

ÎMBUNĂTĂȚIREA PROCESULUI DE RĂCIRE SECUNDARĂ A SEMIFABRICATELOR DIN OȚEL TURNATE CONTINUU

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul INGINERIA MATERIALELOR
de către

Ing. Csaba-Attila Gheorghiu

Conducător științific:
Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Teodor Hepuț
Prof.univ.dr.ing. Cristian Predescu
Prof.univ.dr.ing. Nicolae Constantin
Prof.univ.dr.ing. Ana Virginia Socalici

Ziua susținerii tezei: 09.03.2018

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 2. Chimie | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 3. Energetică | 12. Ingineria sistemelor |
| 4. Ingineria Chimică | 13. Inginerie energetică |
| 5. Inginerie Civilă | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 6. Inginerie Electrică | 15. Ingineria materialelor |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 16. Inginerie și Management |
| 8. Inginerie Industrială | 17. Arhitectură |
| 9. Inginerie Mecanică | 18. Inginerie civilă și instalații |

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2018

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
Tel./fax 0256 403823
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

*Motto: Răspândește lumina, iar întunericul se va risipi de la sine.
(Erasmus)*

Cu ocazia definitivării tezei de doctorat, doresc să adresez mulțumiri tuturor celor care m-au îndrumat, sprijinit și împărtășit cunoștințe profesionale.

În primul rând doresc să îi mulțumesc conducătorului de doctorat, domnului Prof. dr. ing. Hepuț Teodor pentru îndrumarea de înalt nivel științific pe toată perioada elaborării tezei de doctorat, care a fost realizată și cu sprijinul parțial din grantul strategic POSDRU/159/1.5/S/134378 al Ministerului Educației Naționale din România, cofinanțat de Fondul Social European - Investiția în oameni, în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 - 2013.

Mulțumesc membrilor comisiei de îndrumare doamnelor Conf. dr. ing. Vîlceanu Lucia. Conf. dr. ing. Ardelean Erika și domnului Șef. lucr. ing. Puțan Vasile, pentru informațiile furnizate privind efectuarea experimentărilor, prelucrarea datelor, interpretarea rezultatelor obținute, precum și sugestiilor referitoare la elaborarea unor lucrări științifice publicate fie în reviste de specialitate la nivel național și internațional, fie prezentate la diferite simpozioane organizate pe plan național / internațional.

Aduc mulțumiri și celorlalte cadre didactice din Departamentul de Inginerie și Management pentru buna colaborare pe toată durata elaborării tezei de doctorat.

Mulțumesc domnului Conf. dr. ing. Tirian Ovidiu pentru includerea în echipa de cercetare a proiectului „Sistem inteligent de conducere a procesului de turnare continuă pentru reglarea debitului de apă la răcirea secundară” PN-II-RU-TE-2014-4-1788 Autoritatea Națională Română pentru Cercetare științifică și inovare, CNCS – UEFISCDI, asigurarea condițiilor de concepere și experimentare a sistemului IFS și verificarea rezultatelor obținute.

De asemenea aduc mulțumiri domnului Conf. dr. ing. Deaconu Sorin atât pentru includerea în colectivul de cercetare la proiectul Sisteme performante de acționare a autovehiculelor hibride și electrice cu o mașină sincronă axială cu două rotoare, un stator și un singur inventor (helsax). Programul PIII-Cooperare Europeană și Internațională, Subprogramul 3.1. Bilateral/multilateral Proiect de mobilități UPT-UEFISCDI, cât și pentru informațiile furnizate pe durata tezei de doctorat.

Doresc să mulțumesc tuturor specialiștilor și colaboratorilor din ArcelorMittal Hunedoara S.A., în mod deosebit domnilor ing. Coroiu Cornel și ing. Pop Cosmin pentru sprijinul acordat la elaborarea programului în STEP 7 și la verificarea rezultatelor cercetărilor efectuate.

Nu în ultimul rând doresc să aduc mulțumiri conducerii Universității Politehnica Timișoara, Facultății de Inginerie din Hunedoara și a Departamentului de Inginerie și Management, pentru asigurarea cadrului propice pe toată durata elaborării tezei și în final mulțumesc familiei mele pentru susținere și încurajare pe tot parcursul acestui proiect.

Timișoara, Martie 2018

Csaba-Attila Gheorghiu

ACKNOWLEDGEMENTS

Teza de doctorat a fost realizată cu sprijinul parțial din grantul strategic POSDRU/159/1.5/S/134378 al Ministerului Educației Naționale din România, cofinanțat de Fondul Social European - Investiția în oameni, în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 - 2013.

Teza de doctorat a fost susținută de un grant al Autorității Naționale Române pentru Cercetare științifică și inovare, CNCS - UEFISCDI, număr proiect PN-II-RU-TE-2014-4-1788.

Proiectul Sisteme performante de acționare a autovehiculelor hibride și electrice cu o mașină sincronă axială cu două rotoare, un stator și un singur inventor (helsax). Programul PIII-Cooperare Europeană și Internațională, Subprogramul 3.1. Bilateral/multilateral Proiect de mobilități UPT-UEFISCDI.

Gheorghiu, Csaba-Attila

Îmbunătățirea procesului de răcire secundară a semifabricatelor din oțel turnate continuu

Teze de doctorat ale UPT, Seria 15, Nr. 25, Editura Politehnica, 2018, 190 pagini, 150 figuri, 27 tabele.

ISSN: 2285-1720

ISSN-L: 2285-1720

ISBN: 978-606-35-0212-5

Cuvinte cheie:

Oțel, turnare, continuă, răcire, secundară, fuzzy, debit, apă

Rezumat

Plecând de la structura reală a unui sistem de conducere pentru o instalație modernă de turnare continuă, s-a propus o soluție eficientă, care permite modificarea în timp real a repartiției debitului de apă pe cele 3 zone de răcire secundară. Sistemul propus a fost testat și validat în cadrul determinărilor experimentale pe un stand de laborator precum și pe instalația de turnare continuă existentă la ArcelorMittal Hunedoara S.A.

Pentru a atinge scopul propus s-a realizat un stand experimental dedicat controlului și optimizării debitului apei din zona de răcire secundară a turnării continue a oțelului folosind reguli FUZZY.

Controlul și optimizarea debitului apei de răcire din zona de răcire secundară a turnării continue, sunt importante pentru buna desfășurare a procesului tehnologic, în vederea obținerii semifabricatelor de calitate.

CUPRINS

| | |
|---|----|
| Listă figuri | 9 |
| Listă tabele | 13 |
| Listă abrevieri | 14 |
| 1.Plan de desfășurare a experimentărilor și cercetărilor..... | 15 |
| 1.1.Descrierea esențializată a obiectului cercetării | 15 |
| 1.2.Strategia cercetării | 16 |
| Partea I | 19 |
| 2.Analiza tehnologică privind elaborarea în cuptoare electrice cu arc | 21 |
| 2.1.Elaborarea oțelului, scurtă descriere a procesului, fluxul tehnologic | 21 |
| 2.1.1.Considerații tehnologice..... | 21 |
| 2.1.2.Elaborarea oțelului în cuptorul electric cu arc tip EBT | 21 |
| 2.1.2.1.Considerații constructive la cuptorul electric cu arc tip EBT | 21 |
| 2.1.2.2.Procesul tehnologic de elaborare a oțelului în cuptorul electric de tip EBT | 23 |
| 2.2.Tratamentul secundar al oțelului în oala de turnare..... | 27 |
| 2.2.1.Considerații tehnologice..... | 27 |
| 2.2.2.Instalația LF (Ladle-Furnace)..... | 29 |
| 2.2.2.1.Construcția instalației LF..... | 29 |
| 2.2.2.2.Funcționarea instalației LF | 30 |
| 2.2.2.3.Efecte tehnico – economice..... | 31 |
| 2.2.3.Instalația VD (vidare – degazare)..... | 32 |
| 2.2.3.1.Considerații tehnologice..... | 32 |
| 2.2.3.2.Descrierea fluxului tehnologic de vidare | 33 |
| 2.2.3.3.Efecte tehnico – economice..... | 34 |
| 2.3.Analiza procesului de turnare continuă a oțelului | 34 |
| 2.3.1.Generalități | 34 |
| 2.3.2.Tipuri de instalații | 35 |
| 2.3.3.Elementele instalației de turnare continuă cu fir curbat | 35 |
| 2.3.3.1.Oala de turnare..... | 36 |
| 2.3.3.2.Distribuitoarul..... | 38 |
| 2.3.3.3.Tubul de imersie..... | 38 |
| 2.3.3.4.Cristalizoarele | 39 |
| 2.3.3.5.Zona de răcire secundară, elemente de susținere, extragere și îndreptare...45 | |
| 2.3.3.6.Turnarea secvențială..... | 48 |
| 2.4.Concluzii | 49 |
| 3.Sisteme Fuzzy în procesul turnării continue | 51 |
| 3.1.Generalități | 51 |
| 3.2.Principiul reglării Fuzzy | 52 |

| | |
|---|----|
| 3.3.Logica Fuzzy | 52 |
| 3.3.1.Introducere | 52 |
| 3.3.2.Noțiuni de bază | 53 |
| 3.3.2.1.Funcții de apartenență | 53 |
| 3.3.2.2.Deduceri Fuzzy (inferențe) | 55 |
| 3.3.2.3.Reguli de inferență generale..... | 55 |
| 3.3.2.4.Defuzificare | 57 |
| 3.4.Aplicarea logicii Fuzzy în reglare | 58 |
| 3.4.1.Generalități | 58 |
| 3.4.2.Definirea prin funcții de apartenență a variabilelor de intrare și de ieșire..... | 59 |
| 3.4.3.Inferența..... | 61 |
| 3.4.3.1.Metode de descriere a inferenței | 61 |
| 3.4.3.2.Metode de inferență utilizate în reglarea Fuzzy..... | 62 |
| 3.5.Structuri complexe de conducere bazate pe logica Fuzzy | 62 |
| 3.6.Concluzii | 65 |
| Partea a II-a | 67 |
| 4.Cercetări privind îmbunătățirea calității suprafeței semifabricatelor de oțel .. | 69 |
| 4.1.Influența lungimii cristalizorului asupra grosimii crustei | 69 |
| 4.1.1.Considerații tehnologice..... | 69 |
| 4.1.2.Prelucrarea datelor. Rezultate. Analiză tehnologică | 69 |
| 4.1.3.Concluzii | 71 |
| 4.2.Analiza factorilor de influență asupra vâscozității zgurilor de lubrifiere | 71 |
| 4.2.1.Considerații tehnologice..... | 71 |
| 4.2.2.Cercetări și rezultate | 72 |
| 4.2.3.Analiza tehnologică a rezultatelor obținute | 75 |
| 4.3.Tensiune superficială..... | 76 |
| 4.3.1.Considerații tehnologice..... | 76 |
| 4.3.2.Cercetări și rezultate | 76 |
| 4.3.3.Concluzii | 79 |
| 4.4.Influenta parametrilor de răcire asupra vitezei de turnare continuă | 80 |
| 4.4.1.Cadrul experimental..... | 80 |
| 4.4.2.Prelucrarea datelor. Rezultate | 80 |
| 4.4.3.Analiza tehnologică a rezultatelor obținute | 89 |
| 4.5.Concluzii | 89 |
| 5.Sistem Fuzzy pentru controlul debitului apei pentru răcirea secundară..... | 91 |
| 5.1.Generalități | 92 |
| 5.2.Structura sistemului Fuzzy pentru controlul debitului apei de răcire..... | 92 |
| 5.3.Proiectarea IFS | 94 |
| 5.3.1.Proiectarea IFS ZONA 1 | 95 |
| 5.3.2.Proiectarea IFS ZONA 2 | 99 |

| | |
|---|-----|
| 5.3.3.Proiectarea IFS ZONA 3 | 102 |
| 5.4.Simularea funcționării sistemului de decizie Fuzzy | 106 |
| 5.5.Sistemul de decizie Fuzzy cu un singur parametru variabil | 114 |
| 5.6.Concluzii | 116 |
| 6.Controlul debitului apei cu ajutorul unui PLC în răcirea secundară a oțelului.118 | |
| 6.2.Standul PLC..... | 118 |
| 6.2.1.Standul PLC – realizarea fizică – etapa hardware..... | 118 |
| 6.2.2.Standul PLC – etapa software..... | 126 |
| 6.3.Cercetări – metodologie și rezultate obținute | 133 |
| 6.3.1.Metodologia de cercetare | 133 |
| 6.3.2.Rezultate experimentale – interpretare | 135 |
| 6.4.Concluzii | 143 |
| Partea a III-a | 145 |
| 7.Concluzii finale recapitulative, contribuții originale, direcții de continuare | 147 |
| 7.1.Concluzii finale recapitulative | 147 |
| 7.2.Contribuții originale | 149 |
| 7.3.Direcții de continuare a cercetărilor | 150 |
| Diseminarea rezultatelor | 151 |
| Bibliografie | 153 |
| 8.Anexe | 157 |
| Anexa 1 Codul PLC pentru controlul Fuzzy | 159 |
| Anexa 2 Programul OB1 în Step 7 | 163 |
| Anexa 3 Variabilele folosite în Step 7 | 164 |
| Anexa 4 Programul FC2 în Step 7..... | 165 |
| Anexa 5 Variabilele folosite în WinCC..... | 174 |
| Anexa 6 Date simulare condiții de laborator..... | 175 |
| Anexa 7 Date sistem Fuzzy ϕ 180 mm | 177 |
| Anexa 8 Date sistem Fuzzy ϕ 200 mm | 179 |
| Anexa 9 Date sistem Fuzzy ϕ 250 mm | 181 |
| Anexa 10 Date sistem Clasic ϕ 180 mm..... | 183 |
| Anexa 11 Date sistem Clasic ϕ 200 mm..... | 183 |
| Anexa 12 Date sistem Clasic ϕ 250 mm..... | 184 |
| Anexa 13 Imagini din timpul experimentărilor..... | 184 |

