_h(double h) {
    int n = hh.binarySearch(h);
    float h1 = hh[n], h2 = hh[n+1];
    return ((h-h1)*ht[n+1] + (h2-h)*ht[n])/(h2-h1);
}
}

```

ANEXA 3 – CODUL SURSĂ AL APLICAȚIILOR CU RN

```
% Gelu Ovidiu Tirian
%Functia pentru antrenarea RSD

%%
clear all
close all
clc
disp('Initializare...')

% arhitectura serie de timp
    Nr_neur_intrare_1=10
    Nr_neur_ascunsi_1=8
    Nr_neur_ies_1=1

disp('Initializare terminata!');disp(' ')

%%
disp('Incarcare tipare de antrenament si test...')
% reprezinta nr de coloane ale matricilor de intrare respectiv
de iesire
    Nr_exemple_1=330;

% Se genereaza datele de intrare si cele de iesire
% Se verifica daca variabilele de intrare si iesire se gasesc pe
hard.
% Daca da, atunci se incarca.
% Daca nu, se creeaza datele respective.

    fisExist=exist('In.mat')
    if fisExist~=0
        load In
    else
        Pantr1 = Date_Ant_RNA_1
        % se creeza unul nou (Cazul cand functia este apelatia
prima oara)!!!!
    end

    fisExist=exist('Out.mat')
    if fisExist~=0
        load Out
    else
        Tantr1 = Date_Ant_RNA_1
        % se creeza unul nou (Cazul cand functia este apelatia
prima oara)!!!!
```

```
end

disp('Incarcare tipare de antrenament si test
terminata!');disp(' ')

%%
disp('Implementare si antrenare retele neuronale...')
%Implementare
% matrice min-max pentru intrarile RNA
C=cat(2,-2,20);
mnmx1=C;
for i = 1:(size(Pantr1,1)-1)
    mnmx1=cat(1,C,mnmx1);
end

% serie de timp
net1= newff(mnmx1,[Nr_neur_ascunsi_1
Nr_neur_ies_1],{'tansig' 'logsig'},'traiscg');
net1.trainParam.lr = 10e-3;
net1.trainParam.mc = 0.01;
net1.trainParam.min_grad=1e-16;
net1.trainParam.show = 10;
net1.trainParam.epochs = 5000;
net1.trainParam.goal = 0.001;

% Antrenare
[net1,tr1]= train(net1,Pantr1,Tantr1);

disp('Implementare si antrenare retele neuronale
terminata!');disp(' ')

%%

% Gelu Ovidiu Tirian
%Functia pentru antrenarea RS

clear all
close all
clc

%%
disp('Initializare...')

% arhitectura spatiala
Nr_neur_intrare_2 = 2
Nr_neur_ascunsi_2 = 4
```

```
Nr_neur_ies_2 = 1
disp('Initializare terminata!');disp(' ')

%%
disp('Incarcare tipare de antrenament si test...')
Nr_exemple_2 = 200;

% Se genereaza datele de intrare si cele de iesire
% Se verifica daca variabilele de intrare si iesire se gasesc pe
hard.
% Daca da, atunci se incarca.
% Daca nu, se creeaza datele respective.

fisExist=exist('Pin.mat')
if fisExist~=0
    load Pin
else
    Pantr2 = Date_Ant_RNA_2(Nr_neur_intrare_2, Nr_exemple_2)
    % se creeza unul nou (Cazul cand functia este apelatia
prima oara)!!!!
end

fisExist=exist('Tout.mat')
if fisExist~=0
    load Tout
else
    Tantr2 = Date_Ant_RNA_2(Nr_neur_intrare_2, Nr_exemple_2)
    % se creeza unul nou (Cazul cand functia este apelatia
prima oara)!!!!
end

disp('Incarcare tipare de antrenament si test
terminata!');disp(' ')

%%
disp('Implementare si antrenare retele neuronale...')
%Implementare retea spatiala
net2= newff([0 1;0 1],[Nr_neur_ascunsi_2
Nr_neur_ies_2],{'tansig' 'logsig'},'trainlm');
net2.trainParam.lr = 10e-3;
net2.trainParam.mc = 0.01;
net2.trainParam.min_grad=1e-16;
net2.trainParam.show = 100;
net2.trainParam.epochs = 10000;
net2.trainParam.goal = 0.001;

% Antrenare
[net2,tr2]= train(net2,Pantr2,Tantr2);
```

```

disp('Implementare si antrenare retele neuronale
terminata!');disp(' ')
disp('***** Apasati < CR > pentru a realiza testarea
retelei *****')
pause

%%
disp('Testarea sistemului neuronal...')
% generare tipare de test
Ptest_DC = rand(Nr_neur_intrare_2, Nr_exemple_2);
Ptest_DC(1,10)=1.0
Ptest_DC(2,10)=1.0
for i=1:(Nr_exemple_2)
    if (Ptest_DC(1,i) >= 0.6) & (Ptest_DC(2,i) >= 0.6)
        Tsim(i) = 1
    else
        Tsim(i) = 0
    end
end
% generare arhitectura sistem neuronal
% calculul iesirilor tuturor RNA serie de timp
y_ST_test_DC=sim(net2, Ptest_DC);
plot(Ptest_DC,Tsim,'rO',Ptest_DC,y_ST_test_DC,'b*','LineWidth',1
)
legend('Rezulate Normale','Rezulate Normale','Rezultate
Retea','Rezultate Retea',-1)
disp('Testarea sistemului neuronal terminata!')

% Gelu Ovidiu Tirian
% Sistem neuronal pentru detectia fisurilor in procesul de
turnare continua

%%
clear all
close all
clc
disp('Initializare...')
Nr_esantioane_de_temperatura = 120
Nr_de_termocuple_pe_strat =4
Nr_de_straturi_de_termocuple=12
Direct_conectate = 1; %nr de straturi cu RNA direct conectate la
ies.
Nr_retele_serie_timp=Nr_de_termocuple_pe_strat*Nr_de_straturi_de
_termocuple
% nr de retele serie de timp direct conectate la iesire
Nr_RST_DC = Direct_conectate*Nr_de_termocuple_pe_strat;

```

```
% nr de rețele serie de timp indirect conctate la iesire (prin
cele spatiale)
Nr_RST_IC = Nr_rețele_serie_timp - Nr_RST_DC
Nr_rețele_spatiale = (Nr_de_straturi_de_termocuple -
Direct_conectate)*(Nr_de_termocuple_pe_strat-1)
% arhitectura serie de timp
Nr_neur_intrare_1=10
Nr_neur_ascunsi_1=8
Nr_neur_ies_1=1
% arhitectura spatiaala
Nr_neur_intrare_2=2
Nr_neur_ascunsi_2=4
Nr_neur_ies_2=1
disp('Initializare terminata!');disp(' ')

%%
disp('Incarcare tipare de antrenament si test...')
% Se antreneaza doar o singura retea neuronală serie de timp si
una
% spatiaala. In acest fel se reduce timpul de antrenament si
numarul de date de antrenament
% Vectorii de intrare se genereaza cu ajutorul modelului
matematic al procesului de turnare
% vectorii de iesire sunt formati din 0 (fara rupere) si 1 (cu
rupere)
Nr_exemple_1=330;
Nr_exemple_2=200;

% Se genereaza datele de intrare si cele de iesire pentru prima
retea
% Se verifica daca variabilele de intrare si iesire se gasesc pe
hard.
% Daca da, atunci se incarca.
% Daca nu, se creeaza datele respective.

    fisExist=exist('In.mat')
    if fisExist~=0
        load In
    else
        Pantr1 = Date_Ant_RNA_1
        % se creaza unul nou (Cazul cand functia este apelatia
prima oara)!!!!
    end

    fisExist=exist('Out.mat')
    if fisExist~=0
        load Out
    else
```

```

        Tantr1 = Date_Ant_RNA_1
        % se creaza unul nou (Cazul cand functia este apelatia
prima oara)!!!!
        end

% Se genereaza datele de intrare si cele de iesire pentru a doua
rete
% Se verifica daca variabilele de intrare si iesire se gasesc pe
hard.
% Daca da, atunci se incarca.
% Daca nu, se creeaza datele respective.

        fisExist=exist('Pin.mat')
        if fisExist~=0
            load Pin
        else
            Pantr2 = Date_Ant_RNA_2(Nr_neur_intrare_2, Nr_exemple_2)
            % se creaza unul nou (Cazul cand functia este apelatia
prima oara)!!!!
            end

        fisExist=exist('Tout.mat')
        if fisExist~=0
            load Tout
        else
            Tantr2 = Date_Ant_RNA_2(Nr_neur_intrare_2, Nr_exemple_2)
            % se creaza unul nou (Cazul cand functia este apelatia
prima oara)!!!!
            end

disp('Incarcare tipare de antrenament si test
terminata!');disp(' ')

%%
disp('Implementare si antrenare prima retea neuronală...')
%Implementare retea serie - dinamica
% matrice min-max pentru intrarile RNA
C=cat(2,-2,20);
mnmxl=C;
for i = 1:(size(Pantr1,1)-1)
    mnmxl=cat(1,C,mnmxl);
end

% serie de timp
net1= newff(mnmxl,[Nr_neur_ascunsi_1
Nr_neur_ies_1],{'tansig' 'logsig'},'trainscg');
net1.trainParam.lr = 10e-3;
net1.trainParam.mc = 0.01;

```

```

net1.trainParam.min_grad=1e-16;
net1.trainParam.show = 10;
net1.trainParam.epochs = 5000;
net1.trainParam.goal = 0.001;

disp('Implementare si antrenare a II-a retea neuronală...')
%Implementare retea spatiala
net2= newff([0 1;0 1],[Nr_neur_ascunsi_2
Nr_neur_ies_2],{'tansig' 'logsig'},'trainlm');
net2.trainParam.lr = 10e-3;
net2.trainParam.mc = 0.01;
net2.trainParam.min_grad=1e-16;
net2.trainParam.show = 100;
net2.trainParam.epochs = 10000;
net2.trainParam.goal = 0.001;

% Antrenare
[net1,tr1]= train(net1,Pantr1,Tantr1);
[net2,tr2]= train(net2,Pantr2,Tantr2);
disp('Implementare si antrenare retele neuronale
terminata!');disp(' ')

%%
disp('Testarea sistemului neuronal...')
% generare tipare de test
Ptest_IC = rand(Nr_neur_intrare_1, 6*Nr_RST_IC);
Ptest_DC = rand(Nr_neur_intrare_1, Nr_RST_DC);
% generare arhitectura sistem neuronal
% calculul iesirilor tuturor RNA serie de timp
y_ST_test_6=sim(net1, Ptest_IC);
y_ST_test_DC=sim(net1, Ptest_DC);
% se selecteaza maximul celor 6 valori consecutive pentru cele
IC
y_ST_test_IC = max (reshape(y_ST_test_6,6,Nr_RST_IC));
% calculul iesirilor RNA spatiale
Ptest_spatiale = [y_ST_test_IC(1:Nr_RST_IC-
1);y_ST_test_IC(2:Nr_RST_IC)];
y_SP_test = sim(net2, Ptest_spatiale);
detectie_fisura = max([y_SP_test y_ST_test_DC])
disp('Testarea sistemului neuronal terminata!')

```


ANEXA 4 CODUL SURSĂ AL PROGRAMULUI PENTRU PLC S315-2DP

The screenshot shows the SIMATIC Manager interface with the following content:

```

OB1 : Executie ciclica regatoare fuzzy
Comment:
Network 1 : Incarcare valori proces Baza de reguli 1
Comment:
L   "Debit Actual"           MD10
T   "ReguliFuzzy1".INPUT1    DB30.DBD0    -- 1. Fuzzy-Eingang
L   "Viteza actual"         MD20
T   "ReguliFuzzy1".INPUT2    DB30.DBD4    -- 2. Fuzzy-Eingang
L   "Temperatura Distribuitor" MD30
T   "ReguliFuzzy1".INPUT3    DB30.DBD8    -- 3. Fuzzy-Eingang
L   "Risc Tehnologic"       MD40
T   "ReguliFuzzy1".INPUT4    DB30.DBD12   -- 4. Fuzzy-Eingang

Network 2 : Title:
Comment:
L   "Debit Actual"           MD10
T   "ReguliFuzzy2".INPUT1    DB40.DBD0    -- 1. Fuzzy-Eingang
L   "Viteza actual"         MD20
T   "ReguliFuzzy2".INPUT2    DB40.DBD4    -- 2. Fuzzy-Eingang
L   "Temperatura Distribuitor" MD30
T   "ReguliFuzzy2".INPUT3    DB40.DBD8    -- 3. Fuzzy-Eingang
L   "Risc Tehnologic"       MD40
T   "ReguliFuzzy2".INPUT4    DB40.DBD12   -- 4. Fuzzy-Eingang

Network 3 : Baza de Reguli 1 in functie de intrare retea neuronală
Comment:

```

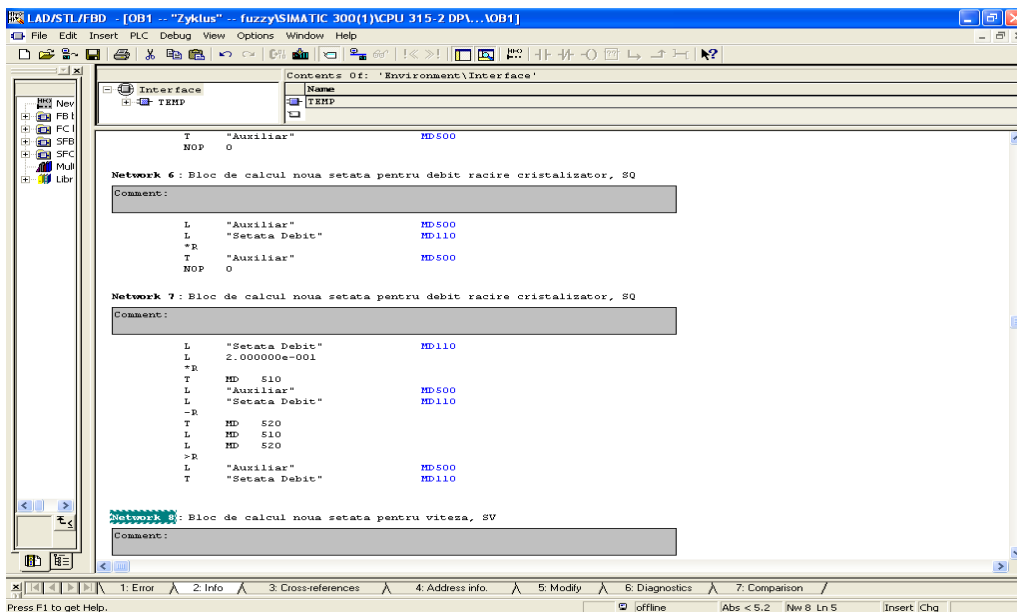
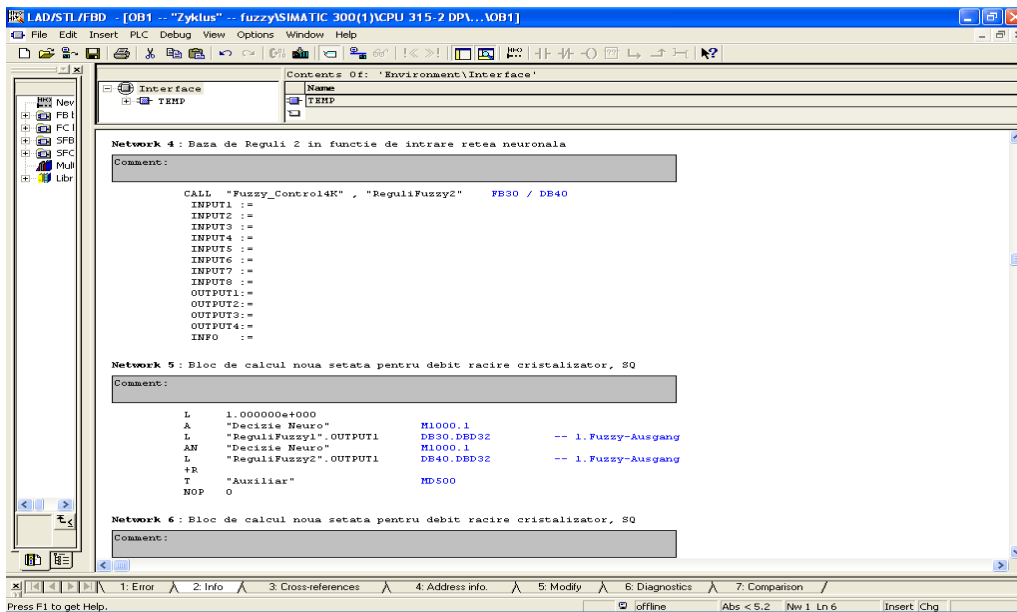
The screenshot shows the SIMATIC Manager interface with the following content:

```

Network 3 : Baza de Reguli 1 in functie de intrare retea neuronală
Comment:
CALL "Fuzzy_Control4K" , "ReguliFuzzy1"  FB30 / DB30
INPUT1 :=
INPUT2 :=
INPUT3 :=
INPUT4 :=
INPUT5 :=
INPUT6 :=
INPUT7 :=
INPUT8 :=
OUTPUT1:=
OUTPUT2:=
OUTPUT3:=
OUTPUT4:=
INFO :=

Network 4 : Baza de Reguli 2 in functie de intrare retea neuronală
Comment:
CALL "Fuzzy_Control4K" , "ReguliFuzzy2"  FB30 / DB40
INPUT1 :=
INPUT2 :=
INPUT3 :=
INPUT4 :=
INPUT5 :=
INPUT6 :=
INPUT7 :=
INPUT8 :=
OUTPUT1:=
OUTPUT2:=
OUTPUT3:=
OUTPUT4:=
INFO :=

```



Contents Of: 'Environment\Interface'

Name	Address
TEMP	

Network 8: Bloc de calcul noua setata pentru viteza, SV

Comment:

```

L 1.000000e+000
A "Decizie Neuro" M1000.1
L "ReguliFuzzy1".OUTPUT2 DB30.DBD36 -- 2. Fuzzy-Ausgang
AN "Decizie Neuro" M1000.1
L "ReguliFuzzy2".OUTPUT2 DB40.DBD36 -- 2. Fuzzy-Ausgang
-R
T "Auxiliar" MD500
L "Auxiliar" MD500
L "Setata Viteza" MD220
-R
T "Auxiliar" MD500
L "Setata Viteza" MD220
L 2.000000e-001
-R
T MD S10
L "Auxiliar" MD500
L "Setata Viteza" MD220
-R
T MD S20
L MD S10
L MD S20
-R
L "Auxiliar" MD500
L "Setata Viteza" MD220

```

Network 9: Initializare intrari regulator fuzzy Alunecare

Comment:

Contents Of: 'Environment\Interface'

Name	Address
TEMP	

Network 9: Initializare intrari regulator fuzzy Alunecare

Comment:

```

A "Decizie Neuro" M1000.1
L "ReguliFuzzy1".OUTPUT2 DB30.DBD36 -- 2. Fuzzy-Ausgang
AN "Decizie Neuro" M1000.1
L "ReguliFuzzy2".OUTPUT2 DB40.DBD36 -- 2. Fuzzy-Ausgang
T "AlunecareFuzzy".INPUT1 DB50.DBD0 -- 1. Fuzzy-Eingang
L "Alunecare" MD330
T "AlunecareFuzzy".INPUT2 DB50.DBD4 -- 2. Fuzzy-Eingang

```

Network 10: Baza de date alunecare

Comment:

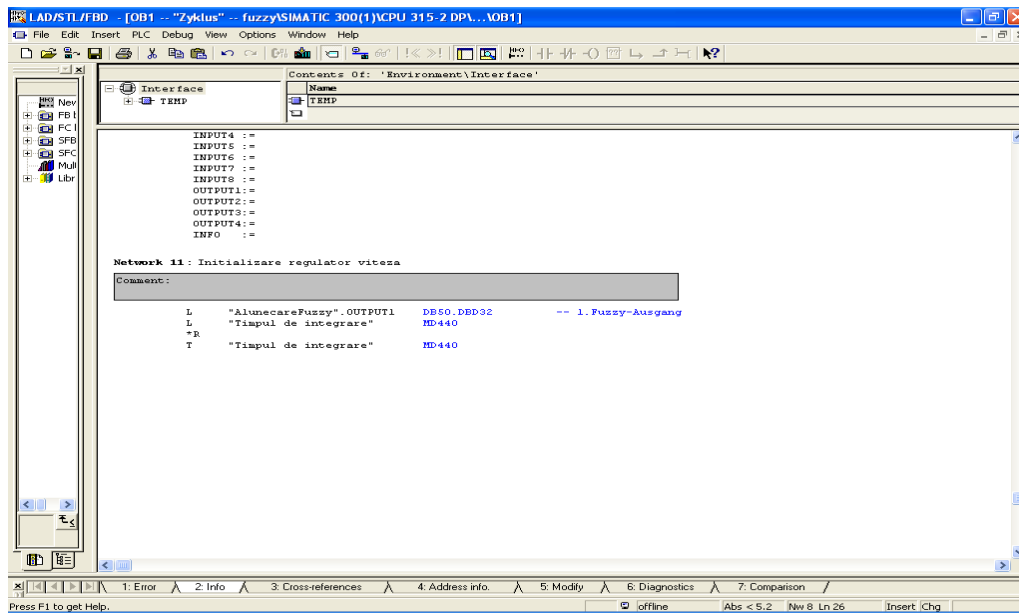
```