Listă figuri

- Figura 1.1 Modelul de intrări - ieșiri al obiectului cercetării
- Figura 2.1 Cuptorul electric cu arc de tip EBT
- Figura 2.2 Fazele de elaborare în cuptorul electric E.B.T. Topirea în cuptorul electric cu arc
- Figura 2.3 Schema procesului tehnologic de elaborare
- Figura 2.4 Instalația de tratament secundar de tip LF
- Figura 2.5 Schema procesului tehnologic de tratare în oala de turnare (LF)
- Figura 2.6 Instalație VD vedere generală și conducere automată
- Figura 2.7 Tipurile de turnare continuă a oțelului
- Figura 2.8 Orificii de turnare imersate de diverse tipuri
- Figura 2.9 Alimentarea cristalizorului din distribuitor
- Figura 2.10 Creșterea grosimii crustei solidificate, funcție de viteza de turnare
- Figura 2.11 Cristalizor compact
- Figura 2.12 Oscilația cristalizorului
- Figura 2.13 Zona de răcire secundară
- Figura 2.14 Creșterea grosimii crustei, prin stropire cu apă
- Figura 3.1 Configurația unui regulator Fuzzy
- Figura 3.2 Schema de principiu a unui regulator Fuzzy
- Figura 3.3 Forme ale funcțiilor de apartenență
- Figura 3.4 Funcțiile de apartenență simetrice
- Figura 3.5 Funcțiile de apartenență asimetrice
- Figura 3.6 Funcții de apartenență cuantificate
- Figura 3.7 Sistem de conducere pentru selectarea intrării
- Figura 3.8 Sistem de conducere cu eroare după ieșire
- Figura 3.9 Sisteme pentru controlul parametrilor proceselor
- Figura 3.10 Sisteme Fuzzy pentru alegerea celui mai bun compensator
- Figura 3.11 Conducere Fuzzy cu indice multiplu de performanță
- Figura 3.12 Modelul sistemului Fuzzy
- Figura 3.13 Sisteme de conducere Fuzzy de nivel ridicată
- Figura 4.1 Îndepărtarea căldurii din cristalizor
- Figura 4.2 Variația grosimii crustei firului în funcție de lungimea cristalizorului
- Figura 4.3 Influența lungimii cristalizorului și vitezei asupra grosimii semifabricatului
- Figura 4.4 Corelația $\eta=f(\text{Al}_2\text{O}_3)$
- Figura 4.5 Corelația $\eta=f(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$
- Figura 4.6 Corelația $\eta=f(\text{Temperatura})$
- Figura 4.7 Corelația $\eta=f(\text{MgO})$
- Figura 4.8 Corelația $\eta=f(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO})$
- Figura 4.9 Corelația $\eta=f(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$
- Figura 4.10 Variația vâscozității zgurii unguente în funcție de temperatură
- Figura 4.11 Variația vâscozității zgurii unguente în funcție de temperatură și CaO/SiO_2
- Figura 4.12 Variația vâscozității zgurii unguente în funcție de $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ și CaO/SiO_2
- Figura 4.13 $\sigma=f(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2)$ – corelație de grad 2, ecuația 4.8; (a) – suprafața de regresie

- Figura 4.14 $\sigma=f(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO})$ – corelație de gradul 2, ecuația 4.9; (a) – suprafața de regresie
- Figura 4.15 $\sigma=f(\text{CaO}, \text{SiO}_2)$ – corelație de gradul 2, ecuația 4.10; (a) – suprafața de regresie
- Figura 4.16 $\sigma=f(\text{Al}_2\text{O}_3, B)$ – corelație de gradul 2; (a) – suprafața de regresie
- Figura 4.17 $\sigma=f(\text{CaO}, B)$ – corelație de gradul 2; (a) – suprafața de regresie
- Figura 4.18 $\sigma=f(\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3)$ – corelație de gradul 2; (a) – suprafața de regresie
- Figura 4.19 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 1A})$ Ec.1
- Figura 4.20 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 1A})$ Ec.2
- Figura 4.21 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 1A})$ Ec.3
- Figura 4.22 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 1B})$ Ec.1
- Figura 4.23 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 1B})$ Ec.2
- Figura 4.24 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 1B})$ Ec.3
- Figura 4.25 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 2})$ Ec.1
- Figura 4.26 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 2})$ Ec.2
- Figura 4.27 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 2})$ Ec.3
- Figura 4.28 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 3})$ Ec.1
- Figura 4.29 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 3})$ Ec.2
- Figura 4.30 Viteza de turnare= $f(\text{Temperatura oțelului la turnare}, \text{Debitul apei în zona 3})$ Ec.3
- Figura 5.1 Răcirea primară și secundară din turnarea continuă a oțelului
- Figura 5.2 Schema bloc a ansamblului IFS
- Figura 5.3 Schema bloc a sistemului de decizie Fuzzy
- Figura 5.4 Structura sistemului de control
- Figura 5.5 Schema bloc IFS pentru ZONA 1
- Figura 5.6 Funcții de apartenență „Viteza de turnare v_1 ”
- Figura 5.7 Funcții de apartenență „Temperatură T_1 ”
- Figura 5.8 Funcții de apartenență „Debit apă q_1 ”
- Figura 5.9 Funcții de apartenență „Corecție debit Δq_1 ”
- Figura 5.10 Funcții de apartenență „Corecție viteză Δv_1 ”
- Figura 5.11 Funcții de apartenență „Risc tehnologic RT_1 ”
- Figura 5.12 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 1
- Figura 5.13 Schema bloc a IFS ZONA 2
- Figura 5.14 Funcții de apartenență „Viteza de turnare v_2 ”
- Figura 5.15 Funcții de apartenență „Temperatură T_2 ”
- Figura 5.16 Funcții de apartenență „Debit apă q_2 ”
- Figura 5.17 Funcții de apartenență „Corecție debit Δq_2 ”
- Figura 5.18 Funcții de apartenență „Corecție viteză Δv_2 ”
- Figura 5.19 Funcții de apartenență „Risc tehnologic RT_2 ”
- Figura 5.20 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 2

- Figura 5.21 Schema bloc a IFS ZONA 3
Figura 5.22 Funcții de apartenență „Viteza de turnare v_3 ”
Figura 5.23 Funcții de apartenență „Temperatura T_3 ”
Figura 5.24 Funcții de apartenență „Debit apă q_3 ”
Figura 5.25 Funcții de apartenență „Corecție debit Δq_3 ”
Figura 5.26 Funcții de apartenență „Corecție viteză Δv_3 ”
Figura 5.27 Funcții de apartenență „Risc tehnologic RT_3 ”
Figura 5.28 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 3
Figura 5.29 Implementarea în Simulink a IFS Zona 1
Figura 5.30 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS Zona 1
Figura 5.31 Corecțiile realizate de către IFS Zona 1
Figura 5.32 Implementarea în Simulink a IFS Zona 2
Figura 5.33 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS Zona 2
Figura 5.34 Corecțiile realizate de către IFS Zona 2
Figura 5.35 Implementarea în Simulink a IFS Zona 3
Figura 5.36 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS Zona 3
Figura 5.37 Corecțiile realizate de către IFS Zona 3
Figura 5.38 Schema bloc IFS ZONA 1,2,3
Figura 5.39 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 1,2,3
Figura 5.40 Implementarea în Simulink a IFS ZONA 1,2,3
Figura 5.41 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS ZONA 1,2,3
Figura 5.42 Corecțiile realizate de către IFS ZONA 1,2,3
Figura 5.43 Schema bloc IFS ZONA 1,2,3 Optimizat
Figura 5.44 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 1,2,3 Optimizat
Figura 5.45 Implementarea în Simulink a IFS ZONA 1,2,3 Optimizat
Figura 5.46 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS ZONA 1,2,3 Optimizat
Figura 5.47 Corecțiile realizate de către IFS ZONA 1,2,3 Optimizat
Figura 5.48 Schema bloc IFS cu un singur parametru variabil
Figura 5.49 Funcții de apartenență pentru Diferența de temperatură
Figura 5.50 Funcții de apartenență pentru Viteza de turnare
Figura 5.51 Funcții de apartenență pentru Semnalul vanei
Figura 5.52 Tabela de inferență pentru IFS cu o singură intrare
Figura 5.53 Ajustarea vitezei de turnare și a vanei în funcție de diferența de temperatură
- Figura 6.1 Parametrii turnării pentru tipul de produs
Figura 6.2 Interfață control viteză
Figura 6.3 Pompă de apă submersibilă Sumo 2
Figura 6.4 Element Danfoss AB-QM DN10-250
Figura 6.5 Vană comandată electric
Figura 6.6 Debitmetru IFM electronic SM6004
Figura 6.7 Releu Finder 55.34
Figura 6.8 Sursă de alimentare SDR-120-24
Figura 6.9 Automat programabil SIMATIC S300
Figura 6.10 Potențiometrul de reglare a temperaturii – butoane pornire/oprire
Figura 6.11 Rezervor alimentare apă – conducte flexibile
Figura 6.12 Vederea de sus a standului experimental
Figura 6.13 Conexiunile PLC-ului
Figura 6.14 Reprezentarea schematică a rack-ului real
Figura 6.15 Schema logică a modului clasic de reglare a debitului de apă
Figura 6.16 Schema logică a blocului funcțional FC2
Figura 6.17 Blocul funcțional FC2

- Figura 6.18 Logica Fuzzy
- Figura 6.19 Intrări / Ieșiri Fuzzy
- Figura 6.20 Reguli Fuzzy
- Figura 6.21 Conexiune PLC
- Figura 6.22 Interfața principală SCADA
- Figura 6.23 Interfața SCADA – controlul clasic / controlul Fuzzy
- Figura 6.24 Interfața SCADA vizualizare grafice metoda clasică
- Figura 6.25 Interfața SCADA vizualizare grafice metoda Fuzzy
- Figura 6.26 Poziția termocuplului ceramic în distribuitor
- Figura 6.27 Termocuplu utilizat în cadrul experimentărilor
- Figura 6.28 Diferența de temperatură - ϕ 180 mm
- Figura 6.29 Viteza de turnare - ϕ 180 mm
- Figura 6.30 Comanda clapetei - ϕ 180 mm
- Figura 6.31 Debitul apei - ϕ 180 mm
- Figura 6.32 Diferența de temperatură - ϕ 200 mm
- Figura 6.33 Viteza de turnare - ϕ 200 mm
- Figura 6.34 Comanda clapetei - ϕ 200 mm
- Figura 6.35 Debitul apei - ϕ 200 mm
- Figura 6.36 Diferența de temperatură - ϕ 250 mm
- Figura 6.37 Viteza de turnare - ϕ 250 mm
- Figura 6.38 Comanda clapetei - ϕ 250 mm
- Figura 6.39 Debitul apei - ϕ 250 mm

Listă tabele

| | |
|--------------|---|
| Tabelul 2.1 | Caracteristicile tehnice ale cuptorului electric tip EBT |
| Tabelul 2.2 | Parametri medii de exploatare ai cuptorului electric tip EBT |
| Tabelul 2.3 | Durate de elaborare la cuptorul EBT |
| Tabelul 2.4 | Componența și compoziția zgurii de la afinare |
| Tabelul 2.5 | Durata fazelor tehnologice după evacuare, min |
| Tabelul 2.6 | Temperatura oțelului la procesarea în oala de turnare, °C |
| Tabelul 3.1 | Criteriile pentru metodele de defuzificare |
| Tabelul 3.2 | Exemplu ipotetic cu trei variabile de intrare $x_{1,2,3}$ |
| Tabelul 5.1 | Valorile reale și tendința pentru viteza de turnare v_1 |
| Tabelul 5.2 | Valorile reale și tendința pentru temperatura oțelului |
| Tabelul 5.3 | Valorile reale și tendința pentru debitul apei |
| Tabelul 5.4 | Valorile reale și tendința pentru corecția debitul apei |
| Tabelul 5.5 | Valorile reale și tendința pentru corecția vitezei |
| Tabelul 5.6 | Valorile reale și tendința pentru riscul tehnologic |
| Tabelul 5.7 | Valorile reale și tendința pentru viteza de turnare |
| Tabelul 5.8 | Valorile reale și tendința pentru temperatura otelului |
| Tabelul 5.9 | Valorile reale și tendința pentru debitul apei |
| Tabelul 5.10 | Valorile reale și tendința pentru corecția debitul apei de răcire |
| Tabelul 5.11 | Valorile reale și tendința pentru corecția vitezei |
| Tabelul 5.12 | Valorile reale și tendința pentru riscul tehnologic |
| Tabelul 5.13 | Valorile reale și tendința pentru viteza de turnare |
| Tabelul 5.14 | Valorile reale și tendința pentru temperatura otelului |
| Tabelul 5.15 | Valorile reale și tendința pentru debitul apei |
| Tabelul 5.16 | Valorile reale și tendința pentru corecția debitul apei de răcire |
| Tabelul 5.17 | Valorile reale și tendința pentru corecția vitezei |
| Tabelul 5.18 | Valorile reale și tendința pentru riscul tehnologic |
| Tabelul 6.1 | Compoziția chimică pentru mărcile 20MN10 |

Listă abrevieri

| | |
|-----------------------|--|
| LF | - Ladle Furnace |
| EBT | - Excentric Bottom Tapping |
| LD | - Lincz-Donawitz |
| VD | - Vidare Degazare (Vacuum Degassing) |
| VOD | - Vacuum Oxygen Decarburization |
| VODK | - Vacuum Oxygen Decarburization Konverter |
| VAD | - Vacuum Arc Degassing |
| ZF | - zgură furnal |
| MP | - materiale pulverulente |
| CEA | - Cuptor Electric cu Arc |
| EBT | - Excentric Bottom Taping |
| OE | - Oțelărie Electrică |
| OSM | - Oțelărie Siemens Martin |
| AMHD | - ArcelorMittal Hunedoara S.A. |
| v₁ | - viteza de turnare în zona de răcire 1 |
| q₁ | - debitul apei de răcire în zona de răcire 1 |
| T₁ | - temperatura oțelului în zona de răcire 1 |
| RT₁ | - riscul tehnologic din zona de răcire 1 |
| v₂ | - viteza de turnare în zona de răcire 2 |
| q₂ | - debitul apei de răcire în zona de răcire 2 |
| T₂ | - temperatura oțelului în zona de răcire 2 |
| RT₂ | - riscul tehnologic din zona de răcire 2 |
| v₃ | - viteza de turnare în zona de răcire 3 |
| q₃ | - debitul apei de răcire în zona de răcire 3 |
| T₃ | - temperatura oțelului în zona de răcire 3 |
| RT₃ | - riscul tehnologic din zona de răcire 3 |
| IFS | - Intelligent Fuzzy System |
| PLC | - Controler Logic Programabil |

1. PLAN DE DESFĂȘURARE A EXPERIMENTĂRILOR ȘI CERCETĂRILOR

1.1. Descrierea esențializată a obiectului cercetării

Tema tezei de doctorat este de actualitate și se referă la realizarea unor studii și cercetări privind elaborarea oțelurilor în cuptoare electrice cu arc și turnare continuă, în vederea îmbunătățirii calității semifabricatelor turnate continuu. Cercetările au avut în vedere procesele fizico-chimice ce au loc la tratarea oțelului în oala de turnare și în mod deosebit la turnarea continuă.

Procesul de turnare continuă are drept scop turnarea oțelului sub formă de semifabricate de diferite secțiuni: rotund, pătrat, dreptunghiular precum și de formă apropiată de secțiune finală. Comparativ cu turnarea clasică sub forma de lingouri, în cazul turnării continue, scoaterea de metal bun este de minim 96% când se toarnă o singură șarjă iar la turnarea secvențială, când se toarnă fără întreruperea procesului mai multe șarje, scoaterea depășește de cele mai multe ori 99%, comparativ cu turnarea clasică, unde în medie scoaterea este cuprinsă între 82-85%, această tehnologie fiind net superioară. Pe lângă acest avantaj de necontestat, trebuie luat în vedere faptul că se reduc substanțial investițiile pentru: hala blooming/slebing, cuptoarele adânci și laminoarele degrositoare bluming/slebing, acestea fiind scoase din fluxul tehnologic. De asemenea, se reduc consumurile de energie termică nemaifiind necesară încălzirea lingourilor în cuptoarele adânci, energie electrică pentru acționarea laminoarelor și evident consumul de manoperă. Principalii parametri care influențează procesul de turnare a oțelului, respectiv calitatea produselor obținute atât la turnarea clasică, cât și la cea continuă, sunt temperatura oțelului și viteza de turnare. Temperatura de turnare poate fi controlată mai ușor în cazul turnării clasice decât la turnarea continuă. Pentru turnarea continuă s-au studiat factorii care influențează temperatura de turnare a oțelului din oala de turnare în distribuitor și din distribuitor în cristalizor. La turnarea continuă fiind obligatorie barbotarea oțelului, s-a studiat și procesul de tratare a oțelului în instalațiile cu aport de căldura (L.F. – oala cuptor și VD – vidare degazare). În aceste instalații se procesează oțelul evacuat din cuptor, în sensul că se barbotează cu gaz inert, se rafinează cu zguri sintetice și se videază. De asemenea, se finalizează dezoxidarea prin precipitare și se reglează temperatura în vederea încadrării în limitele prevăzute de instrucțiunile tehnologice.

Dezvoltarea industrială a oricărei țări necesită în permanență oțel de calitate care să răspundă cerințelor impuse de diverși beneficiari. Introducerea în practica fabricației oțelului a așa numitei Metalurgia în oală și Turnarea Continua au asigurat în bună măsură creșterea calității oțelurilor, creșterea productivității și reducerea consumurilor specifice de metal, energie, materiale secundare etc..

Referitor la procesul de turnare continuă, din datele prezentate în literatura de specialitate [2,3,4,7,8], rezultă că neîncadrarea temperaturii de turnare în limitele prevăzute, mai ales, limita inferioară, poate conduce la dereglarea procesului, putând ajunge până la obturarea distribuitorului sau cristalizorului. Turnarea oțelului cu temperatura la limita superioară și necorelarea cu viteza de turnare cu parametrii răcirii poate conduce la ruperea firului (crusta de solidificare nu are rezistență suficientă).

Literatura de specialitate [3,5,7,8], indică faptul că trebuie avut în vedere traseul pe care îl efectuează oala de turnare, de la instalația de procesare în oală

până la turnul rotitor, respectiv curgerea oțelului în distribuitor, în funcție de acesta se pot determina pierderile de căldură, respectiv reducerea temperaturii oțelului.

Calitatea semifabricatelor este foarte mult influențată de temperatura de turnare, viteza de turnare și regimul de răcire primară și secundară (debitul apei de răcire, viteza de răcire). Prin acest studiu se clarifică problemele legate de temperatura oțelului pe traseul instalația de procesare tip LF – TC.

Pentru îmbunătățirea calității semifabricatelor de oțel turnate, reducerea consumurilor de energie, materie prime și auxiliare, electrozi materiale refractare, metal este oportună continuarea cercetărilor în acest domeniu.

Cercetările efectuate și prezentate în cadrul tezei de doctorat au avut obiectiv îmbunătățirea calității semifabricatelor de oțel turnate continuu, acționând asupra principalilor parametri ai turnării continue.

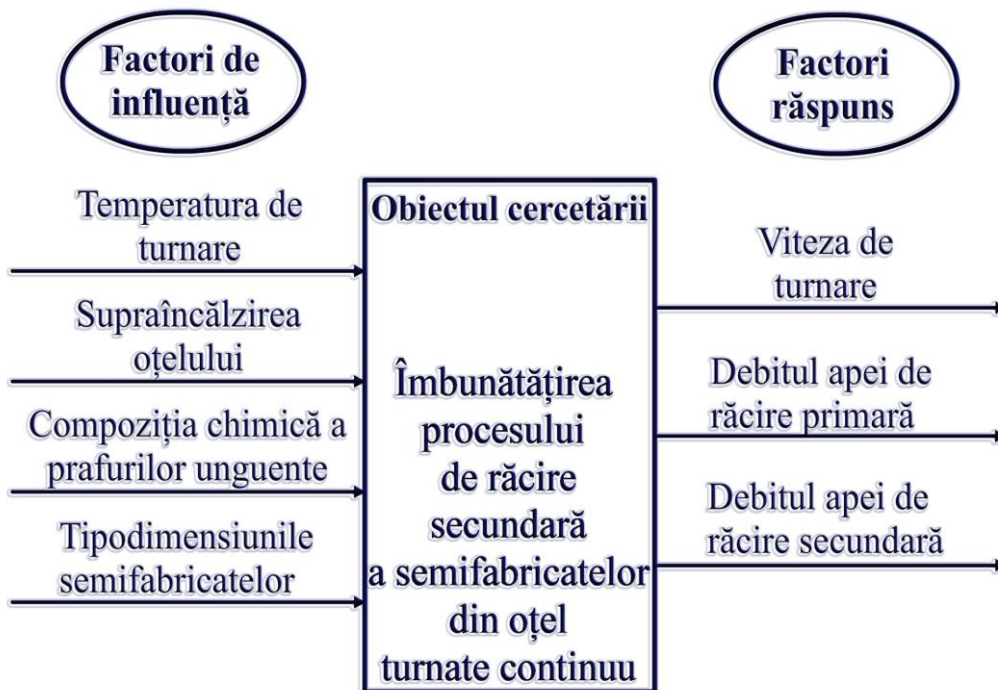


Fig. 1.1. Modelul de intrări - ieșiri al obiectului cercetării

1.2. Strategia cercetării

Strategia de cercetare aplicată în vederea elaborării tezei de doctorat a constat în parcurgerea următoarelor etape:

- studiu bibliografic din literatura de specialitate, prelucrarea informațiilor și corelarea acestora cu cele obținute din practica elaborării și turnării oțelului;
- cercetări privind utilizarea în industrie a sistemelor Fuzzy;

- cercetări și experimentări industriale efectuate pe un flux tehnologic de procesare în oală a oțelului și turnare continuă;
- contribuții originale și dezvoltări ulterioare.

Teza de doctorat este structurată pe 8 capitole, cuprinse în trei părți:

Capitolul 1. Plan de desfășurare a experimentărilor și cercetărilor;

Partea I Studiu din literatura de specialitate privind elaborarea și turnarea continuă a oțelului:

- **Capitolul 2.** Procesul de elaborare și turnare a oțelului în cuptoare electrice cu arc de mare putere tip EBT și turnarea continuă.
- **Capitolul 3.** Conducerea procesului de turnare continuă a oțelului pe baza sistemului inteligent Fuzzy.

Partea a II-a Cercetări și experimentări privind conducerea procesului de turnare continuă a oțelului utilizând sistemele Fuzzy:

- **Capitolul 4.** Experimentări și rezultate privind procesele fizico – chimice care au loc în cristalizor, la interfața crustă solidificată–cristalizor perete interior.
- **Capitolul 5.** Stabilirea regulilor de lucru pentru sistemele inteligente Fuzzy utilizate la turnarea continuă a oțelului.
- **Capitolul 6.** Experimentări și rezultate obținute utilizând sistemul inteligent Fuzzy la turnarea continuă a oțelului.

Partea a III-a Concluzii finale. Contribuții originale. Diseminarea rezultatelor:

- **Capitolul 7.** Concluzii finale. Contribuții originale. Diseminarea rezultatelor și mod de implementare a acestora în practică.
- **Capitolul 8.** Anexe.

PARTEA I

STUDIU DIN LITERATURA DE SPECIALITATE PRIVIND ELABORAREA ȘI TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI

2. ANALIZA TEHNOLOGICĂ PRIVIND ELABORAREA ÎN CUPTOARE ELECTRICE CU ARC ȘI TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI

2.1. Elaborarea oțelului, scurtă descriere a procesului, fluxul tehnologic și instalații de procesare în oală

2.1.1. Considerații tehnologice

În epoca industrializării societății mondiale, tehnologiile de fabricație a oțelurilor, considerat ca cel mai important material metalic în construcții de mașini, utilaje, echipamente industriale, construcții metalice și infrastructură, au avut drept suport tehnic, în principal următoarele tipuri de agregate termice: convertizoare cu aer (Bessemer și Thomas), cuptoarele Siemens - Martin, cuptoare electrice cu arc, cuptoare electrice cu inducție și convertizoare cu oxigen. După intrarea în funcțiune a convertizoarelor cu oxigen (LD, Lincz-Donawitz) în 1952 s-a redus simțitor ponderea oțelului elaborat în cuptoarele Siemens Martin, astfel încât în prezent aceasta este sub 1% [1]. Cuptoarele cu căptușeală bazică sunt cele care au permis dezvoltarea siderurgiei, deoarece comparativ cu cele cu căptușeală acidă, este posibilă defosforarea și desulfurarea băii metalice (restricții mai puțin severe privitor la încărcătura metalică)

În aceeași perioadă s-a introdus în practică turnarea continuă, astfel încât în prezent ponderea acesteia depășește 95% din total de oțel turnat (continuu, sub presiune și lingou) [1,2,5,6]. În prezent se toarnă oțel sub formă de lingou destinat prelucrării plastice prin forjare, precum și o gamă redusă de oțeluri aliate la care apar probleme calitative deosebite la turnarea continuă (ex. oțelurile pentru scule).

În ceea ce privește România ca urmare a restructurării economice care s-a produs după 1989, cele 4 oțelării Siemens - Martin au fost dezafectate, ultima O.S.M.II Hunedoara în iunie 1999. În aceste noi condiții au rămas ca agregate de bază pentru elaborarea oțelului, convertizoarele cu oxigen la ArcelorMittal Galați și cuptoarele electrice cu arc la ArcelorMittal Hunedoara [2,3,5,6,8].

Ca urmare a privatizării industriei siderurgice românești, în oțelăriile electrice care au rămas funcționale după restructurarea economică, au fost instalate cuptoare electrice cu arc moderne tip EBT (Excentric Bottom Tapping), echipate cu transformatoare de mare și foarte mare putere. De asemenea aceste oțelării au fost echipate cu instalații de turnare continuă și ca urmare acestea pot fi considerate oțelării moderne [6,7,8,9,10].