CALL "Fuzzy_Control4K", "AlunecareFuzzy" FE30 / DB50
INPUT1 :=
INPUT2 :=
INPUT3 :=
INPUT4 :=
INPUT5 :=
INPUT6 :=
INPUT7 :=
INPUT8 :=
OUTPUT1:=
OUTPUT2:=
OUTPUT3:=
OUTPUT4:=
INFO :=

```

Network 11: Initializare regulator viteza

Comment:



BIBLIOGRAFIE

- [Abb98] G.Abbel, W.R.L. Moonen – „New developments in continuous casting in Europa”, Proceedings of 3th European Conference in Continuous Casting Madrid 1998.
- [Ada99] J.Adamy – „Device for early detection of run-out in continuous casting”, United States Patent, No.5, 904,202, Date of Patent 18 May 1999.
- [Ana03] J. Anagnostopoulos - „Discretization of transport equations on 2D Cartesian unstructured grids using data from remote cells for the convection terms. International Journal for Numerical Methods in Fluids 42(3), 297 – 321.
- [Ang96] F.Angela and L.Marcel, Quality control in die casting with neural networks, Proceedings of 1 st International Symposium on Neuro-Fuzzy Systems, pp 1-7, 1996.
- [Ang01_1] S.Anghel, C.Cuntan – „Conducerea Fuzzy a procesului de răcire secundară la turnarea continuă”, Sesiunea de comunicări științifice, Hunedoara 2001.
- [Ang01_2] S.Anghel, N.Rusu, C.Cuntan – „Sistem expert pentru conducerea procesului de turnare continuă, bazat pe logica fuzzy”, Sesiunea de comunicări științifice, Petroșani 2001.
- [Ard01_1] E.Ardelean, ș.a – „Turnarea continuă a oțelului”,Editura Politehnica Timișoara, 2001.
- [Ard01_2] E.Ardelean,ș.a – „Cercetări privind procesul de solidificare a oțelului turnat continuu, Conferința Națională de Metalurgie și Știința Materialelor,20-21 sept., București, 2001.
- [Ard04] E.Ardelean – “Turnarea semifabricatelor de oțel” Editura Mirton, Timișoara, 2004.
- [Ard07] E. Ardelean, ș.a – „Optimizarea proceselor la turnarea continuă a oțelului”, Editura Cermi Iași,2007.
- [Ast95] K.J. Aström, T. Hägglund,- “PID Controllers – Theory,Design and Tuning”, Instrument Society of America,67Alexandre Drive,POBox 12277,Research Triangle Park,North Carolina 27709,USA, 1995.
- [Bal95] P.Baldi – „Gradient descendent learning algorithms: general dynamical systems perspective, IEEE Transaction on Neural Networks, vol.6, nr.1, 1995.
- [Bas94] B.K.Base, - “Expert Sistem, Fuzzy Logic and Neuronal Network Applications”, Proc. of the IEEE Nr. 8/1994.
- [Bea94] M.Beale –„Neural Network Tolbox for Matlab, MathWorks, Inc.1994.
- [Bha99] H.K.D.H.Bhadeshia, Neural networks in materials science, ISI International, 39, (10), pp 966-979, 1999.
- [Bha05] A.K.Bhattacharya, et al. – “Recognition of fault signature patterns using fuzzy logic for prevention of breackdowns in steel continuous casting process” Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp-318-324, 2005.
- [Bla89] K.E.Blazek and I.G.Saucedo – „Recovery of sticker type breakouts”, Proceedings of Steelmaking Conference, pp 99-107, 1989.
- [Bor04] M Bordei, A. Ciurea – “Influence of the cooling process on the evolution of the solidified crust during the continous casting of the steel slabs”, Metalurgia Nr.4, 2004.
- [Bou00] S.Bouhouche, M.Lahreche and J.Bast – „Mould thermal monitoring and control in continuous casting process”, Proceedings of 6 th Arab Congress on Iron and Steel Industry, Alexandria-Egypt, October 2000.

- [Bou01] S.Bouhouche, M.S.Boucherit and M.Lahreche – „Improvement of breakout detection system in continuous casting process using neural networks”, IEEE Proceedings on Advanced Process Control Applications for Industry Workshop, Vancouver, Canada, pp 53-63, 2001, (Site Internet www.ieee-ias.org/apc2001).
- [Bou02] S.Bouhouche – „Contribution to quality and process optimisation in continuous casting using mathematical modelling”, Dissertation, 18 Dec.,2002.
- [Bou02] S.Bouhouche – „Contribution to Quality and Process Optimization in Continuous Casting Using Mathematical Modelling”, Doctoral Thesis, 2002.
- [Bou07] S. Bouhouche, M. Lahreche, A. Moussaoui and J. Bast - “Quality Monitoring Using Principal Component Analysis and Fuzzy Logic. Application in Continuous Casting Process”, American Journal of Applied Science (AJAS), 4(9), ISSN: 1546-9239, 2007, pp.637-644.
- [Bra03_1] B.T. Branecy - “Method and apparatus for indirectly measuring induction motor slip to establish speed control”,United States Patent, Patent No. US 6,605,919 B1, 12 August, 2003.
- [Bra03_2] V.Bratu – „Cercetări experimentale privind simularea turnării continue a oțelului”, Revista Metalurgia, nr.10/2003.
- [But00] I.Butnaru, V.Geantă, ș.a. – „Turnarea continuă a semifabricatelor de oțel”, Editura Tehnică, București, 2000.
- [Cai99]K.K. Cai – “Teory and technology of countinuons casting of steel”, The metallurgical industry press, Beijing, 1999, pp.277.
- [Cam03] O. Camacho, C. Smith, W. Moeno- “Development of an Internal Model Sliding Mode Controller”, Ind. Eng.Chem. Res., Vol. 42, pp. 568-573, 2003.
- [Cav94] A. Cavillo, R.Setola, F. Vasca, Using Matlab,Simulink and Control System Toolbox: A Practical Approach, Editura Ligouri, 1994.
- [Câr94] D.I. Cârstoiu - “Sisteme expert”, Editura All, București, 1994.
- [Cha92] C. Charalambous – „Conjugate gradient algorithm for efficient training of artificial neural networks”, IEEE Proceedings, vol.139, no.3, 1992.
- [Che97] W.Chen, G.Duan and C.Ou – “Neural network applied to predicting molten steel temperature profile from converter to continuous casting”, Iron and Steel (CHINA), 32, (8), pp 30-32, 1997.
- [Che10] H.Y. Chen, S.J. Huang – „Adaptive fuzzy sliding-mode controller for control of the strip casting process”, Proc. IMechE Vol. 224 Part I: J. Systems and Control Engineering, 1-10, 2010.
- [Chi80] I.Chira, ș.a. – “Procedee speciale de turnatre”, EDT București 1980.
- [Coo98] J. Cooper- „Introduction to Partial Differential Equations with Matlab”, Birkhauser, Boston, 1998.
- [Cox02] E.Cox – „The Fuzzy Systems Handbook”, Amazon, 2002.
- [Cox93] E. Cox – „Adaptive Fuzzy Systems”, IEEE Spectrum, Feb., 1993.
- [Cre98] D.T.Creech, B.G.Thomas – „3-D Turbulent Multiphase Modeling of Molten Steel Flow and Heat Transfer in a Continuous Slab Caster”, CFX User’s Conference, Wilmington, DE, Oct.1, 1998.
- [Cri10] D. Cristea, O. Prosteian, T. Muschalik, **G.O. Tirian** – “Contribution to the creation and development of a new authorization concept based on a learning process” Computer Applications In Engineering Education Published online on 20 September 2010, DOI: 10.1002/cae.20477, Wiley InterScience, 2010.
- [Cun99] C.Cunțan – „Considerații privind fenomenele ce însoțesc solidificarea oțelului la turnarea continuă”,Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, tom I, Fasc.3,ISSN 1454 – 6531, 1999.
- [Cun01] C.Cunțan, S.Anghel – “Sistem Fuzzy pentru controlul nivelului în cristalizator la turnarea continuă” Sesiunea de comunicări științifice, Hunedoara 2001.

- [Cun02] C. Cunțan – „Cercetări privind modelarea și conducerea procesului de turnare continuă a metalelor”, Teză de doctorat, 2002.
- [Dri92] D.Driankov, H.Hellendorn, M.Reinfrank – „An Introduction to Fuzzy Control”, Springer Verlag, N.Y., 1992.
- [Dub80] D. Dubois, H. Prade – „Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications”, Academic Press, New York, 1980
- [Dud73] R.D. Duda, P.E.Hart – “Pattern classification and scene analysis” Wiley, N.Y, 1973.
- [Duk09] L. Dukman, C.H. Moon – “Development of healing control technology for reducing breakout in thin slab casters”, Control Engineering Practice 17, pg.3–13, 2009.
- [Efi86] V.A. Efimov – “Turnarea și cristalizarea oțelurilor”, Editura Tehnică București, 1986.
- [Fau94] L. Fausett – “Fundamentals of neural networks. Architectures, algorithms and application”, Practice Hall, 1994.
- [Fau07] N. Faur, I. Dumitru – “Diferențe finite și elemente finite în rezistența materialelor”, Editura Mirton, Timișoara, 2007.
- [Fil98] I.Filip – „Logica fuzzy în conducerea automată a instalațiilor”, Simpozionul internațional ICCA, vol.2, Timișoara, 1998.
- [Fil99] I.Filip – „Contribuții la conducerea adaptivă a proceselor complexe cu aplicație la comanda sistemelor de excitație a generatoarelor sincrone”, Teză de doctorat, 1999.
- [Fil07] I.Filip, O.Prostean, I.Szeidert, C.Vasar – „Medii de simulare”, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2007.
- [Fle02] T. Fleșer – „Modificarea stării oțelurilor supuse solicitărilor termomecanice”, Editura Politehnica, Timișoara, 2002.
- [Fri98] J.Frigière, L.Bertrand, M.Chouvet, M.Lallier and R.Perisse – „The state of the art of neural network application in the iron and steel industry outside of Europe”, European Commission for Technical Steel Research, ECSC Workshop, Proceedings of Application of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, Brussels 22-23 January, pp.53-62, 1998.
- [Fuk92] T.Fukuda - „Theory and Application of Neural Networks for Industrial Control Systems”, IEEE Trans. On Industrial Electronics, Dec. 1992.
- [Gal95] S. Galichet, - „Fuzzy Controllers: Synthesis and Equivalence”, IEEE Trans. On Fuzzy Systems, 1995.
- [Gâr00] Șt. Gârlașu, E.Răduca – “Bazele teoretice ale logicii fuzzy”, Editura Eftimie Murgu Reșița, 2000.
- [Ger04] J.M.Gere – „Mechanics of materials, Second edition, Books/Cole Engineering Division Monterey California, 2004.
- [Goc98] M.L.Goc and C.C.Thirion – „The SACHEM experience on artificial neural networks application”, European Commission for Technical Steel Research, ECSC Workshop, Proceedings of Application of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, Brussels 22-23 January, pp107-131, 1998.
- [God00] G.Godena, M.Colnarić - „Exception handling for PLC-based process control software,” Microprocessors and Microsystems, Vol. 24, pp. 407-414, 2000.
- [Gor92] M.Gori, A.Teri – „On the problem of local minima in backpropagation, IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992.
- [Guț77] M.Guțu, O.Takacs – „Turnarea continuă și semicontinuă a materialelor metalice”, Editura Tehnică, București, 1977.

- [Had98] M.Hadjiski, I.Kalaykov and S.Mollov – „Neural network modelling and control of parameter depending metallurgical plants”, Proceedings of IFAC Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, pp 375-380, 1998.