2.1.2. Elaborarea oțelului în cuptorul electric cu arc tip EBT

2.1.2.1. Considerații constructive la cuptorul electric cu arc tip EBT

Cuptorul electric cu arc, ca urmare a perfecționărilor aduse din punct de vedere constructiv și tehnologic este preferat la elaborarea oțelului care urmează a fi turnat continuu. Se are astfel în vedere că se pot elabora atât oțeluri carbon obișnuite sau oțeluri slab aliate, cât și oțeluri înalt aliate, aceste cuptoare

construindu-se în limite foarte largi de capacitate [2,3,6,10,12].

Acest tip de cuptor este prevăzut cu o instalație de desprăfuire a gazelor arse cu saci, concentrația de pulberi realizată la emisie având concentrații scăzute de sub 20 mg/m^3 . Agregat tipic pentru topire, cuptorul electric cu arc este alimentat cu curent electric trifazat prin trei electrozi verticali, confecționați din grafit. Arcul electric, se formează între cei trei electrozi prin încălzirea metalică [2,3,6,14].

Transformarea cuptorului electric în "mașină de topire" și cuplarea acestuia cu instalații de tratament în oală, a permis pe de o parte, dezvoltarea așa numitei "Metalurgii în Oală", a impus testarea și implementarea de soluții pentru evacuarea din cuptor a oțelului fără zgură, condiție esențială la tratamentul în oală.

Evacuarea fără zgură și într-un timp cât mai scurt au fost principalele deziderate care au condus la ideea evacuării oțelului din cuptor pe la partea inferioară a vetrei.

Acest sistem satisface principalele necesități tehnologice, permițând întreruperea controlată a procesului de evacuare prin înclinarea cuptorului [2,3,6].

Orificiul de evacuare, care în ideea proiectanților de la Witten era amplasat exact în centrul vetrei, a fost deplasat mai aproape de peretele cuptorului, caracterul excentric fiind conferit de abaterea de 600 – 800 mm față de centrul vetrei (figura 2.1) [2,3,6,14].

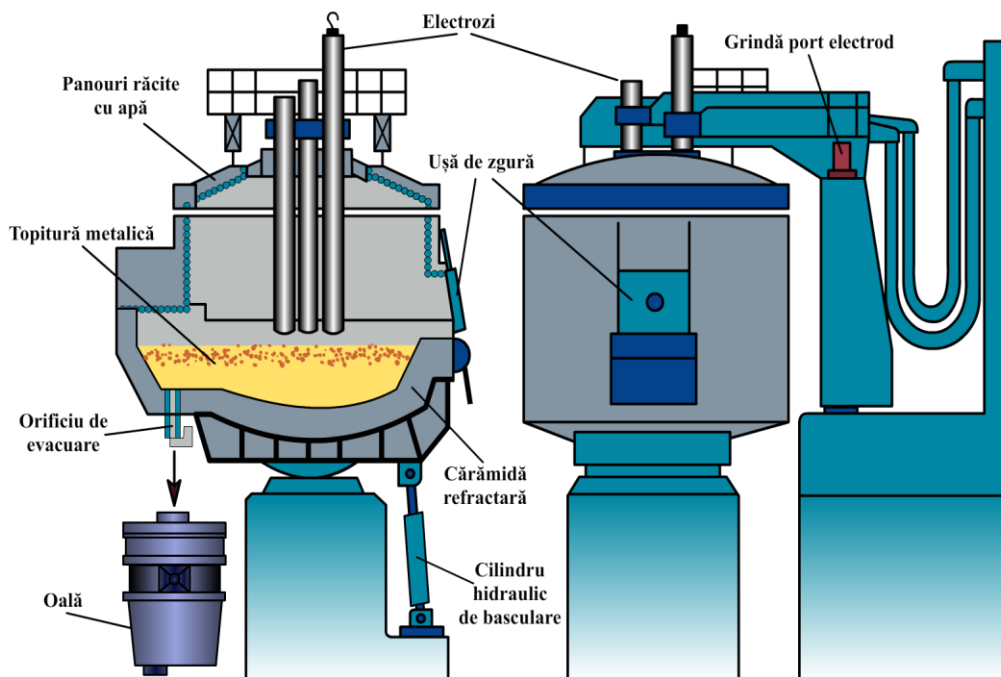


Figura 2.1. Cuptorul electric cu arc de tip EBT

Înainte de încărcare, orificiul de evacuare este umplut cu material refractar uscat, care se sintetizează în timpul procesului de topire în contact cu oțelul lichid. Când orificiul este deschis pentru evacuare, materialul de umplere cade, permițând curgerea oțelului [2,3,6,16].

Pentru a preîntâmpina antrenarea zgurii, cuptorul se înclină în timpul deșarjării la 4-6°, baia remanentă (10-15% din totalul de oțel lichid) permițând

reținerea integrală a zgurii.

După deșarjare, cuptorul este adus în poziția normală, se curăță orificiul cu o lance de oxigen, se închide clapeta sau sertarul, se umple cu masă refractară și se începe reîncărcarea. Toate aceste operațiuni durează circa 3 minute.

Caracteristicile tehnice ale unui cuptor EBT sunt prezentate în tabelul 2.1 respectiv în tabelul 2.2 unde se evidențiază parametrii medii de exploatare ai cuptorului [3,6,13].

Tabelul 2.1. Caracteristicile tehnice ale cuptorului electric tip EBT [3]

| Nr. crt | Caracteristica | Valoare |
|---------|---------------------------|----------------------|
| 1 | Capacitatea nominală | 100 tone |
| 2 | Puterea transformatorului | 75 MVA |
| 3 | Tensiune în primar | 35 kV |
| 4 | Tensiune în secundar | 70-650 V |
| 5 | Diametru electrozi | 610 mm |
| 6 | Diametru cuvă | 6200 mm |
| 7 | Arzătoare oxigen | 5 |
| 8 | Lănci răcite cu apă | 2 (oxigen + cărbune) |
| 9 | Rest oțel lichid | 15t |

Tabelul 2.2. Parametri medii de exploatare ai cuptorului electric tip EBT [3]

| Nr.crt | Parametru | Valoare parametru |
|--------|----------------------|--------------------------|
| 1 | Încărcare cuptor | 3 bene |
| 2 | Consum energie | 440 kWh/t |
| 3 | Consum electrozi | 2,55 kg/t |
| 4 | Consum oxigen | 11,75 Nm ³ /t |
| 5 | Tap-to-tap | 112 min |
| 6 | Timp sub sarcină | 72% |
| 7 | Temperatură evacuare | 1635 °C |

Cuptorul electric cu arc de tip EBT din cadrul ArcelorMittal Hunedoara S.A. este dotat cu:

- dispozitiv pentru evacuarea oțelului prin vatră;
- pereți răciți cu apă;
- injectare carbon-oxigen;
- transformator de putere mare;
- arzătoare oxi-gaz.

2.1.2.2. Procesul tehnologic de elaborare a oțelului în cuptorul electric de tip EBT

Din punct de vedere a etapelor de elaborare (figura 2.2), acestea sunt similare cu cele de la un cuptor electric clasic, existând însă mici diferențe, avându-se în vedere modernizările suferite de cuptorul electric, atât din punct de vedere constructiv, cât și în mod deosebit al tehnologiei de elaborare. Astfel, în cele ce urmează, sunt punctate aceste diferențe și modul în care acestea influențează productivitatea și calitatea oțelului elaborat.

În primul rând, cartea tehnică a cuptorului de tip EBT indică etapele și timpii aferenți – tabelul 2.3.

Tabelul 2.3. Durate de elaborare la cuptorul EBT [3,6]

| Etapă elaborare | Durată, [min] |
|------------------------|----------------------|
| Ajustare | 6 |
| Încărcare | 6 |
| Topire | 47 |
| Afinare | 9 |
| Evacuare | 4 |
| TOTAL | 72 |

Încărcarea cuptorului electric cu arc cu fier vechi se face în mod mecanizat cu ajutorul benelor (bena I-60 t., bena II-30 t., bena-III 30 t.). Materialele auxiliare se adaugă cu un sistem de benzi transportoare printr-un orificiu practicat în boltă. Există însă cuptoare la care încărcarea se face continuu, pe la partea superioară, nefiind necesare bene de încărcare [3,6,9,12].

La încărcarea cuptorului se are în vedere în primul rând gradul de pregătire al încărcăturii, aceasta reprezentând o prioritate în secțiile de pregătire materii prime.

Astfel, încărcătura EBT trebuie să corespundă atât din punct de vedere al compoziției chimice cât și condițiilor topirii - să formeze rapid o baie lichidă cu scopul de a proteja vatra, pereții și bolta împotriva radiației căldurii de la arcul electric [3,10,16,17].

De asemenea, trebuie ținut seama de aceleași reguli care se aplică și la un cuptor clasic privind ordinea în care se face încărcarea materialelor metalice în benă și durata încărcării, având în vedere că aceasta se realizează cu bolta ridicată, ceea ce înseamnă o pierdere de energie de 10-20 kWh la fiecare ridicare a bolții.

Încărcătura este formată în proporție de 97,5% fier vechi iar diferența o reprezintă fontă solidă sau spărturi de electrozi. În cazul în care în încărcătură nu este prevăzută și o anumită cantitate de fontă, spărturi de electrozi (resturi) pentru obținerea unui <C> necesar, acesta va fi insuflat în timpul afinării sub formă de pulbere de grafit [3,18].

Încălzirea încărcăturii se suprapune parțial cu perioada de încărcare.

La **pregătirea și alcătuirea încărcăturii** trebuie să se țină seama de scopul propus (calitatea oțelului elaborat) și în același timp, în funcție de conjunctura economică, de disponibilitățile de moment privind materiile prime și materiale de adaos.

Pregătirea încărcăturii vizează în principal o mai bună utilizare a agregatului de elaborare în sensul micșorării duratei de topire, a pierderilor chimice și termice, precum și a creșterii durabilității căptușelii refractare. O pregătire avansată a fierului vechi conduce la reducerea numărului de bene de încărcare (de regulă 3 și de dorit nu mai mult de 4).

De asemenea, eliminarea (pe cât posibil) din încărcătură a materialelor nemetalice (refractare, zgură, nisip, beton pământ etc.) conduce la reducerea cantității de zgură, consumului de energie electrică și a reducerii scoaterii de metal lichid).

Topirea reprezintă o fază foarte importantă a elaborării oțelului în cuptoarele electrice cu arc, datorită modificărilor aduse în agregate performante de topire.

Durata topirii este determinată de gradul de pregătire a încărcăturii, de compactarea încărcăturii, de puterea transformatorului și de conducerea topirii. În timpul topirii, în paralel cu procesul fizic al trecerii încărcăturii în stare lichidă au loc procese fizico-chimice de oxidare a elementelor de formare a zgurii [3,19,20].

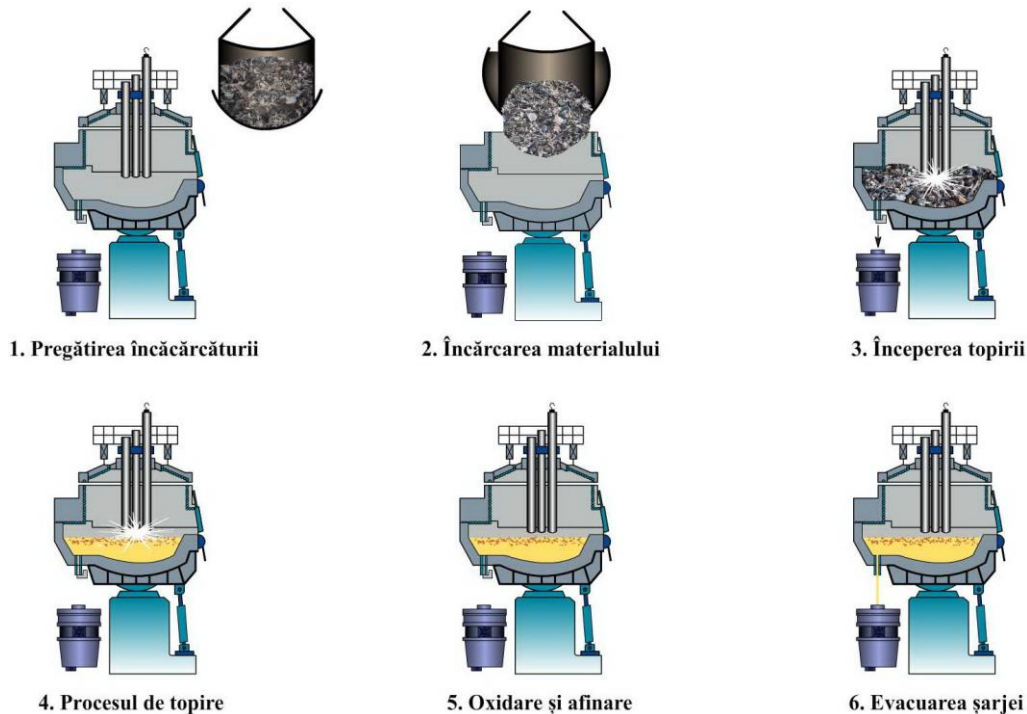


Figura 2.2. Fazele de elaborare în cuptorul electric E.B.T. Topirea în cuptorul electric cu arc

Căldura necesară topirii provine din două surse, astfel:

- energia degajată de arcul electric format între electrozii din grafit și încărcătura metalică. Inițial se stabilește o tensiune intermediară, pe durata căreia circa 15% din încărcătură este topită. După ce electrozii pătrund prin încărcătură, tensiunea este mărită la o treaptă superioară, iar căldura radiată de arcul electric format nu mai are o influență atât de negativă asupra bolții (ca urmare a formării craterelor în zona electrozilor). După stabilizarea completă a arcului electric, se poate trece la o putere mărită a transformatorului [3,5,6,8].
- energia chimică, asigurată de arzătoarele oxigen-gaz sau lancea de oxigen.

Arzătoarele oxigen-gaz (de regulă în număr de 5) utilizează un amestec de gaz metan și oxigen sau oxigen și aer.

Căldura degajată prin arderea acestui combustibil este transferată încărcăturii prin radiație și convecție de către produsele arderii iar în interiorul încărcăturii prin conducție.

Bucățile mai mari de fier vechi se topesc de regulă mai greu decât fierul vechi mijlociu sau mărunț. În aceste cazuri se utilizează insuflarea prin țevă consumabilă a oxigenului gazos (sub bucățile masive de fier vechi) care „taie” aceste bucăți. Odată ce este formată o baie metalică, insuflarea se poate face direct în aceasta, caz în care oxigenul reacționează cu elemente din baie, oxidându-le (C, Mn, Si, P, Al, Fe, V, Ti, B etc).

Aceste reacții sunt exoterme (cu cedare de căldură) ceea ce duce la creșterea cantității de căldură din proces. Produsele rezultate trec în zgură sau în gazele de ardere.

Spre sfârșitul topirii este redusă tensiunea în electrozi, prelevându-se

totodată probă de oțel pentru determinarea compoziției chimice și determinarea temperaturii.

Procesele metalurgice care au loc până la sfârșitul **perioadei de topire** sunt legate în principal de transferul de masă și energie.

Afinarea reprezintă perioada în care este continuat procesul de oxidare al elementelor însoțitoare din baia metalică (C, Mn, Si, P, S.), reprezentativă fiind oxidarea carbonului (afinarea în practica curentă este cunoscută și sub numele de oxidare, fierbere, decarburare).

În prezent, tehnologia aplicată la cuptorul de tip EBT prevede o insuflare de grafit de circa 200 - 1120 kg/șarjă (2-11, 2 kg/t oțel lichid) care, concomitent cu o insuflare de oxigen prin lance răcită cu apă dau valori ale vitezei de decarburare cuprinse în intervalul 1-4% C/h. Se are în vedere și durata fierberii, respectiv de 15-30 min. [3,5,7,8,24].

Oxidarea C la forma CO are loc cu degajarea unei cantități relativ mari de căldură (30-40% din necesarul de căldură). Totodată cu eliminarea CO are loc și degazarea oțelului, respectiv îndepărtarea azotului (la valori de 60-80 ppm) și respectiv a hidrogenului (de la 8 ppm la 2 ppm în 10 min) [3,7,8,25].

Manganul poate scădea de regula la 0,06%, reacția de oxidare a acestuia având loc simultan cu oxidarea C.

În ceea ce privește îndepărtarea fosforului, aceasta este posibilă în proporție de 20-50% din <P>, oxidarea fiind mai intensă la temperatură relativ joasă, conținut ridicat de (FeO) și (CaO). Însă, dacă temperatura este ridicată și respectiv la un conținut scăzut de FeO în zgură poate avea loc refosforarea băii metalice.

Desulfurarea este posibilă mai ales în oala de turnare (sub o zgură sintetică) sau în agregatul de tratament secundar.

În cea mai mare parte, afinarea se suprapune cu ultima parte a topirii [3,6].

Înainte de evacuarea oțelului din cuptor are loc îndepărtarea zgurii, mai ales având în vedere conținutul bogat în compuși ai fosforului. Există posibilitatea injectării de C în zgură în scopul reducerii FeO la forma Fe care difuzează în baie iar formarea de CO ajută la spumarea zgurii ((FeO) + (C) = (Fe) + {CO}).

În tabelul 2.4 este prezentată compoziția chimică a zgurii și sursele de proveniență a oxizilor prezenți.

Tabelul 2.4. Componenta și compoziția zgurii de la afinare [3,6]

| Component | Sursă | Cantitate, [%] |
|-------------------------------|----------------------------------|----------------|
| CaO | încărcătură (var) | 40-60 |
| SiO ₂ | oxidarea Si | 5-15 |
| FeO | oxidarea Fe | 10-30 |
| MgO | încărcătură (dolomită) | 3-8 |
| CaF ₂ | încărcătură (fluorină de calciu) | 1-3 |
| MnO | oxidarea Mn | 2-5 |
| S | difuzat din oțel | 0,05 |
| P ₂ O ₅ | oxidarea P | 0,05 |

Evacuarea (turnarea în oala de turnare) se realizează imediat ce compoziția chimică și temperatura sunt satisfăcătoare, prin deschiderea orificiului de turnare.

Oțelul este turnat în oala de turnare, fiind pregătit pentru următoarea operație: dezoxidarea. Se recomandă utilizarea dezoxidanților de tipul FeSi, SiMn și eventual Al. De asemenea, are loc formarea unei zguri noi, pe bază de Ca și Al, cu un puternic caracter desulfurant [3,26,27].

În figura 2.3 se prezintă o schemă tehnologică a procesului de elaborare a oțelului în cuptorul cu arc electric tip E.B.T. [3,6,28].

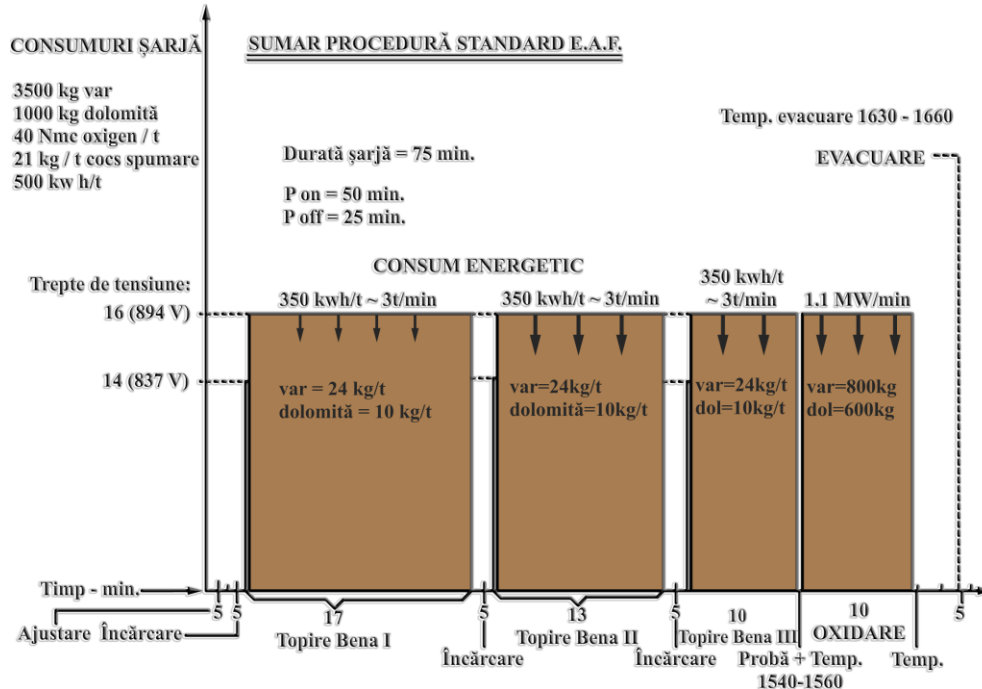


Figura 2.3. Schema procesului tehnologic de elaborare [3,6]

Pentru a asigura condiții corespunzătoare obținerii unei calități superioare este recomandabilă ca la elaborarea oțelurilor să se utilizeze încărcături metalice de calitate bună, neruginite și cu conținut mic de fosfor și sulf (de dorit sub 0,04%), pe cât posibil fără metale neferoase (Cu, Sn, Zn, Pb etc., beton, resturi refractare, pământ etc.). Încărcătura metalică trebuie pregătită astfel încât să se asigure încărcarea ei rapidă [3,6]. Proporțiile de materiale din întreaga componentă a încărcăturii se stabilesc pe baza ecuațiilor de bilanț a elementelor oxigen și carbon [3,6,8]. Procesul de elaborare este controlat cu ajutorul a 4 calculatoare de proces amplasate în cabina de comanda a cuptorului [3,6,7,8,29].

2.2. Tratamentul secundar al oțelului în oala de turnare

2.2.1. Considerații tehnologice

Cerințele crescânde de oțeluri de înaltă puritate și cu caracteristicile fizico-chimice și mecanice deosebite, au favorizat realizarea unei game foarte variate de prelucrare a oțelului lichid în afara agregatului de elaborare, diversificarea acestor procedee fiind dictată, în afara prescripțiilor de calitățile oțelului, de factori legați de condițiile locale ca: procedeul de elaborare, dotarea cu utilaje, economia de energie electrică și materiale (feroaliaje, adaosuri speciale, gaze inerte etc.).

Introducerea în fluxul tehnologic de elaborare a oțelului, a tehnologiilor de procesare a oțelului în oala de turnare, la început în instalații fără aport de căldură (barbotarea cu gaz inert, barbotare cu inert + vidare) urmate de cele cu aport de căldură a condus la gruparea acestora sub denumirea de **"METALURGIA ÎN OALĂ"** [3,6,7,8,29,31].

Pentru o tratare sistematică, procedeele de tratare a oțelului lichid în afara

agregatului de elaborare, pornind de la cele simple spre cele mai complexe, pot fi clasificate în felul următor:

- Barbotarea cu gaze inerte;
- Barbotarea cu gaze inerte + adaosuri în oala de turnare;
- Barbotarea cu gaze inerte + adaosuri în oala de turnare + reîncălzirea oțelului lichid;
- Tratarea cu zguri sintetice;
- Dezoxidarea oțelului în instalațiile de turnare continuă;
- Tratarea sub vid;
- Tratarea sub vid + adaosuri în baia metalică;
- Tratarea sub vid + adaosuri în baia metalică + reîncălzirea:
- Aport de căldură sub formă de energie electrică;
- Aport de căldură sub formă de energie chimică.

O clasificare a procedeelor de tratare a oțelului lichid în oala de turnare este și aceea în funcție de aportul de căldură:

- Fără aport de căldură:
 - Barbotare cu gaze inerte în oală;
 - Barbotare cu gaze inerte + tratament cu zguri sintetice;
 - Tratament în vid în oala de turnare;
 - DH (Dortmund Horder – Hutten Union);
 - RH (Ruhstahl Hareus), VD (Vacuum Degassing);
 - VD (Vacuum Degassing).
- Cu aport de căldura sub formă de energie electrică:
 - LF (Ladle Furnace);
 - VAD (Vacuum Arc Degassing), barbotarea băii cu argon;
 - ASEA – SKF, barbotarea băii prin agitare electromagnetice;
 - cuptor cu inducție în vid.
- Cu aport de căldură chimică:
 - VOD (Vacuum Oxygen Decarburization);
 - SS-VOD (Stong Stirring –VOD);
 - VODK (Vacuum Oxygen Decarburation Konverter);
 - RH-OB (Ruhstahl Hareus-Oxygen Blowing).

Un procedeu foarte eficient aplicat în multe oțelării este cel cunoscut sub denumirea VAD-VOD, practic o combinație între cele două procedee (menționate mai sus). Instalația are două stații separate: una de încălzire și rafinare în vid (VAD) și alta de rafinare (VOD). Instalația VOD este destinată rafinării oțelurilor anticorozive de înaltă puritate și conținut foarte scăzut de carbon, în condițiile unor adaosuri mari de elemente de aliere în cuptorul oală. În funcție de calitatea oțelului, oala cu oțel este transportată de la agregatul primar (cuptorul electric cu arc) fie la stația VAD, fie la stația VOD, unde în ambele cazuri este conectată la instalația de vidare (există o singură instalație de vidare). Fiecare stație este prevăzută cu o instalație de dozare a adaosurilor în timpul rafinării (fără întreruperea vidării). În timp ce stația VAD este echipată cu sistem de încălzire cu electrozi (aport de energie fizică), stația VOD este echipată cu o lance pentru insuflarea oxigenului (aport de căldură chimică), ambele sisteme fiind prevăzute cu dispozitive telescopice de etanșare, pentru a evita pierderea vidului în recipientul de vid (9,32).

Procedeeul prezentat are următoarele avantaje:

- obținerea unor conținuturi scăzute de oxigen, hidrogen, azot și incluziuni nemetalice în oțel (în oțelurile inoxidabile și refractare conținutul de [O] poate fi scăzut sub 20 ppm, cel de [N] sub 100 ppm și cel de [H] sub 2 ppm;

- obținerea unor compoziții chimice foarte precise precum o foarte bună omogenitate și puritate a lingourilor, respectiv semifabricatelor turnate continuu;
- reducerea duratei șarjei elaborate în cuptorul electric cu arc datorită posibilității de evacuare a oțelului cu conținut ridicat de carbon, de circa 0,5%, productivității orare și implicite a capacității de producție a agregatului primar;
- micșorarea consumurilor de energie electrică ca urmare a creșterii randamentelor energetice;
- scăderea costurilor de producție, în special, datorită posibilității utilizării în oală a ferocromului cu conținut ridicat de carbon, care este ieftin în comparație cu cromul metalic sau ferocromul cu conținut scăzut de carbon, precum și datorită gradului de asimilare a cromului care ajunge la 98% comparativ cu 90-95% cât se obține în mod curent la elaborarea într-un singur agregat (cuptorul electric cu arc).