- [Hag94] M.T.Hagan, M.Menhaj – „Trening feedforward networks with the Marquardt algorithm”, IEEE Trans.Neural Networks, vol.5, pp.989-993,1994.
- [Hag96] M.T.Hagan, H.B.Demuth, M.H.Beale – „Neural Network Design, PWS Publishing Company, Boston, MA, 1996.
- [Hak97] R.G. Hakvoort, M.P.J. van Hof – „Identification of probabilistic system uncertainty regim by explicit evaluation of bias and variance errors”, IEEE Transaction on Automatic Control, vol.42, nr.11, pp.1516-1528, 1997.
- [Ham93_1] D.Hammerstrom – „Neural Networks At Work”, IEEE Spectrum, pp. 26-32, June 1993.
- [Ham93_2] D. Hammerstrom – „Working with Neural Networks”, IEEE Spectrum, pp. 46-53, July 1993.
- [He93] S. Z. He, T. D. Shaoua, F. L. Xu – „Fuzzy self-tuning of PID,” Fuzzy Sets and Systems, Vol.56, pp. 37-46, 1993.
- [Hem02] P.Hemy, R.Smylie and C.Srinivasan – „Analysing casting problem by the on-line monitoring of continuous casting mold temperatures”, JOM-e, 2002.
- [Hen98] W.Henning,ș.a. – „The Status and latest innovation of the thin slab casting technology”, Proceedings of 3th European Conference in Continuous Casting Madrid 1998.
- [Hep01] T.Hepuț, St.Maksay, ș.a – „Researches on the quality of lubricating powders used in steel continuous casting”, Revista Meridian Ingineresc, nr.2, 2001.
- [Hep03] T.Hepuț, D.Petre,ș.a. – “Researches on the viscosity of synthetic slags used in steel continuous casting”,Revista Metalurgia International nr.2,2003.
- [Her80] E.Herman – „Handbook on continuous casting”, Aluminium Verlag, Dusseldorf, 1980.
- [Her91] J.Hertz, A.Krogh, R.G.Palmer – „Introduction to the Theory of Neural Computation”, Redword City, C.A: Addison-wesley,1991.
- [Her94] J.Herbertson, O.I. He,ș.a. – “74th Steelmaking Conference Proceedings”, 74, ISS, Warendale, PA, pg.171-185,1994.
- [Hew98] P.N.Hewih, A.Robson, A.S.Normanton, N.S.Hunter and A.Scholes – „Continuous casting development at British steel”, Révue de Métallurgie, CIT (6), pp 765-776, 1998.
- [Hor98] M. Hormel, M. Schwartz – „Breakout prediction in continuous casting by artificial neural networks”, European Commission for Technical Steel Research, ECSC Workshop, Proceedings of Application of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, Brussels 22-23 January, pp159-167, 1998.
- [Hua99] T.T. Huang, H.Y. Chung, J.J. Lin, - „A fuzzy PID controller being like parameter varying PID”, IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceeding, Seoul, Korea, pp. 269-275, 1999.
- [Hua02] H.P. Huang, M.L. Roan, J.C. Jeng, - „On-line adaptive tuning for PID controllers,” IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 149(1), pp. 60-67, 2002.
- [Hym96] M. Hyman – “Borland C++ pentru toți”, Editura Teora, București, 1996
- [Ian94] A.Iancu – “Experimentări industriale de corelare a parame,rilor tehnologici cu indicatorii de calitate ai semifabricatelor turnate continuu”, Editura Tehnică,1994
- [Ilc97] I.Ilca , T.Hepuț, E.Karsai, N.Oargă – “Research of the metal consummation, with continuous casting”, Buletinul UPT, Tom 42 (26), fascicola 1, 1997.
- [Ino92] Inoue et al. – „Thermocouple for a continuous casting machine”, United States Patent, No.5, 158,128, Date of Patent 27 Oct 1992.
- [Ior99] Gh.Iorga., A.Iancu, - „Stadiu în practica de exploatare a procesului de turnare continuă”, în Metalurgia, nr.7,1999

- [Ivă83] A. Ivănescu, I. Albu - "Model matematic al distribuției temperaturilor la produsele obținute prin turnare continuă", *Metalurgia* nr.9, 1983
- [Jan98] M.Jansen, E.Broese, B.Feldkeller, O.Gramckown, T.proppe, M.Schlang and G.Sorgel - „Application of neural networks to process control in steel industry”, *Proceedings of IFAC Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, pp 177-182, 1998.
- [Jan04] M. Janik, H. Dyja, - „Modelling of three-dimensional temperature field inside the mould during continuous casting of steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, Volumes 157-158, 177-182, 2004.
- [Jam93] M. Jamshidi - „ Fuzzy Logic and Control”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1993.
- [Kie00] B. Kiflie, D. Alemu, - „Thermal Analysis of Continuous Casting Process”, *ESME 5th Annual Conference on Manufacturing & Process Industry*, Faculty of Technology, Addis Ababa University, Ethiopia, 2000
- [Kim97] T.Kim and S.R.T.Kumara - „Boundary defect recognition using neural networks”, *International Journal of Production Research*, 35, (9), pp 2397-2412, 1997.
- [Kim00] J.H. Kim and S.J. Oh, - “A fuzzy PID controller for nonlinear and uncertain system”, in *Soft Computing*, 4, Springer Verlag, pp. 123-129, 2000.
- [Kle98] H.Klein, ș.a. - „The new combination caster of PROFILARBED-ESCH-BELVAL”, *Proceedings of 3th European Conference in Continuous Casting Madrid 1998*.
- [Kom91] H.Kominami et al. - „Neural networks system for breakout prediction in continuous casting process, *Nippon Steel Technical Report*, (49), pp 34-38, 1991.
- [Kon93] M.Konishi - „Development of intelligent processes in iron and steel industry”, *Metal and Technology (Japan)*, 63, (2), pp 11-15, 1993.
- [Kru91] J.K. Krushke, J.R. Movellan - „Benefits of Gain: Speed Learning and Minimal Hidden Layers in Back-propagation Networks”, *IEEE Trans. On System Man and Cybernetics*, 1991.
- [Kum99] S.Kumar et al., Development of intelligent mould for on-line detection defects in steel billets, *Ironmaking and Steelmaking*, 26(4), pp 269-284, 1999.
- [Kus93] J.G. Kuschewski, S.Hui, S.H. Zak - „Application of feedforward neural network to dynamical system identification and control”, *IEEE Transaction on Control System Technology*, vol.1,,no.1,pp.37-49,1993.
- [Lee90] C.C. Lee - “Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller”, *IEEE Trans.Systems, Man&Cybernetics* 20(2):404-435, 1990.
- [Leo90] J.Leonard and M.A.Kramer, Improvement of the back-propagation algorithm for training neural networks”, *Computer Chemical Engineering*, 14, (3), pp 337-341, 1990.
- [Leo98] L.F. León, P.M. Austria - “Stability Criterion for Explicit Schemes (Finite-Difference Method) on the Solution of the Advection-Diffusion Equation”, *Mexican Institute of Water Technology, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Morelos, 1998. México.*
- [Lie10] J. Liebowitz, - „ Expert Systems with Applications”, *An International Journal Elsevier*, 2010.
- [Lip87] R.P.Lippman - „An introduction to computing with neural nets”, *IEEE ASSP Magazine*, 1987.
- [Liu08] Q. Liu, et al. - “Mathematical model of heat transfer for blum continuous casting”, *journal of University Science and Technology*, Beijing, volume 15, no.1, february 2008, pp.17
- [Luc79] A.Luca - „Consideratii teoretice asupra prafurilor pentru turnarea continua a otelurilor”, *Revista Metalurgia*, nr.5, 1979.

- [Lyg97] J. Lygeros - "A Formal Approach Fuzzy Modeling", IEEE Transaction on Fuzzy Systems, vol.5, no.3, pg.317-327,1997.
- [Mad96] J.D.Madill, Application of mould thermal monitoring to Avesta Sheffield's SMACC slab caster, Ironmaking and Steelmaking, 23, (3), pp 228-234,1996.
- [Mar90] A.J. Maren, J.T.Harston, R.M. Pap - „Handbook of Neural Computing Applications, Academic Press Inc.,N.Y.,1990.
- [Mas93] T.Masters - „Practical Neural Network Recipes in C++, Academic Press Inc.,USA,1993.
- [Mat74] J.I. Matsuno s.a - "An analysis of solidification rate and surface temperature of continuous casting slabs", Tetsu to Hagane, 1974, No.7, pp.1023
- [Mat88] Matsushita et al.- „Method and apparatus for preventing cast defects in continuous casting plant", United States Patent, No.4, 774, 998, Date of Patent 4 Oct. 1988.
- [Mol93] F.M.Moller - „A scale conjugate gradient algorithm for fast supervised learning", Neural Networks, vol.6, pp.525-533, 1993.
- [Mor94] K.W. Morton, D.F. Mayers - „Numerical Solution of Partial Differential Equations: An Introduction" Cambridge University Press, Cambridge, England, 1994.
- [Mor98] A.J.Morris and E.B.Martin - „Neural networks Panacea or pragmatic solution", European Commission for Technical Steel Research, ECSC Workshop, Proceedings of Application of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, Brussels 22-23 January, pp 9-41, 1998.
- [Mör98] K.Mörwald et al., Dynacs - "Cooling system features and operational results, Ironmaking and Steelmaking", 25(4), pp 323-327, 1998.
- [Mul90] B.Muller, J.Reinhardt - „Neural Networks, an Introduction, Springer Verlag, Berlin,1990.
- [Naj90] F.Najar - "Finite Element Modeling of Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer Through Bifurcated Nozzles in Continuous Steel Slab Casters" (Masters Thesis), University of Illinois at Urbana-Champaign, 1990.
- [Nak96] T.Nakamura, K.Kazuho - "Breakout prediction system in a continuous casting process", United States Patent, No. 5, 548,520, Date of Patent 20 august,1996.
- [Ngy98] H.T. Ngyena and M. Sugeno, - „Fuzzy systems: Modeling and control", Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-8112-2, 1998.
- [O'co94] T. O'conner, J. Dantzig - „Modeling the Thin Slab Continuous Casting Mold", Metallurgical and Materials Transaction s 25B(4): 443-457, 1994
- [Opr77] I.Oprescu ș.a., - "Utilaje metalurgice" Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1977
- [Opr78] F.Oprea - "Teoria proceselor metalurgice", Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1978
- [Par00] J.K.Park,s.a - "Analysis of thermal and mechanical behavior of cooper mould during the slab casting,83th Steelmaking Conference Proceedings", Pittsburg, march 26,29,2000.
- [Pat96] W.D Patterson - „Artificial Neural Networks Theory and Application", Practice Hall,1996.
- [Pha95] D.T.Pham, X.Lin - „Neural Networks for Identification, Prediction and Control", Springer Verlag, Londra, 1995.
- [Pin00] C.A.M.Pinheiro, I.V.S.Samarasekera, J.K.Brimacombe, B.Howes and O.Gussias - „Mould heat transfer and continuously cast billet quality with mould flux lubrication" Part2: Quality issues, Ironmaking Steelmaking, 27, (2), pp 144-159, 2000.

- [Pin06_1] C. Pinca, **G.O.Tirian** - „The numerical analysis of the asymmetrical thermal tension from hot rolling mill cylinders”, National conference of metallurgy and materials science, ROMAT, September 28-29, pg.296...303, Bucuresti -2006.
- [Pin06_2] C. Pinca, **G.O. Tirian** - „The researches and experiments regarding the thermal and the equivalent tension from the hot rolling mill cylinders in avoiding the growing thermal fatigue resistance and the increase of service life”, 10th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology” 11-15 Sept.2006, pg. 1419-1422, Lloret de Mar-Spania, TMT 2006.
- [Pin08] C. Pinca, **G.O. Tirian**, L. Vîlceanu - “The effects of the thermal fatigue upon the hot rolling mill cylinders”, Metalurgia Internațional, Ed. Științifică F.R.M, Vol. XIII, Nr.5, pg. 25-33, ISSN 1582 - 2214, 2008.
- [Pin09] C. Pinca Bretotean, **G.O. Tirian**, Ana Josan - “Finite element analysis of an overhead crane bridge”, Proceedings of the 2nd Wseas Finite Differences, Finite Elements, Finite Volumes, Boundary Elements (F-and-B 09),Tbilisi, Georgia, June 26-28, pp.51-56, ISSN:1790-2769, ISBN:978-960-474-089-5,2009.
- [Pin10] C.Pinca-Bretotean, **G.O Tirian** , A.Josan, G. Chete - Modeling effectiveness of stress and deformation state of strength structures, Proceedings of the 2nd Wseas Last trends on Engineering Mechanics, Structures and Engineering Geology (EMESG '10) Corfu Island, Greece, July , pp.97-102, ISSN:1792-4294, ISBN:978-960-474 -203-5, 2010.
- [Pop03] E.Popa, I.Kiss, A.Danciu - “Influenta parametrilor turnării asupra temperaturii suprafeței semifabricatului turnat continuu”, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, 2003, Tomul V, Fascicola 3
- [Pop05] E.Popa - “Rezultate experimentare privind influența parametrilor turnării asupra temperaturii suprafeței semifabricatului turnat continuu”, A X-a Sesiune de comunicări științifice cu participare internațională, Sibiu 2005.
- [Pop10] M.E.Popa ș.a. - “Simulation tendencies in the continuously cast half-products area”, Buletin of Engineering,Fascicule1,Tome III,pg-95-102,2010.
- [Pre97] Ș. Preitl, R. Precup, - „Introducere în conducerea Fuzzy a proceselor”, Editura Tehnică, București, 1997.
- [Pro85] O. Proștean, I. Mureșan - “Tehnici de identificare și modelare”, vol.1 și 2, Lito IPTVT,1985.
- [Pro95] O. Proștean, I. Filip, D. Curiac -“Self tuning excitațion control”, XXXIX Conferința za ETRAN, Zlatibor, Yugoslavia,1995.
- [Pro04] O. Proștean -“Sisteme de conducere autoacordabile”, Editura Orizonturi Universitare, Timisoara, 2004.
- [Pro06] O. Proștean, I. Filip, C. Vasar, I. Szeider -“Modelare si Simulare”, Editura Orizonturi Universitare, Timisoara,2006.
- [Psa88] Di.Psaltis, A.Sideris and A.Yamamura -„A multilayered neural network controller”, IEEE Control System Magazine, pp 17-21, 1988.
- [Qia96] W. Z. Qiao, M. Mizumoto, - „PID type fuzzy controller and parameters adaptive method,” Fuzzy Sets and Systems, Vol. 78, pp. 23-35, 1996.
- [Rec04] W.G.Recktenwal - Finite-Diference Approximations to the Heat Equation, Mechanical Engineering Department Portland State University,USA, January 21, 2004.
- [San98] M.Sanarico -„Neural networks: The ideal and the commercially available tools”, European Commission for Technical Steel Research, ECSC Workshop, Proceedings of Application of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, Brussels 22-23 January, pp 45-50, 1998.

- [Sch80] M.Schuster – " Perfecționări în tehnica turnării continue cu implicații privind calitatea semifabricatelor, reducerea consumului de metal și creșterea productivității instalațiilor ", în Gazeta Tehnico Stiințifică ,I.C.E.M.,nr.3/1980,pg.16.
- [Sch98] J.Schonbeck,ș.a. – „Current Status of ISP technology”, Proceedings of 3th European Conference in Continuous Casting Madrid 1998.
- [Sie97] Siemens – „Metals, Mining&More”, April2/97.
- [Sie98] A.G. Siemens- „New Operator Control Concept Enables Operation of Two Continuous Casting Plants from a Single Control Station”,1998.
- [Sim96] P.K. Simpson – „Neural networks applications”,IEEE Technology Update Series,N.Y.,1996
- [Smi77] G.D.Smith - " Numerical solution of partial differential equations: Finite difference methods", Oxford Univ. Press (Clarendon), London & New York,1977.
- [Sor98] G.Sorgrl, T.Poppe and M.Schlang, Real-time control with neural networks in steel processing, European Commission for Technical Steel Research, ECSC Workshop, Proceedings of Application of Artificial Neural Network Systems in the Steel Industry, Brussels 22-23 January, pp 209-225, 1998.
- [Sur06] S.Sureerattanan, H.N.Pien – „The optimal multilayer structure of back propagation networks”, Proceedings of the 7th Wseas International Conference on Neural Networks, Cavtat, Croatia, June, 2006.
- [Tal83] D.Taloi ș.a.- "Optimizarea proceselor metalurgice", Editura Didactică și Pedagogică, 1983.
- [Tho93] B.G. Thomas, ș.a. – Heat flow model of the continuous slab casting mould, interfaces and shall, în Metallurgical Transactions, 1993.
- [Tho97] B.G. Thomas, J.T. Parkman - „Simulation of Thermal Mechanical Behavior during Initial Solidification”, Thermec 1997 Internat. Conf. On Thermomechanical Processing of Steel and Other Materials, Wollongong, Australia, TMS, 1997
- [Tho99] B.G. Thomas – „ Continuous Casting:Modeling, The Encyclopedia of Advanced Materials (Dantzig, J., Greenwell, A.,Michalczyk, J., eds.), Pergamon Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, Vol. 2, 1999.
- [Tho01_1] B.G.Thomas-„Continuous casting, The Encyclopedia of Materials Science and Technology,Elsevier Science Ltd”,vol.2,Oxford,U.K.2001.
- [Tho01_2] B.G. Thomas - „Modeling of the continuous casting of steel-past,present and future, 59th Electric Furnance Conference,Pheonix, AZ,2001.
- [Tho03] B.G.Thomas – „Modeling of Continuous Casting”, The AISE Steel Foundation,Pittsburg,PA,2003.
- [Tir06_1] G.O.Tirian** - "High speed neuronal estimator for the command of the induction machine", International multidisciplinary scientific symposium "UNIVERSITARIA SIMPRO 2006" October, 13-14, pg.62-65, 2006.
- [Tir06_2] G.O. Tirian** -" Neuronal network system to identify speed", Annals of he Faculty of Engineering Hundoara, Tom IV, Fasc.3, ISSN 1584 - 2665 , pg.33-36, 2006.
- [Tir08_1] G.O. Tirian** – "Neural system for detecting cracks in the wire at the continuous casting - 12th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology",26-29Aug., Istanbul – Turcia, 2008
- [Tir08_2] G.O. Tirian**, S. Anghel - "Automatizarea proceselor continue", Editura Mirton, Timișoara, 2008.
- [Tir08_3] G.O. Tirian**, C. Pinca Bretotean – "Software implementation of a neuronal system which enables the prediction of the wire breaking continuous casting", Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing (CSECS '08), Puerto De La Cruz,

Tenerife, Canary Islands, Spain, December 15-17, pp.151-156, ISSN:1790-5117, 2008.

[Tir09_1] G.O. Tirian, C. Pinca-Bretotean, S. Rusu-Anghel – “Cracks prediction using artificial neural networks in continuous casting of steel”, Proceedings of 28th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, February,16-18, pp.108-112, Innsbruck, Austria, 2009.

[Tir09_2] G.O. Tirian - “Considerations about neuro-fuzzy adaptive systems”, ISSIR 2009 – 10th International Symposium “Interdisciplinary Regional Research”-Romania-Hungary- Serbia, 23-24, Apr.,2009.

[Tir09_3] G.O. Tirian, O. Prostean, I. Filip – “Control System of the Continuous Casting Process for Cracks Removal”, 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI) May 28–29, Timișoara, Romania, pp.265-269.

[Tir09_4] G.O. Tirian, C. Pinca Bretotean – “Applications of neural networks in continuous casting”, WSEAS Transactions on Systems, Issue 6, Volume 8, June, ISSN: 1109-2777, pp.693-702, 2009.

[Tir09_5] G.O. Tirian, S. Rusu-Anghel, M. Pănoiu, C. Pinca-Bretotean – “Control of the continuous casting process using neural networks”, Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Computers, Rodos Island, Greece, July 23-25, pp.199-204, ISSN:1790-5109, ISBN:978-960-474-099-4, 2009.

[Tir09_6] G.O. Tirian, S. Rusu-Anghel, C. Pinca-Bretotean – “Prediction of the signals using the neuronal networks”, Annals of the Faculty of Engineering Hundoara, Tome VII Fascicule 3, pg.361-363, ISSN 1584 – 2673, 2009.

[Tir09_7] G.O. Tirian , O. Prostean, S. Rusu-Anghel, B. Pinca, D.Cristea – „Fuzzy system for implementing the cracks control during the continuous casting”, Annals of DAAAM & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium, Volume 20, No.1, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-70-4, pp.1661-1662, 25-28th November, Vienna, Austria, 2009.

[Tir09_8] G.O. Tirian , B.C. Pinca, D. Cristea , M. Topor – „Research on the elimination of cracks in continuous casting plant using fuzzy logic”, Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing (CSECS '09), Puerto De La Cruz, Tenerife, Canary Islands, Spain, December 14-16, pp.273-278, ISSN:1790-5117, ISBN: 978-960-474-139-7, 2009.

[Tir10_1] G.O. Tirian, B.C. Pinca, D. Cristea , M. Topor – „Applications of fuzzy logic in continuous casting”, WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL, Issue 3, Volume 5, March, ISSN:1991-8763, pp.133-142, 2010.

[Tir10_2] G.O. Tirian, G. Prostean, S.A. Rusu, D.Cristea – „Adaptive control system of continuous casting process based on a fuzzy logic mechanism” - IEEE International Joint Conferences on Computational Cybernetics and Technical Informatics ICC-CONTI 2010, May 27-29, Timisoara, ISBN: 978-1-4244-7431-8, pp.379-382, 2010.

[Tir10_3] G.O. Tirian, D. Lemle, St. Maksay – „A computational method for an truncated modeling of the normal distribution”, Semigroups of Linear Operators and Applications, ICNAAM 2010, Rhodes, Greece, September 19-25, 2010.

[Tir10_4] G.O. Tirian – „Applications of fuzzy logic in continuous casting of steel, E-book chapter, Artificial Intelligence resources in Control and Automation Engineering”, 2010.

[Tir10_5] G.O. Tirian, C. Pinca, C. Abrudean, C. Chioncel – “Analytical identification and simulation of steel solidification process in continuous casting”, Analele Universității “Eftimie Murgu” Reșița, Anul XVII, Nr. 1, 2010, ISSN 1453 – 7397.