2.2.2. Instalația LF (Ladle-Furnace)

2.2.2.1. Construcția instalației LF

Procedul LF valorifică potențialul efect al rafinării oțelului cu zguri sintetice prin încălzirea cu arc electric la presiune atmosferică și amestecării sub influența injectării gazelor inerte (argon). Instalației LF de rafinare a oțelului lichid este prezentată în figura 2.4.



a) vedere generală

b) bolta și electrozi

Figura 2.4. Instalația de tratament secundar de tip LF [24,25].

Instalația LF (asemănătoare din punct de vedere constructiv cu instalația VAD), este prevăzută cu închizător cu sertar și cu sistem de insuflare a argonului prin dop poros ceramic, pentru omogenizarea temperaturii băii metalice. De menționat că omogenizarea băii se poate face și prin agitare electromagnetică (situație mai rar întâlnită în practică). Pe durata desfășurării operațiilor tehnologice pentru protecție împotriva excesului de radiații termice, cuptorul – oală este acoperit cu un capac răcit cu apă, în care sunt practicate orificii pentru: cei trei electrozi, introducerea adaosurilor în vederea formării zgurii reducătoare, a feroaliajelor (inclusiv sub formă de sârmă, respectiv fir umplut) din alimentator, prelevarea probelor și măsurarea temperaturii băii metalice. Gazele și praful rezultate din proces sunt captate prin intermediul unei hote, după epurare gazele sunt eliberate în atmosferă iar praful procesat frecvent prin peletizare, ca material secundar în siderurgie. În cele mai multe oțelării există în funcțiune un flux de procesare a prafului prin peletizare, peletele fiind introduse (de dorit metalizate) în încărcătura cuptorului. Dacă nu se procesează trebuie depozitate în iazuri, situație nedorită atât din motive economice, cât și mai mult din motive ecologice.

Unele instalații sunt prevăzute cu posibilități de menținere a unei atmosfere neutre între capac și oțelul lichid, de exemplu prin suflare de argon [3,4,6,7,33].

Electrozii cuptorului – oală sunt conectați la transformator prin intermediul rețelei scurte, a cablurilor flexibile răcite cu apă și a conductorilor, răciți de asemenea cu apă. Arcele electrice formate între electrozi și topitura metalică asigură încălzirea băii metalice, caracteristicile acestora fiind controlate automat. O caracteristică a funcționării arcului electric este aceea că el lucrează acoperit, sub stratul de zgură, aspect care permite reducerea radiațiilor termice și o transmisie mai bună a căldurii către baie [3,4,6,7,33].

Căptușeala refractară a recipientului de tratament metalurgic este realizată din materiale super-aluminoase, iar în planul zgurii din cromito-magnezit.

Pe mantaua de oțel a oalei, după stratul de plăci izolatoare tip CERPAK (înlocuitor pentru azbest), se zidește un strat din cărămizi de șamotă, cu 40% Al_2O_3 [3,4,6,7,33].

2.2.2.2. Funcționarea instalației LF

Instalațiile LF funcționează în sistem duplex cu agregatul de elaborare primară, cuptorul electric cu arc sau convertizorul cu suflare de oxigen.

Pe durata procesului de tratament în instalația LF, de capacitate 100 t oțel lichid elaborat în cuptor electric cu arc tip EBT, au loc următoarele operații tehnologice (prezentate în figura 2.5) [3,6,7,34]:

- barbotare la cuptor, o perioadă de circa 5 min., timp în care se fac o serie de adaosuri constând în feroaliaje pentru continuarea dezoxidării (FeMn, FeSi, la unele șarje Al) și alte materiale pentru obținerea unei zguri desulfurante (var, bauxita, var dolomitic etc.);
- preluarea oalei cu oțel lichid pe transfercarul LF, conectarea la rețeaua de barbotare, poziționarea transfercarului (oalei cu oțel) sub capacul LF, măsurarea temperaturii oțelului în oală, prelevarea probei pentru determinarea compoziției chimice și reglarea debitului de barbotare cu argon în jurul valorii de 45 l/min (**capacitatea oalei 100t oțel**);
- înainte de începerea tratamentului secundar, se iversează aluminiu sub formă de sârmă și silico-calciu sub formă de fir umplut;
- încălzirea cu arc electric și formarea zgurii de rafinare prin adaosuri de var (1800 kg) și bauxită (600 kg) în 3 porții egale (600 kg var + 200 kg bauxită), timp de 20min. În acest timp, după formarea zgurii se fac

- adaosurile de FeSi, grafit, FeMn și SiMn în cantitățile necesare pentru încadrarea în ecarturile chimice corespunzătoare mărcii de oțel din programul de elaborare;
- se decuplează arcul electric, se măsoară temperatura oțelului, se prelevează proba de compoziție chimică intermediară;
 - se procedează la încălzirea finală pentru încadrarea în limitele de temperatură specifice fiecărei mărci de oțel (4-8 min.), timp în care se fac corecțiile finale la compoziția chimică a oțelului;
 - se reduce intensitatea barbotării la un debit de Argon de 35 l/min;
 - se adaugă prin imersare de Al fir (40-60 kg) și după o pauză de 3-4 min, se imersează SiCa fir (90 kg.);
 - după 4 min. de omogenizare, se prelevează proba finală de compoziție chimică, se măsoară temperatura oțelului, se adaugă praf de acoperire pe zgură, se oprește și se deconectează barbotarea cu Argon și se expediază oala cu oțel la mașina de turnare continuă, nu se prevede tratamentul în instalația de vidare sau la instalația de vidare VD dacă în instrucțiunile tehnologice se prevede tratamentul sub vid;
 - se preia șarja (oala) următoare;
 - timp total de tratament secundar = 44 - 50 min.

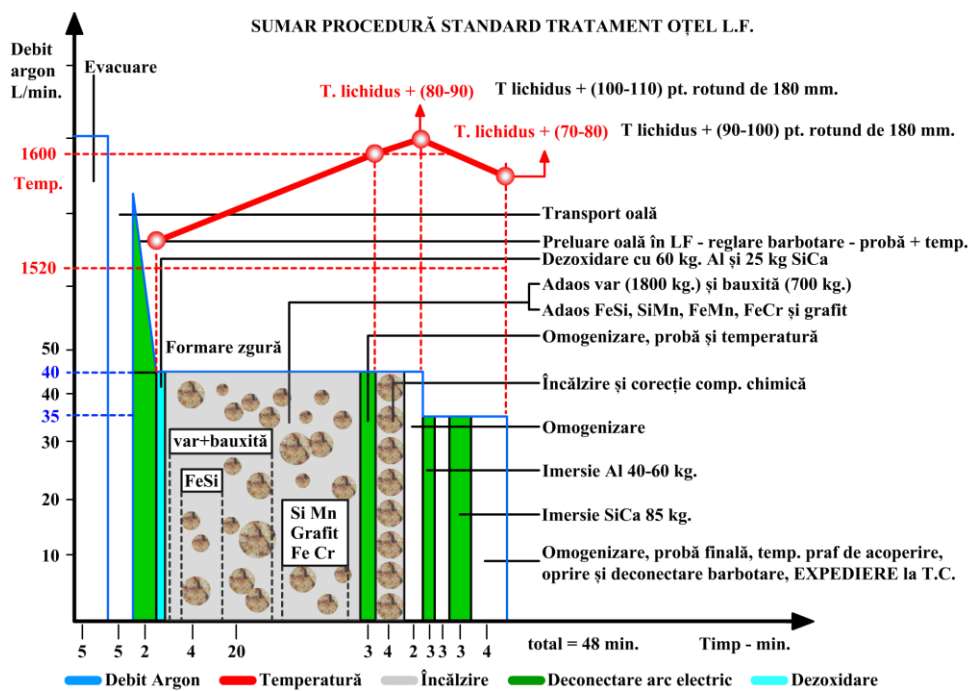


Figura 2.5. Schema procesului tehnologic de tratare în oala de turnare (LF)

Procesul tehnologic de tratament secundar este condus prin intermediul unui sistem computerizat de control care optimizează funcționarea instalației LF.

2.2.2.3. Efecte tehnico - economice

În instalația de tratament secundar LF se realizează corecția compoziției chimice, formarea unei zguri corespunzătoare (activă) pentru o bună degazare,

desulfurare și dezoxidare, precum și încălzirea, în vederea încadrării temperaturii oțelului în limitele prescrise de tehnologia de turnare continuă.

Procesarea oțelului în instalația LF asigură obținerea următoarelor efecte metalurgice [3,4,5,7,10,13,35]:

- reglarea temperaturii oțelului lichid;
- corecția compoziției chimice;
- dezoxidarea și desulfurarea cu sau fără zguri sintetice;
- îmbunătățirea purității oțelului în incluziuni nemetalice și degazarea.

Între aceste efecte și factorii care le condiționează există o strânsă interdependență, reflectată și de succesiunea etapelor procesului și anume:

a) la adaosul zgurilor sintetice se realizează:

- ecranarea arcului electric, cu efecte benefice asupra randamentului termic, micșorării uzurii materialelor refractare ale cuptorului – oală;

- reducerea contactului băii metalice cu atmosfera oxidantă;
- desulfurarea;
- dezoxidarea;
- creșterea purității.

b) încălzirea oțelului cu o viteză de 3-5° C/min permite:

- zgurificarea adaosurilor (var, var dolomitic, fluorină, topex, bauxită etc.) și obținerea unei zguri reducătoare, fluide și active;
- injectarea materialelor pulverulente cu caracter desulfurant;
- adaosul elementelor speciale de dezoxidare – aliere, a firelor de aluminiu

sau a celor umplute cu elemente dezoxidante sau modificatoare.

c) injecția argonului duce la:

- omogenizarea compoziției chimice și a temperaturilor topiturilor metalice;
- intensificarea reacțiilor zgură – topitură, mai ales în cazul desulfurării;
- flotarea și decantarea incluziunilor nemetalice și, ca urmare, îmbunătățirea purității în incluziuni nemetalice a oțelului.

Efectele economice care se obțin în urma desfășurării procesului de elaborare a rafinării oțelului pe ansamblul duplexului metalurgic CEA – LF se reflectă în:

- reducerea temperaturii de evacuare din agregatul primar de elaborare cu 40-80°C;
- scurtarea duratelor de elaborare în agregatul primar;
- reducerea uzurii și a consumului de materiale refractare cu 10-20%, datorită funcționării cu temperatură mai scăzută;
- scăderea consumului energetic cu 20-50 kWh/t și a celui de electrozi cu 0,1-0,2 kg/t.

2.2.3. Instalația VD (vidare – degazare)

2.2.3.1. Considerații tehnologice

Instalația de vidare VD are rolul de degazare a oțelului. Vidarea – degazarea oțelului lichid (minimizarea conținutului de hidrogen, azot și oxigen din oțelul lichid) se produce prin realizarea unei depresiuni în camera de vid (recipientul). Oțelul lichid este în permanent agitat prin barbotare cu argon pentru a se accelera degazarea și se asigură astfel omogenitatea chimică și termică a oțelului lichid.

Modificările fizico – chimice care au loc în cursul procesului de elaborare și turnare a oțelului sunt determinate ca sens și intensitate de desfășurare de următorii parametri:

- concentrația componentilor;
- temperatura;

- presiunea.

Includerea instalației pentru degazarea oțelului sub vid, în fluxul tehnologic de elaborare și turnarea continuă a oțelului, are ca scop îmbunătățirea calității oțelului prin influența presiunii asupra:

- solubilității gazelor;
- eliminarea produselor sub formă gazoasă ce rezultă din reacțiile dintre carbon și oxigen ($[C]+[O]=\{CO\}$, precum și dintre carbon și sulf $[C]+[S]=\{CS\}$);
- eliminarea incluziunilor nemetalice simple (MnO), (SiO_2), (Al_2O_3) precum și complexe de forma: ($FeOSiO_2$), ($2CaOSiO_2$), (Al_2O_3), ($FeOAl_2O_3$), ($FeOMnOSiO_2$), ($CaOSiO_2Al_2O_3$) etc., unde (Me_nO_m) reprezintă o fază de zgură lichidă, o incluziune nemetalică lichidă, din interiorul băii metalice, incluziune care tinde să decanteze din baia de oțel ca urmare a diferenței de densitate oțel – zgură, pe de o parte, iar pe de altă parte tensiuni interfazice.

Calitatea oțelului este influențată de prezența gazelor (oxigen, hidrogen, azot) dizolvate și absorbite, sau sub formă de combinații chimice cu elemente însoțitoare (frecvent oxizi și nitruri).

2.2.3.2. Descrierea fluxului tehnologic de vidare

Fluxul tehnologic este completat automatizat, fiind condus din cabina de comandă (figura 2.6) și are următoarele etape principale:

- oala cu oțel lichid preluată de la LF este introdusă cu ajutorul podului rulant de turnare în recipientul de vidare;
- se cuplează instalația de barbotare a oțelului în oală prin dopurile poroase;
- după deplasarea podului rulant de turnare de la recipientul de vidare, se translatează deasupra recipientului căruciorul cu capacul (bolta) instalației, se așează pe recipient în poziție ermetică, după care se pornește în trepte succesive pompa de vid care evacuează gazele rezultate din oțelul lichid, barbotat permanent cu gaz inert, de regulă argon. Gazele extrase din recipientul de vidare sunt trecute printr-o instalație de epurare pentru reținerea prafului. De dorit ca praful rezultat să fie procesat și reintrodus în fluxul siderurgic (elaborare fontă, oțel, feroaliaje);
- la sfârșitul tratamentului se îndepărtează capacul și se fac corecții ale compoziției oțelului lichid prin adaos de feroaliaje, după caz: fir de aluminiu, fir umplut cu SiCa, AlCaSi, S, C, precum și sub formă de bucăți de exemplu SiMn, etc. pe baza probelor de oțel și temperatură, prelevate cu o instalație mecanizată.