- [Tir10_6]** G.O. Tirian, C. Pinca, M. Topor – „Simulation of neural and fuzzy system to predict, detect and eliminate cracks in continuous casting”, International Symposium on Advanced Engineering & Applied Management 40th Anniversary in Higher Education, 4-5 November 2010, Hunedoara, section II, pp 145-150, ISBN 978-973-0-09340-7.
- [Tir10_7]** **Tirian G.O.**, C. Pinca, C. Chioncel, S. Mezinescu – “Industrial implementation of the prediction, detection, and crack removal system of continuous casting”, International Symposium on Advanced Engineering & Applied Management 40th Anniversary in Higher Education, 4-5 November 2010, Hunedoara, section II, pp 13-18, ISBN 978-973-0-09340-7.
- [Tir10_6]** **G.O. Tirian**, C. Pinca, M. Topor – „Simulation of neural and fuzzy system to predict, detect and eliminate cracks in continuous casting”, International Symposium on Advanced Engineering & Applied Management, Hunedoara, 2010.
- [Tir10_7]** **G.O. Tirian**, C. Pinca, C.Chioncel, S. Mezinescu – “Industrial implementation of the prediction, detection, and crack removal system of continuous casting”, International Symposium on Advanced Engineering & Applied Management, Hunedoara, 2010.
- [Tir11_1]** **G.O. Tirian**, O. Prostean, I. Filip, C. Pinca-Bretotean – „Modeling and simulation of primary solidification process of steel”, 9th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics SAMI 2011, 27-29 Ianuarie, Smolenice, Slovakia, 2011.
- [Tri75] I. Tripsa, s.a. – “Optimizarea proceselor de turnare și solidificare a oțelului”, Editura Tehnică București, 1975.
- [Use03] M. G. Uzelkaya, I. Eksin, E. Yesil, - „Self-tuning of PID-type fuzzy logic controller coefficients via relative rate observer,” Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 16, pp. 227-236, 2003.
- [Var82] B.Varga, I.Varga – „Studiu asupra formei conului de solidificare la turnarea continuă”, în Metalurgia, nr. 4/1982, p.195.
- [Vol97] C.Voloșencu – „Reglare fuzzy și neuronală”, Editura Eurobit, Timisoara, 1997.
- [Vol99_1] C.Voloșencu – „Using backpropagation in neural identification”, Analele Universității din Oradea, 1999.
- [Vol99_2] C.Voloșencu – „Consideratii privind utilizarea rețelelor neuronale in identificarea sistemelor neliniare”, Revista romana de Automatică și Informatică, vol.9, nr.3, 1999.
- [Vol07] C.Voloșencu – „Sisteme fuzzy și neuronale”, Editura Politehnica, Timisoara, 2007.
- [Wan94] L.X. Wang – “Adaptive fuzzy systems and control: design and stability, Prentice Hall, 1994.
- [Wel99] H.H. Wellker et al. – Method and apparatus for controlling the cooling of a strand in a continuous casting installation, Patent number 5988259, Date of Patent nov.23, 1999.
- [Wer90_1] P.J.Werbos – “Neural networks for control: an overview”, Proceedings of IEEE International Conference on Automatic Control, 1990.
- [Wer90_2] P.J.Werbos – “Backpropagation through time: what it does and how to do it, Proceedings of IEEE International, vol.78, no. 10, 1990.
- [Wil92] F.A. William – “Numerical Methods for Partial Differential Equations”. Academic Press, Inc., Boston, 3th edition 1992.
- [Wil98] S.Wilmotte – „Research drive recent developments in continuous casting”, Proceedings of 3th European Conference in Continuous Casting Madrid 1998.

- [Won92] C.Y. Won, B.K. Bose – "Robust position control of induction motor using fuzzy logic control, Intern. Conf. of the IEEE, 1992.
- [Won01] LK Wong, FHF Leung, PKS Tam, - "A fuzzy sliding controller for nonlinear systems", IEEE Transaction on Industrial Electronic, vol. 48: (1) pp.32-37 February 2001.
- [Yaj85] Yaji et al. - „Method of controlling continuous casting equipment”, United States Patent, No.4, 553,604, Date of Patent 19 Nov 1985.
- [Yes04] E. Yesil, M. Guzelkaya, I. Eksin - "Self tuning fuzzy PID type load and frequency controller", Energy Conversion and Management, vol. 45: (3) 377-390, ISSN: 0196-8904, February 2004.
- [Zad65] L.A.Zadeh – „Fuzzy Sets”, Information and Control, no.8, pg.338-353.
- [Zad88] L.A.Zadeh – „Fuzzy Logic”, IEEE Computer Magazine, pg.83-93, 1988.
- [Zhe94] W.Zhenni, D.Christine, T.Ming and J.A.Morris – „A procedure for determining the topology of multilayer feedforward neural networks”, Neural Networks, 7, (2), pp 291-300, 1994.
- [Zir02] G.Zirbo, N.Piper, M.Piper- „Considerații asupra procesului de lubrifiere la turnarea continuă a oțelului”, Sebeș 2002
- [Zim85] H.J. Zimmermann – „Fuzzy set theory and its applications”, Kluwer-Nijhoff, Publishing,1985.
- [Zul09] Zulfatman, M.F. Rahman - "Application of Self-Tuning Fuzzy PID Controller on Industrial Hydraulic Actuator Using System Identification Approach" International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, vol.2, no.2, pp.246-261, June ,2009.
- [Zur92] J.M. Zurada – „Introduction to artificial neural systems”, West Pub.Co.USA,1992.
- [***72] *** - „Turnarea continuă. Limitele calitative ale extinderii procedurii”, Studiu de sinteză, Oficiul de Documentare și Publicații Tehnice al industriei metalurgice, 1972.
- [***73] *** - „Stadiul tehnologic actual și tendințe de viitor în turnarea continuă ”, în Sinteze – Documentare,1973.
- [***77] *** - „Casting and solidification of steel”, IPC Science and Technology Press Ltd. Guilforderne Luxembourg, 1977.
- [***78] *** - "Manualul inginerului metalurg", vol.I, Editura Tehnică, București, 1978.
- [***86] *** - „Continuous casting of steel 1985” – A second study, International Iron and Steel Institute, Committee on Technology, Brussels,1986.
- [***93] Math Works Inc. – "Matlab Reference Guide", Math Works Inc., Natick, Massachusetts, 1993.
- [***95] *** - "Documentația tehnică a firmei Mannesman", 1995.
- [***97] Math Works Inc. – "Matlab - The Language of Technical Computing", Math Works Inc., Natick,1997.
- [***98] *** Mannesmann - "Descriere funcțională. Mașina de turnare continuă", documentație de firmă.
- [***00] – "Asimilarea în fabricație a prafurilor de turnare, folosite la turnarea continuă a oțelului", Program CD ORIZONT 2000/2001 Nr.1455.
- [***01] *** - "Prospect",Concast AG,Zurich,2001.
- [***03] *** - "Buletin statistic", Informații ext, UniRomSider, Colecția 2003-2004.
- [***_1] <http://www.neurosolutions.com>
- [***_2] Siemens, „S7-300 Programmable Controller Hardware and Instalation”, Manual.
- [***_3] Siemens, „Programming with Step7”, Manual.
- [***_4] <http://automation.siemens.com>.

ANEXA 5 LISTA DE LUCRĂRI PUBLICATE ÎN DOMENIUL TEZEI

A. Reviste cotate ISI

1. *Contribution to the creation and development of a new authorization concept based on a learning process* - D. Cristea, O. Prostean, T. Muschalik, **G.O. Tirian** - Computer Applications In Engineering Education Published online on 20 September 2010, DOI: 10.1002/cae.20477, Wiley InterScience, 2010.
2. *The effects of the thermal fatigue upon the hot rolling mill cylinders* - Pinca C., **Tirian G.O.**, Vîlceanu L. Metalurgia Internațional, Ed. Științifică F.R.M, Vol. XIII, Nr.5, pg. 25-33, ISSN 1582 – 2214, 2008.

B. Volumele unor manifestari științifice internaționale cotate ISI

1. *Modeling and simulation of primary solidification process of steel* - **Tirian G.O.**, Prostean O., Filip I., Pinca-Bretotean C., 9th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics SAMI 2011, 27-29 Ianuarie, pp. 311-316, Smolenice, Slovacia, ISBN 978-1-4244-7428-8, 2011.
2. *Modeling effectiveness of stress and deformation state of strength structures*, C.Pinca-Bretotean, **Tirian G.O.**, A.Josan, G. Chete - Proceedings of the Last trends on Engineering Mechanics, Structures and Engineering Geology (EMESSEG '10)_Corfu Island, Greece, July , pp.97-102, ISSN:1792-4294, ISBN:978-960-474 -203-5, 2010.
3. *Control System of the Continuous Casting Process for Cracks Removal* - **Tirian G.O.**, O. Prostean, I. Filip, IEEE 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI) May 28–29, 2009–Timișoara, Romania, pp.265-269, 2009.
4. *Fuzzy system for implementing the cracks control during the continuous casting* - **Tirian G.O.**, O.Prostean, S. Rusu-Anghel, Pinca B. C, D.Cristea Annals of DAAAM &Proceedings of the 20th International Symposium, Volume 20, No.1, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-70-4, pp.1661-1662, 25-28th November, Vienna, Austria, 2009.
5. *Research on the elimination of cracks in continuous casting plant using fuzzy logic* - **Tirian G.O.**, Pinca B.C, Cristea D, Topor M. Proceedings of the 8th International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing (CSECS '09),Puerto De La Cruz, Tenerife, Canary Islands, Spain, December 14-16, pp.273-278, ISSN:1790-5117, ISBN: 978-960-474-139-7, 2009.

6. *Control of the Continuous Casting Process Using Neural Networks* - **Tirian G.O.**, Rusu-Anghel Stela, Pănoiu M., Pinca-Bretotean C., 13th International Conference on Computers, Recent Advances in Computers (Proceedings), Rodos, Greece, 2009, 23-25 Iulie, ISBN 978-960-474-099-4, ISSN 1790-5109, pag. 199-204.

7. *Finite element analysis of an overhead crane bridge*- C. Pinca Bretotean, **Tirian G.O.**, Ana Josan – Proceedings of the 2nd Wseas Finite Differences, Finite Elements, Finite Volumes, Boundary Elements (F-and-B 09), Tbilisi, Georgia, June 26-28, pp.51-56, ISSN:1790-2769, ISBN:978-960-474-089-5, 2009.

8. *Software implementation of a neuronal system which enables the prediction of the wire breaking during continuous casting* – **Tirian G.O.**, Pinca B.C, Proceedings of the 7th Int. Conf. on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal processing (CSECS '08), Puerto De La Cruz, Tenerife, Canary Islands, Spain, December 15-17, pp.151-156, ISSN:1790-5117, 2008.

C. Reviste de specialitate de circulație internațională indexate în baze de date internaționale (BDI)

1. *Applications of fuzzy logic in continuous casting* – **Tirian G.O.**, C.Pinca-Bretotean., D. Cristea, M. Topor, Transactions on Systems and Control, Issue 3, Volume 5, pp.133-142, ISSN:1991-8763, indexată Scopus, 2010.

2. *Applications of neural networks in continuous casting* - **Tirian G.O.**, Pinca Bretotean. C. - Transactions on Systems, Issue 6, Volume 8, June, ISSN: 1109-2777, pp.693-702, 2009.

D. Volumele unor manifestări științifice internaționale, indexate în baze de date internaționale (BDI)

1. *A computational method for an truncated modeling of the normal distribution* - **Tirian, G.O.**, Lemle D, Maksay St., International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematic ICNAAM 2010, Rhodes, Greece, September 19-25, pg.456-459, ISBN 978-0-7354-0831-9, 2010.

2. *Adaptive control system of continuous casting process based on a fuzzy logic mechanism* - **Tirian G.O.**, G. Prostean, S.Rusu-Anghel, D.Cristea - IEEE International Joint Conferences on Computational Cybernetics and Technical Informatics ICC-CNTI 2010, May 27-29, Timisoara, ISBN: 978-1-4244-7431-8, pp.379-382, 2010.

3. *Cracks prediction using artificial neural networks in continuous casting of steel* - **Tirian G.O.**, Pinca C., Rusu-Anghel S., Proceedings of 28th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, February,16-18, pp.108-112, Innsbruck, Austria, 2009.

E. Reviste de specialitate din țară cotate B+ în clasificarea CNCSIS

1. *Analytical identification and simulation of steel solidification process in continuous casting* - **Tirian G.O.**, Pinca C., Abrudean C., Chioncel C., *Analele Universității "Eftimie Murgu" Reșița*, Anul XVII, Nr.2, pp.293-304, ISSN 1453 – 7397, 2010.
2. *Prediction of the signals using the neuronal networks* - **Tirian G.O.**, S.Rusu-Anghel,C. Pinca-Bretotean *Annals of he Faculty of Engineering Hunedoara*, Tome VII Fascicule 3, pg.361-363, ISSN 1584 – 2673, 2009.
3. *Neuronal network system to identify speed* - **Tirian G.O.**, *Annals of he Faculty of Engineering Hunedoara*, Tom IV, Fasc.3, ISSN 1584 - 2665, pg.33-36, 2006.

F. Volumele unor manifestări științifice din țară sau străinătate

1. *Simulation of neural and fuzzy system to predict, detect and eliminate cracks in continuous casting* – **Tirian G.O.**, C. Pinca - Bretotean,, M. Topor, *International Symposium on Advanced Engineering &Applied Management 40th Anniversary in Higher Education, Hunedoara*, section II, pp 145-150, ISBN 978-973-0-09340-7, 2010.
2. *Industrial implementation of the prediction, detection, and crack removal system of continuous casting* – **Tirian G.O.**, Pinca B. C, C.Chioncel, S.Mezinescu, *International Symposium on Advanced Engineering &Applied Management 40th Anniversary in Higher Education, Hunedoara*, section II, pp 13-18, ISBN 978-973-0-09340-7, 2010.
3. *Considerations about neuro-fuzzy adaptive systems* - **Tirian G.O.**, ISSIR 2009 – 10th International Symposium "Interdisciplinary Regional Research"- Romania-Hungary- Serbia, 23-24, Apr.,2009.
4. *Neural system for detecting cracks in the wire at the continuous casting* - **Tirian G.O.**, 12th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology”, 26-29 Aug., Istanbul – Turcia, TMT 2008.
5. *Increasing all technical performance of experimental equipment for studying metallic and semi-conducting material surface* - **Tirian G.O.**, 11th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology” 05-09 Sept., pg. 575-578, Hammamet – Tunisia, 2007.
6. *The numerical analysis of the asymmetrical thermal tension from hot rolling mill cylinders* - Pinca C., **Tirian G.O.**, National conference of metallurgy and materials science, ROMAT, September 28-29, pg.296-303, Bucuresti -2006.

7. *The researches and experiments regarding the thermal and the equivalent tension from the hot rolling mill cylinders in avoiding the growing thermal fatigue resistance and the increase of service life* - Pinca C., **Tirian G.O.**, 10th International Research/Expert Conference „Trends in the development of machinery and associated technology” 11-15 Sept.2006, pg. 1419-1422, Lloret de Mar-Spania, TMT 2006.

8. *High speed neuronal estimator for the command of the induction machine* - **Tirian G.O.**, International multidisciplinary scientific symposium “UNIVERSITARIA SIMPRO 2006” October, 13-14, pg.62-65, 2006.

G) E-books

1. *Intelligent systems used in continuous casting process*, **Tirian G.O.**, E-book chapter, Artificial Intelligence Resources in Control and Automation Engineering, 30 pagini, în curs de publicare.

ANEXA 6
LISTA DE LUCRĂRI PUBLICATE
(EXCEPTÂND CELE DIN DOMENIUL TEZEI)

A. Volumele unor manifestări științifice internaționale indexate ISI

1. *Distributed system for access control to physical resources base don qualifications* - D.Cristea, O.Prostean, T.Muschalik, **G.O.Tirian**, Proceedings of the 9th Int. Conf.on Signal Processing,Robotics and Automation (ISPRA '10), UNIVERSITY, Cambridge, England February 20-22, pp.201-204, ISSN:1790-5117, ISBN:978-960-474-156-4,2010.
2. *Modeling effectiveness of stress and deformation state of strength structures* - C.Pinca-Bretotean, **G.O Tirian** , A.Josan, G. Chete, Proceedings of the 2nd Last trends on ENGEERING MECHANICS, STRUCTURES and ENGINEERING GEOLOGY (EMESEG `10) Corfu Island, Grece, July , pp.97-102, ISSN:1792-4294, ISBN:978-960-474 -203-5, 2010.
3. *The analysis of the stresses and strains state of the strength structure of a rolling bridge for increasing its solidity-* C. Pinca Bretotean, **G.O. Tirian**, Ana Josan, International. Conference on ENGEERING MECHANICS, STRUCTURES and ENGINEERING GEOLOGY (EMESEG 09) Rodos Island, Greece, July 22-24, pp.79-84, ISSN:1790-2769, ISBN:978-960-474 -101-4, 2009.
4. *The optimization of the main beam for the resistance structure of an over-size rolling bridge-* C. Pinca Bretotean, **G.O. Tirian**, V. Socalici, Erika Ardelean, Int. Conf.on SIMULATION,MODELLING AND OPTIMIZATION (SMO 09), Budapest Tech, Hungary, September 3-5,2009 pp.86-91, ISSN:1790-2769, ISBN:978-960-474-113-7, 2009.
5. *Algorithms for Raw Material Dosage Control for Cement Plants*, Rusu-Anghel Stela, **Tirian G.O.**, Osaci M., Diniș C, International Conference on SYSTEMS, Recent Advances in SYSTEMS (Proceedings), Rodos, Greece, 23-25 Iulie, ISBN 978-960-474-097-0, ISSN 1790-2769, pag. 236-241, 2009.
6. *Experimental Considerations upon the Optimal Control of Reversing Rolling Mills-*Rusu-Anghel Stela, **Tirian G.O.**, Gherman L., Rusu N., 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2009), Proceedings of the 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timișoara, Romania, 2009, 28-29 Mai, ISBN 978-1-4244-4478-6, pag. 295-300.

7. *Using sap netweaver to implement a new authorisation concept based on qualifications and physical connection through rfid*, D.Cristea, O.Prostean, T.Muschalik, **G.O.Tirian**, The 3rd European International Young Researchers' and Scientists' Conference, 25-28th November 2009, Vienna, Austria, 2009.

8. *Digital ear for the determination of ball mill load*, S.Rusu-Anghel, **G.O.Tirian**, N.Rusu-Anghel, L.Gherman, Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of 20th International Symposium Publishing of research/scientific report as paper in ISI Proceedings, 2009.

9. *An access control pattern based on qualifications to grand access to physic resources*, D.Cristea, O.Prostean, T.Muschalik, **G.O.Tirian**, The 3rd European International Young Researchers' and Scientists' Conference, 25-28th November 2009, Vienna, Austria, 2009.

B. Reviste de specialitate de circulație internațională indexate în baze de date internaționale (BDI)

1. *Development objects and algorithms required to implement a new method of access control to physical resources, base don qualification* - D.Cristea, O.Prostean, T.Muschalik, **G.O.Tirian**, TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL, Issue 4, Volume 5, pp.228-23, ISSN:1991-8763, 2010.

2. *Quantitative and qualitative study on the state of stresses and strains of the strength structure of a crane bridge*, C.Pinca-Bretotean, **G.O.Tirian**, A.Josan, G.Chete, Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, Issue 4, Volume 5, pp.231-241, ISSN: 1991-8747, 2010.

C. Volumele unor manifestări științifice internaționale, indexate în baze de date internaționale (BDI)

1. *Control System for Catenaries – Pantograph Dynamic Interaction Force* - S.Rusu-Anghel, C.Miklos, J.Averseng, **G.O.Tirian** IEEE International Joint Conferences on Computational Cybernetics and Technical Informatics ICC-CONTI 2010, May 27-29, Timisoara, ISBN: 978-1-4244-7431-8, pp.181-186.

2. *The advantages of using SAP NetWeaver platform to implement a multidisciplinary project*- D.Cristea, O.Prostean, T.Muschalik, **G.O.Tirian** - IEEE International Joint Conferences on Computational Cybernetics and Technical Informatics ICC-CONTI, May 27-29, Timisoara, ISBN:978-1-4244-7431-8, pp.383-386, 2010.

D. Reviste de specialitate din țară cotate B+ în clasificarea CNCSIS

1. *The current stage of the research about the thermal shock inside the rolling cylinders*, Pinca C., **Tirian G.O.**, Annals of he Oradea University, 2008, Fascicule of Management and Technological Engineering, Volume VII (XVII), pg.520-527, ISSN 1583 – 0691, 2008.

2. *Theoretical contribution and original experiments for determining all mathematical relations for calculating symmetrical*, Pinca C., **Tirian G.O.**, Annals of the Oradea University, Fascicule of Management and Technological Engineering, Volume VII(XVII), pg.512-519, ISSN 1583 – 0691, 2008.
3. *Experimental installation for studying the lastigness of the rolling cylinders*, Pinca C., **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, TomVI, Fasc.3., pg.138-142, ISSN 1584 – 2673, 2008.
4. *Installation for determining the rolling forces*, Pinca C., **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, TomVI , Fasc1.,pg.169-172 ISSN 1584 – 2665, 2008.
5. *System of automatic regulation of the relation between two flows*, **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, , Tom VI, Fasc.I, pg.173-176, ISSN 1584 – 2665, 2008.
6. *Numerical system for temperature measuring* - **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tom VI , Fasc.3, pg. 54-58, ISSN 1584 – 2665, 2008.
7. *The dimensional optimization of a cardanic cross according to the analysis based on finite elements*, **Tirian G.O.**, Pinca C. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 2008, Tom VI, Fasc.3, pg. 90-94 ISSN 1584 – 2673.