Fig. 2.6. Instalație VD vedere generală și conducere automată [26].

Instalarea în fluxul tehnologic de elaborare a oțelului în sistemul duplex CEA – LF a instalației de vidare-degazare VD permite elaborarea oțelului în sistemul triplex de agregate siderurgice CEA – LF – VD.

Date referitoare la funcționarea unei instalații tip VD se prezintă în tabelele 2.5 și 2.6.

Tabelul 2.5. Durata fazelor tehnologice după evacuare, min [26].

| Limite de variație | Durata fazelor tehnologice, min | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------------------|-----|--------|----------|-----------|-------|--------|-----|---------|
| | EBT → LF | LF | LF→ VD | VidareVD | Vid adânc | 2+3+4 | VD→MTC | TC | 1+6+7+8 |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Min | 6 | 83 | 8 | 20 | 12 | 111 | 38 | 86 | 241 |
| Max | 20 | 134 | 18 | 27 | 15 | 179 | 64 | 117 | 380 |
| Med | 13 | 113 | 12 | 23 | 14 | 148 | 48 | 93 | 302 |

Tabelul 2.6. Temperatura oțelului la procesarea în oala de turnare, °C [26].

| Limite de variație | Temperatura oțelului, °C | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------|------|--------------------|-----------|-----------|--------------------|--------|----------------------|
| | → LF | LF→ | $\Delta T=(3)-(2)$ | →VidareVD | VidareVD→ | $\Delta T=(4)-(5)$ | MTC-D* | $\Delta T=(7)-(T_L)$ |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| Min | 1554 | 1662 | 76 | 1658 | 1612 | 30 | 1532 | 28 |
| Max | 1679 | 1683 | 113 | 1672 | 1526 | 59 | 1562 | 51 |
| Med | 1672 | 1673 | 97 | 1665 | 16118 | 46 | 1548 | 42 |

*Temperatura oțelului în distribuitor, °C ; T_L - Temperatura lichidus a oțelului, °C

2.2.3.3. Efecte tehnico – economice

Ca urmare a aplicării în procesul de elaborare a oțelului în sistemul triplex CEA (tip EBT) – LF – VD se obțin următoarele efecte tehnico – economice:

- se asigură un conținut scăzut de incluziuni nemetalice și gaze, în mod deosebit hidrogen, ceea ce asigură o bună omogenitate chimică și structurală, comparativ cu sistemul duplex (CEA – LF).

- parametrii barbotării (durată, presiunea în instalația VD, debit de argon și temperatura oțelului) au o influență puternică asupra randamentului de eliminare a hidrogenului, fapt confirmat de rezultatele obținute la prelucrarea datelor experimentale și verificate în practica industrială.

- eliminarea azotului din baia de oțel pe durata tratamentului în instalația de tip VD are loc concomitent cu cel de eliminare a hidrogenului.

- efectele economice obținute pe ansamblul triplexului metalurgic (CEA) (EBT) – LF – VD: reducerea consumului de materiale refractare cu 10-20%, datorită funcționării cu temperatură mai scăzută; scăderea consumului energetic cu 20-50 kWh/t și a celui de electrozi cu 0,1-0,2 kg/t.

2.3. Analiza procesului de turnare continuă a oțelului

2.3.1. Generalități

Progresul extrem de rapid al turnării continue a oțelului atât din punct de vedere metalurgic, cât și în ceea ce privește construcția instalațiilor, a permis ca acest procedeu să se răspândească larg în industrie.

Pe lângă preocupările pentru utilizarea cât mai intensă a acestui procedeu, specialiștii își îndreaptă tot mai mult atenția asupra îmbunătățirii caracteristicilor mașinilor de turnare, a calității semifabricatelor obținute ca și a trecerii pe acest flux a unui număr tot mai mare de mărci de oțel.

În ceea ce privește construcția mașinilor de turnare continuă, în ultima

perioadă nu s-au făcut modificări esențiale, tipul construcției utilizat în prezent fiind cel cu cristalizor și fir curbat după o singură rază.

Preocupările în acest domeniu se referă mai ales la posibilitatea creșterii cantității de oțel turnat și la îmbunătățirea calității acestuia.

2.3.2. Tipuri de instalații

Instalațiile cu fir drept de tip I se pretează la turnarea cu viteză scăzută a semifabricatelor cu secțiuni mari și a țevelor cu diametru mare, complicând și ridicând costurile construcției – figura 2.7.

La instalațiile de tipul II (a), cu solidificare verticală și curbarea firului la orizontală, se reduce parțial înălțimea de construcție (în medie cu 20%), care ajunge până la 30 m.

La astfel de instalații, prin curbarea și îndreptarea firului se pot introduce tensiuni interne și chiar fisuri locale în material, datorită rezistenței mecanice reduse la temperaturile de ieșire din zona de răcire secundară (850 – 950° C). [3,4,5,7,10,13,36].

Acest lucru permite obținerea unor semifabricate de oțel cu grosimi maxime de 250–270 mm pentru secțiunile pătrate și dreptunghiulare, pe secțiunile circulare limita este de 350 mm diametru.

O reducere în continuare a înălțimii instalației, evidențiată în figura 2.7, fixează limita superioară a acesteia la 25 m și în aceste cazuri, la turnarea semifabricatelor apare pericolul apariției tensiunilor și fisurilor în material. Este recomandat la obținerea unor sortimente variate calitativ și dimensional.

Utilizarea mașinilor de turnare continuă de tipul III (a) conduce la o reducere a cheltuielilor de investiții cu 20% pentru hală și pentru instalații auxiliare. Reducerea înălțimii față de tipul I este de 60 – 70%.

Micșorarea presiunii ferostatice din coloana de metal lichid a permis mărirea vitezei de turnare, facilitată și de mărirea capacității de răcire a cristalizorului, simultan cu mărirea secțiunii de turnare, acest tip de instalație reprezintă varianta cea mai răspândită în prezent [3,4,5,7,10,13,36].

2.3.3. Elementele instalației de turnare continuă cu fir curbat

În prezent în țările dezvoltate circa 97% din oțelul lichid este turnat continuu. Japonia al doilea mare producător din țările industrializate toarnă continuu 98% din oțelul elaborate, iar China 97% (2010) [7,10].

Turnarea continuă este foarte răspândită și poate fi aplicată la aproape orice marcă de oțel, având numeroase avantaje.

Noile dezvoltări în turnarea continuă au oferit producătorilor de oțel alternative la turnarea continuă convențională, prin scăderea dimensiunilor semifabricatelor, în sensul apropierei lor de dimensiunea finală [7,10,11,37].

Tendința producătorilor de a se apropia cât mai mult de dimensiunea finală prin turnare continuă își găsește justificarea prin economiile importante de energie care sunt realizate în urma scurtării reducerii (simplificării) fluxului tehnologic (energie necesară atât încălzirii, cât și lucrului mecanic de deformare), prin micșorarea pierderilor de metal în timpul procesării și prin eliminarea unor instalații care presupuneau investiții, personal, întreținere etc.

Problema majoră a apropierei semifabricatului turnat continuu de dimensiunea produsului finit este cuplarea "în linie" a mașinii de turnat continuu cu laminorul, urmărindu-se valorificarea optimă a căldurii fizice a semifabricatului și implicit mărirea productivității.

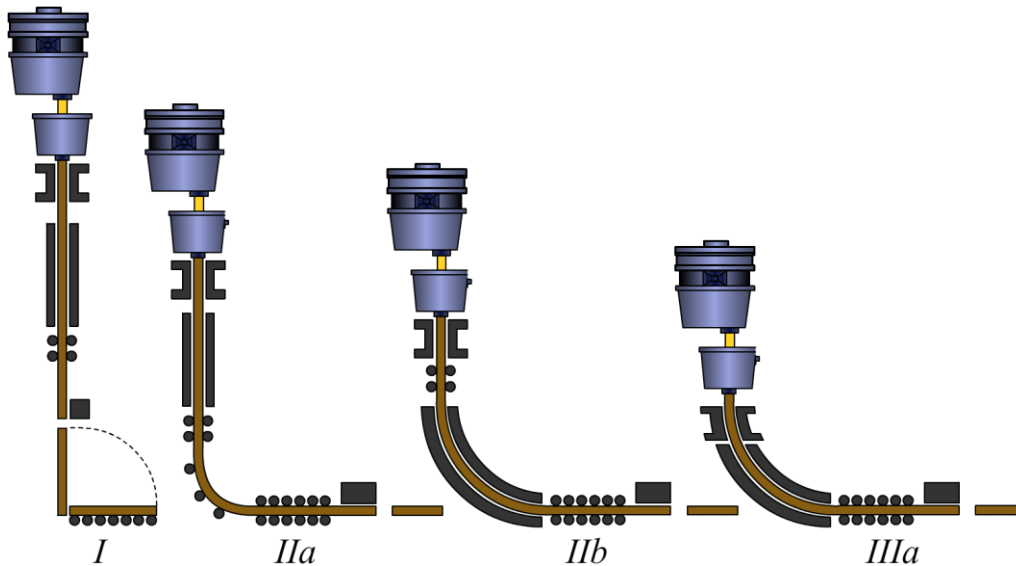


Figura 2.7. Tipurile de turnare continuă a oțelului

Instalațiile de turnare continuă indiferent de varianta tehnologică (în prezent peste 95% cu fir curb) au următoarele părți componente: distribuitor, cristalizor, sistemul de răcire secundară, sistemul de ghidare și de tragere, sistemul de debitare și sistemul de basculare.

2.3.3.1. 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 [7,10,11,38].

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, precum și de necesitatea preluării întregii șarje din agregatul de elaborare. Astfel cele mai mici instalații industriale, care toarnă țagle cu productivități reduse, sunt alimentate cu oale de 5-10 t capacitate, în timp ce instalațiile noi de sleburi mari folosesc oale până la 300-400 t capacitate [7,10,11,38].

Deoarece tehnologia modernă de turnare continuă se bazează pe turnarea întregii șarje într-o singură oală (divizarea șarjelor prezintă dificultăți în ceea ce privește sincronizarea turnării și conduce la căderi mai mari de temperatură), capacitatea oalelor de turnare este egală, în general, cu capacitatea cuptorului de elaborare [12,13,38].

Căderile practice de temperatură variază astfel: 0,10 °C/min pentru șarjele de 250 t; 0,30° C/min pentru șarjele de 100 t; 0,70° C/min pentru șarjele de 50 t și 10° C/min pentru șarjele de 20 t. Căptușeala oalei, care nu este nevoie să difere de cea a oalelor utilizate pentru turnarea convențională a lingourilor, depinde de cerințele locale și de metoda intenționată de tratament în oală [7,39].

Oalele cu căptușeală bazică sunt utilizate în special pentru turnare continuă a pofilelor rotunde, deoarece turnarea acestora necesită de obicei tratament intensiv al oțelului în oală.

Durabilitatea medie este în general de 20-30 șarje (și peste) pentru pereții oalei și 10-15 șarje pentru fund.

Dacă insuflarea cu oxigen prin lance durează prea mult timp, distribuitorul și tuburile de imersie se răcesc prea mult și pot cauza probleme majore pentru începerea turnării. Când se folosește un nisip adecvat și o practică corectă de umplere, frecvența de "deschidere" ar trebui să fie de circa 95%.

În vederea uniformizării temperaturii băii metalice se prevede barbotarea (agitarea) oțelului cu gaze inerte (argon, azot), realizată ori cu lănci de gaz introduse în baia de oțel prin partea de sus sau prin cărămizi poroase amplasate la fundul oalei (variantă frecvent utilizată).

Lăncile oferă avantajul că sunt independente de oală, dar efectul de agitare este inferior celui realizat prin introducerea gazului inert pe la partea inferioară a oalei, deoarece reacția de agitare nu începe de la fundul oalei [7,10,11,39].

Prin urmare, lăncile ar trebui introduse destul de adânc în oală, aproape de fundul ei.

Barbotarea cu introducerea gazului pe fundul oalei, utilizând dacă este posibil 2 - 3 cărămizi poroase, asigură o agitare mai eficientă. De asemenea, prezintă avantajul că barbotarea poate fi deja începută în timpul golirii cuptorului. Riscul producerii unor avarii la oala de turnare este minim, dacă materialele din care sunt confecționate părțile componente ale ansamblului de insuflare a gazului inert sunt adecvate și dacă se supraveghează cu atenție uzura oalei [6,7,39].

Timpul de agitare ar trebui să fie de cel puțin 7 minute dar preferabil 10 minute sau mai multe minute pentru a realiza o omogenizare satisfăcătoare a temperaturii, compoziției chimice și pentru a aduce o îmbunătățire a purității oțelului.

O perioadă scurtă de așteptare de 10 - 15 minute trebuie să fie între sfârșitul agitării și începutul turnării pentru a permite oxizilor din topitură să se ridice la suprafață/să decanteze. Timpul necesar pentru transportul oalei din oțelărie la mașina de turnare sau timpul necesar pentru analiza probelor din oală poate fi utilizat ca parte a perioadei de așteptare.