8. *Numerical system for measurement fluid debit*, **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tom IV, Fasc.3, ISSN 1584 – 2665, pg.37-42, 2006.
9. *Method for evaluating the durability of the rolling mills*, Pinca C., **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tom IV, Fasc.3, ISSN 1584 – 2665, pg.25-32, 2006.
10. *Evolution act of the thermal stress, about behaviour in exploitation of the rolling mill cylinders*, Pinca C., **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tom IV, Fasc.3, ISSN 1584 – 2665, pg. 21-24, 2006.
11. *Neuronal network system to identify speed*, **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tom IV, Fasc.3, ISSN 1584 - 2665,pg.33-36, 2006.
12. *Laboratory stand for study of the digital interface*, **Tirian G.O.**, Popa G.N.,Chioncel C. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 2006 Tom IV, Fasc.2, ISSN 1584 – 2665.
13. *Design and Creation of a Device Meant to Measure the Level of Liquid*, **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 2006, Tom IV, Fasc.1, ISSN 1584 – 2665.
14. *The hydroelectric potential use of the water feeding pipes*, S. Deaconu, R. Babău, L. Gherman, I. Popa, G.N. Popa, **G.O. Tirian**, Buletinul Institutului Politehnic Iași, Tomul I(liv), Fasc.5, Electrotehnică, Energetică, Electronică, pg.215-218.

15. *Digital interface board with four input ports*, **Tirian G.O.**, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, Tome II, Fasc. 1, pg. 185-188, 2004.
16. *Utilizarea rețelelor Petri în modelarea conducerii liniilor flexibile de fabricație*, Rusu N., **Tirian G.O.**, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul V, Fasc. 2, pag. 133-137, ISSN 1454-6531.
17. *Sistem numeric pentru măsurarea nivelului de lichid*, Rusu N., **Tirian G.O.**, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul V, Fasc. 1, pag. 5-11, ISSN 1454-6531, 2003.
18. *Realizarea și proiectarea unui sistem pentru măsurarea debitului de fluide*, **Tirian G.O.**, Popa G. N., Ghioncel C, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul V, Fasc. 1, pag. 29-37, ISSN 1454-6531, 2003.
19. *Digital interface board with four input ports*, **Tirian G.O.**, Annals Of the Faculty Of Engineering Hunedoara, 2004, Tome II, Fasc. 1, pg. 185-188, 2004.
20. *Realizarea și proiectarea unui sistem pentru măsurarea debitului de fluide*, **Tirian G.O.**, Popa G. N., Ghioncel C., Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul V, Fasc. 1, pag. 29-37, ISSN 1454-6531, 2003.

E. Reviste de specialitate din străinătate cu circulație internațională recunoscută

1. *Durability researches equipments for hot rolling mill cylinders*, Pinca C., Kiss I, Josan A., **Tirian G.O.**, MASINSTVO- Journal of Mechanical Engineering, Nr.2, pag. 17-22, Zenica –Bosnia, 2005.
2. *Cercetări asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare la cald*, Pinca-Bretotean C., Hepuț T., Kiss I., **Tirian G.O.**, MASINSTVO- Jurnal of Mechanical Engineering, Nr.3, Vol.8, pag. 177-188, ISSN 1512-5173, 2004.

F. Volumele unor manifestări științifice internaționale din țară sau străinătate

1. *Dimensional mathematical model to optimize the processing mechanism of translational rotating motion*, C. Pinca-Bretotean, **G.O Tirian**, D.Bistriian, G. Chete, International Symposium on Advanced Engineering &Applied Management 40th Anniversary in Higher Education, 4-5 November 2010, Hunedoara, section III, pp 1-6, ISBN 978-973-0-09340-7, 2010.
2. *Considerations on thermal fatigue internal combustion engines*, C. Pinca-Bretotean, **G.O Tirian**, International Symposium on Advanced Engineering &Applied Management 40th Anniversary in Higher Education, 4-5 November 2010, Hunedoara, section III, pp 81-86, ISBN 978-973-0-09340-7, 2010.

3. *The influence of the symmetrical thermal tensions when producing thermal fatigue inside the warm rolling cylinders*, Pinca C., **Tirian G.O.**, 12th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology”, 26-29Aug.2008, Istanbul- Turcia, TMT.
4. *Determining the composite tension inside the warm rolling cylinders*, Pinca C., **Tirian G.O.**, 12th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology”, 26-29Aug., TMT 2008.
5. *Neural system for detecting cracks in the wire at the continuous casting*, **Tirian G.O.**, 12th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology”, 26-29Aug.2008, Istanbul - Turcia, TMT 2008.
6. *Researches upon thermo - mechanical stresses to the hot rolling mills cylinders*, Pinca C., **Tirian G.O.**, 11th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology” 05-09 Sept.2007, pg. 1043-1046, Hammamet - Tunisia, TMT.
7. *Posibilitates to increase the durability of the hot rolling mills cylinders*, Pinca C., **Tirian G.O.**, 11th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology” 05-09 Sept.2007, pg. 507-510, Hammamet - Tunisia.
8. *Increasing all technical performance of experimental equipment for studying metallic and semi-conducting material surface*, **Tirian G.O.**, 11th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology” 05-09 Sept.2007, pg. 575-578, Hammamet - Tunisia, TMT 2007.
9. *The action of the thermal and equivalent tension of the hot rolling mills cylinders in avoiding the growing thermal fatigue resistance*, Pinca C., **Tirian G.O.**, International Conference on Materials Science and Engineering „BRAMAT 2007”, February 22-24, ISSN 1223-9631, pg.85-90, Brasov 2007.
10. *The researches and experiments regarding the thermal and the equivalent tension from the hot rolling mill cylinders in avoiding the growing thermal fatigue resistance and the increase of service life*, Pinca C., **Tirian G.O.**, 10th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology” 11-15 Sept.2006, pg. 1419-1422, Lloret de Mar-Spania.
11. *The study of thermal of the hot rolling mill cylinders*, Pinca C., **Tirian G.O.**, Socalici A., 10th International Research/Expert Conference „ Trends in the development of machinery and associated technology” 11-15 Sept.2006, pg. 1327-1330, Lloret de Mar-Spania.
12. *Simulations and measurements of some parameters from plate-type electrostatic precipitators*, Popa G.N., Diniş C., Abrudean C., **Tirian O.**, 11th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA, vol.2, pg.382-387, Sofia-Bulgaria, 2005.

13. *Experimental analysis of the strain state in the mill rolls using the numerical simulation*, Josan A., Pinca C., **Tirian G. O.**, Dascăl A., 9th International Research/Expert Conference „Trends in the development of machinery and associated technology, pg. 145-148, Antalya-Turcia, 2005.

14. *Experimental researches under the durability of rolling mill cylinders*, Pinca C., **Tirian G.O.**, Kiss I., Josan A., 9th International Research/Expert Conference „Trends in the development of machinery and associated technology” pg. 137-140, Antalya-Turcia, 2005.

15. *Digital interface board with four 8-byte output ports*, **Tirian G.O.**, ISIRR 2003The VIIth International Symposium of Interdisciplinary Regional Research, Hungary–Serbia-Montenegro-Romania, Hunedoara, pg.732-735, Secțiunea V, 2003.

G. Volumele unor manifestări științifice naționale

1. *The action of the thermal and equivalent tension of the hot rolling mills cylinders in avoiding the growing thermal fatigue resistance*, Pinca C., **Tirian G.O.**, International Conference on Materials Science and Engineering „BRAMAT 2007”,ISSN 1223-9631, pg.85-90, Brasov 2007.

2. *Simularea unui sistem de reglare a turației utilizând mediul SCICOS*, Chioncel C. Chioncel P., **Tirian G.O.**, Gillich R., A VI-a Conferință Națională „Profesorul Dorin Pavel -fondatorul hidroenergeticii românești”Sebeș,ISBN973-8130-82-1, pg.185-188, 2006.

3. *The numerical analysis of the asymmetrical thermal tension from hot rolling mill cylinders*, Pinca C.,**Tirian G.O.**, National conference of metallurgy and materials science, ROMAT,September 28-29, pg.296-303, Bucuresti, 2006.

4. *High speed neuronal estimator for the command of the induction machine*, **Tirian G.O.**, International multidisciplinary scientific symposium “UNIVERSITARIA SIMPRO 2006” October, 13-14, pg.62-65, 2006.

5. *The study of plate-type electrostatic precipitators electrical supplies*, Popa G.N., Cunțan C.,**Tirian G.O.**,Roiban D, 7th International Symposium Young People and Multidisciplinary Research, Reșița, 2005.

6. *Modelarea caracteristicii curent tensiune pentru electrofiltrele cu placi*, Popa G., Popa I., Deaconu S., Abrudean C.,**Tirian G. O.**, A patra Conferință „Dorin Pavel Fondatorul hidroenergeticii românești”, vol.7 , pag.273-278, Sebeș, 2005.

7. *Metode de investigare a durabilității cilindrilor de laminare la cald*, Pinca-Bretotean C.,**Tirian G.O.**, NAV-MAR- EDU, XIXth „MIRCEA CEL BATRAN” Naval Academy Publishing House, CD-ROM Proceedings Constanța, ISBN 973-8303-56-7, 2005.

8. *Modeling and simulating the lead of manufacturing flexible lines as Petri networks*, Rusu N., **Tirian G.O.**, Anghel S., NAV-MAR- EDU, XIXth „MIRCEA CEL BATRAN” Naval Academy Publishing House, Constanța, CD-ROM Proceedings Constanța, ISBN 973-8303-56-7, 2005
9. *Digital Control of Robot Gripper*, **Tirian G.O.**, Scientific Conference 9th edition, Tg-Jiu, ISBN: 973-8436-99-0, vol.I, pag.371-374, 2004
10. *Contributions to the development of scientific research on the hardness of the rolling mill cylinders*, **Tirian G.O.**, Pinca-Bretotean Camelia, SCIENTIFIC CONFERENCE, 9th edition, Tg-Jiu, ISBN: 973-8436-99-0, vol.I, pag.75-80, 2004
11. *Dimensionarea liniilor trifazate magistrale de joasă tensiune, prin metoda superpoziției*, Popa I., Popa G. N., **Tirian G.O.**, A treia Conferință „Dorin Pavel Fondatorul hidroenergeticii românești”, vol.5, pag. 133 – 138, Sebeș, 2004
12. *Digital interface board with four 8-byte output ports*, **Tirian G.O.**, ISIRR 2003, The VIIth International Symposium of Interdisciplinary Regional Research, Hungary -Serbia-Montenegro-Romania, 25-26 sept. 2003, Hunedoara, pg.732-735, Secțiunea V, 2003.