Prin urmare, nu este de dorit să se agite oțelul în oală pe turnul rotitor sau alt suport al oalei de pe mașina de turnare și apoi să se înceapă turnarea. Dar dacă timpul de așteptare după agitare este foarte lung, se poate folosi o reagitare scurtă (necesară pentru omogenizarea termică) chiar înainte de a începe turnarea.

Șarjele turnate fără zgură sau cu puțină zgură, trebuie acoperite în oală, cu prafuri termoizolante pentru a evita/reduce scăderea de temperatură și pentru a împiedica absorbția de gaze (O,H,N). Desigur astfel de compuși nu trebuie să reacționeze cu oțelul și nici să formeze o zgură foarte fluidă, care ar putea fi absorbită în distribuitor și posibil în cristalizor.

Semifabricate turnate continuu cu conținut scăzut de incluziuni nemetalice oxidice se pot obține doar dacă oțelul lichid este protejat împotriva reoxidării de către oxigenul din aer.

Gradul de puritate este de o mare importanță pentru calitatea produsului turnat. Scopul protecției oțelului împotriva reoxidării, între oală și distribuitor, este să alimenteze cristalizorul mașinii de turnare cu oțel cu conținut scăzut de impurități de oxizi. Măsurile referitoare la reducerea impurităților de oxizi din oțel trebuie să înceapă deja în timpul procesului de elaborare a oțelului.

Este necesară de asemenea acoperirea băii de oțel din oală și distribuitor cu

compuși neutri de izolare cu conținut scăzut în FeO, pentru a evita reoxidarea, de o importanță deosebită fiind protecția împotriva reoxidării între oală, distribuitor și cristalizor.

2.3.3.2. Distribuitorul

Un distribuitor are rolul să distribuie/repartizeze oțel tuturor cristalizoarelor fără pierderi majore de căldură și trebuie să permită impurităților grosiere să se ridice la suprafața băii de metal, astfel încât să fie reținute de zgura din distribuitor. Distribuitorul trebuie să servească de asemenea ca o capacitate tampon între oală și cristalizoare, să permită controlul fluxului de oțel în cristalizoare și trebuie să ofere suficientă capacitate de stocare pentru schimbarea oalei în cazul turnării secvențiale.

Fundul și pereții laterali trebuie să fie drepecți, fără colțuri inutile pentru a evita eroziunea sau „înghețarea” oțelului. Distribuitorul trebuie să fie suficient de înalt pentru a asigura întotdeauna o adâncime suficientă a băii de oțel, chiar atunci când oalele sunt schimbate astfel încât zgura sau compusul de acoperire să nu poată curge prin orificiile distribuitorului în cristalizoare [10,11,35].

Practica a demonstrat că o adâncime adecvată a distribuitorului este de circa 600 mm. pentru distribuitoare controlate cu dispozitive de oprire. Capacitatea distribuitorului trebuie să fie destul de mare, pentru a se putea asigura o viteză de turnare corespunzătoare din punct de vedere tehnologic, atunci când alimentarea acestuia cu oțel este întreruptă, mai precis în timpul schimbării oalei (turnarea secvențială). În funcție de viteza de turnare și numărul de fire, capacitatea distribuitorului poate fi în domeniul 12 - 35 tone. Un distribuitor trebuie să aibă un jgheab de revărsare pentru a evita revărsarea necontrolată în cazul unui distribuitor cu funcționare liberă [10,11,35].

2.3.3.3. Tubul de imersie

Turnarea continuă cu tuburi de imersie este practica generală pentru toate dimensiunile de fire suficient de mari. Tubul de imersie îndeplinește unui rol multiplu [10,11,35]:

- protejează oțelul lichid împotriva reoxidării de către oxigenul din aer, și absorbției de hidrogen și azot din mediul înconjurător, în drumul său de la distribuitor la cristalizor;

- dirijează oțelul prin zgura de turnare/lubrifiere situată pe partea superioară a oțelului din cristalizor, astfel încât nici o particulă de zgură nu este antrenată în oțel – figura 2.8.

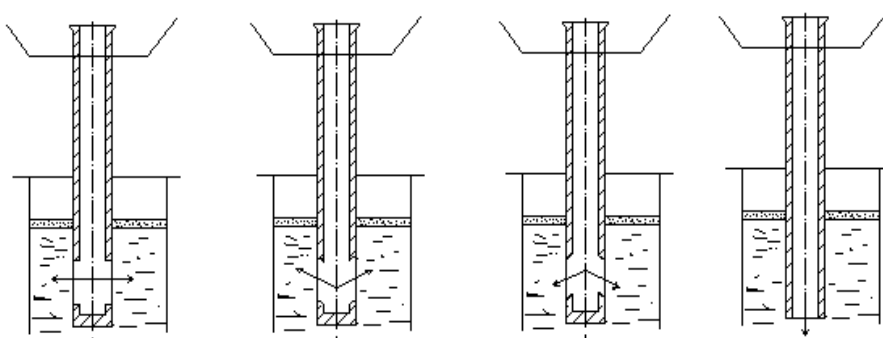


Figura 2.8. Orificii de turnare imersate de diverse tipuri

Mărimea și forma unui tub de imersie trebuie aleasă în concordanță cu condițiile instalației de turnare continuă și viteza de turnare.

Tubul de imersie trebuie să fie suficient de lung, pentru a asigura că ieșirea oțelului din tub este de la 50 până la 80 mm sub nivelul oțelului din cristalizor, când distribuitorul este în poziție joasă. Acesta înseamnă o distanță de 150 până la 180 mm de la marginea superioară a tubului cristalizorului. Lungimea tubului de imersie este de asemenea importantă în context cu determinarea mișcării de ridicare a căruciorului distribuitorului, sau a distribuitorului și spațiul deasupra acestuia care este limitat de către oală [10,11,35].

Diametrul interior al tubului de imersie trebuie să fie astfel ales, încât să se asigure o viteză de turnare corespunzătoare secțiunii profilului turnat. De exemplu, pentru vitezele de turnare de până la 700 kg/min este necesar un diametru al orificiului de 55 mm [10,11,36].

Materialul refractar al tuburilor de imersie este supus condițiilor grele de lucru în timpul turnării, acestea trebuind să aibă rezistență mare la:

- șocurile termice, având în vedere temperaturile care variază atât pe lungimea, cât și grosimea lui;
- acțiunea corozivă a oțelului și a zgurii de turnare [9].

2.3.3.4. Cristalizoarele

Cristalizoarele reprezintă din punct de vedere tehnologic partea cea mai importantă a mașinilor de turnare continuă. Construcția lor, conductibilitatea termică, precizia de prelucrare și de asamblare, joacă un rol important pentru obținerea unei productivități maxime, a unei calități superioare a semifabricatelor, precum și a unei scoateri mari de semifabricate recepționate (de regulă peste 96% [10,11,13,39].

În timpul turnării, cristalizorul preia de la distribuitor oțelul lichid în partea sa superioară (figura 29) 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 (fața interioară a acestuia), transmisia de căldură este rapidă și se formează în scurt timp o crustă solidă de grosime mică, care se desprinde de cristalizor ca urmare a fenomenului fizic de contracție – figura 2.9 și figura 2.10 [10,13,39]. Crusta trebuie să aibă totuși grosime suficientă ca să reziste presiunii ferostatice a oțelului lichid din interior.

Semifabricatul 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 [10,13,40].

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.

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.

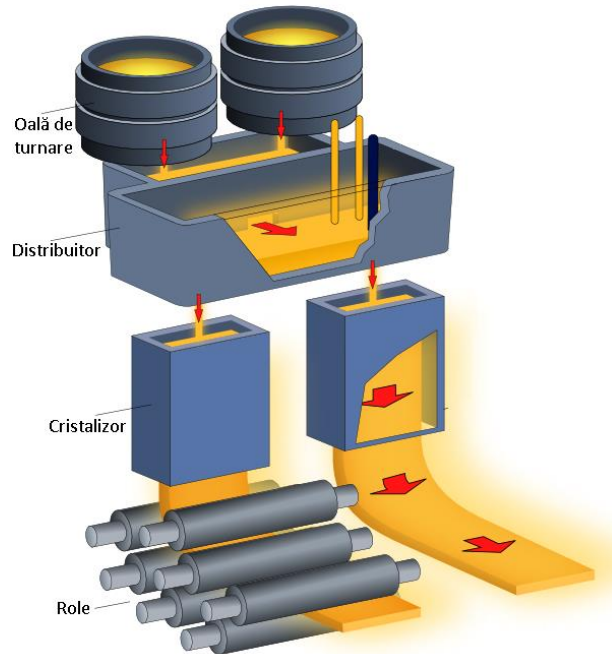


Figura 2.9. Alimentarea cristalizorului din distribuitor

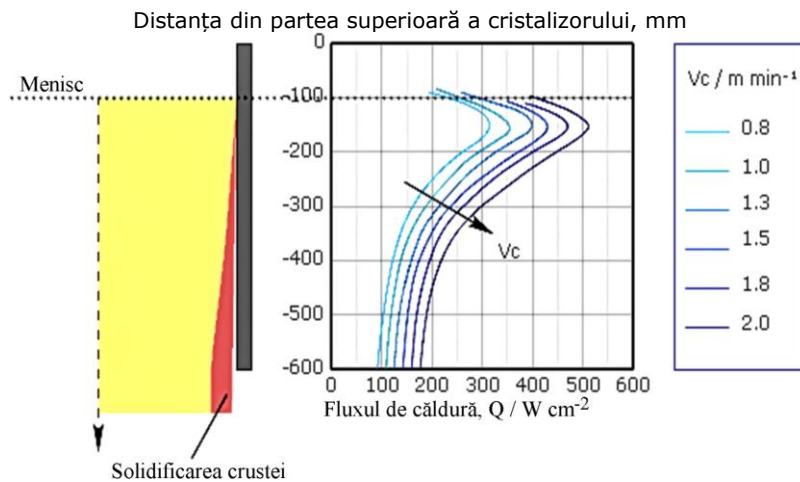


Figura 2.10. Creșterea grosimii crustei solidificate, funcție de viteza de turnare. [14]

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 [10,13,40].

Datorită scăderii randamentului de extragere a căldurii se impune o lungime cât mai mică de cristalizor, astfel încât după răcire în cristalizor, firul turnat continuu

este răcit direct cu apă, îmbunătățind considerabil condiția de transmitere a căldurii.

Lungimea cristalizorului este însă limitată de rezistența la cald a crustei solidificate față de acțiunea presiunii ferostatice [10,13].

Limitarea în sus a lungimii este necesară pentru limitarea dezvoltării pe verticală a instalației, ceea ce se reflectă în costul ei. 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 – 55 s și unei grosimi de crustă de 14 – 30 mm [10,13,40].

Cristalizorul standard, lung de 700 mm. permite aplicarea apei de răcire secundară la timp, ceea ce are ca rezultat o cantitate corectă de căldură îndepărtată. Până acum, nu este încă clar dacă un cristalizor mai lung, de exemplu de 900 mm lungime, va da rezultate mai bune. În orice caz, un cristalizor mai lung prezintă dezavantaje în ceea ce privește forțele de frecare dintre fir și suprafața cristalizorului [10,13,40].

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 (figura 2.10). 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 [8,10,13,14].

În scopul măririi capacității de răcire, cristalizoarele se prevăd cu o anumită conicitate (6-9%), laturile fiind mai mici în partea inferioară. În felul acesta se asigură o perioadă mai lungă de contact dintre metal și cristalizor.

Pentru asigurarea în practică a unei conicități corecte, cristalizoarele trebuie prelucrate cu o precizie deosebită. Excepție reprezintă fețele mari ale cristalizoarelor pentru brame, unde presiunea ferostatică readuce crusta la perete. Pentru o ghidare mai bună și pentru simplificarea construcției, aceste fețe se execută paralele.

În regiunea de contact între 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 [8,10,13,14].

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.

Materialul cristalizorului trebuie să facă față unor cerințe foarte diferite: trebuie să aibă o duritate satisfăcătoare, de exemplu, rezistență împotriva abraziunii și a acțiunilor mecanice; totodată, acesta trebuie să aibă de asemenea o conductibilitate termică ridicată, pentru a preveni ca temperatura suprafeței de lucru a cristalizorului să devină prea ridicată [8,9,10].

Cuprul electrolitic nealiat, fără oxigen, cu 99,9% Cu este unul dintre materialele standard pentru cristalizoarele de turnare continuă. Cuprul electrolitic prezintă în oarecare măsură costuri mai scăzute ale materialelor în comparație cu cuprul aliat, dar ca un dezavantaj, are un conținut ridicat rezidual al fosforului de dezoxidare [8,9,10,40].

Acest conținut de fosfor efectuează pe de o parte o temperatură înaltă de recristalizare, dar și scade conductibilitatea termică a cuprului, pe de altă parte.

Astfel, rezistența înaltă la transferul de căldură al cuprului electrolitic duce la o sarcină termică considerabilă pe suprafața fețelor de contact cristalizor-semifabricat de oțel în curs de solidificare, în special în zona nivelului de turnare. În plus, cuprul electrolitic are o comportare comparativ nesatisfăcătoare la contracție și la fluaj sub sarcini termice alternative, care pot crea distorsiunea și deformarea țevii de cupru. Prin urmare, cuprul electrolitic mai este utilizat doar pentru cristalizoarele mari cu plăci [8,9,10,40].

Totuși, aceste dezavantaje joacă un rol minor doar pentru cristalizoarele pentru profile rotunde, deoarece geometria lor este mai favorabilă și mărimea lor mai mică. De aici, cuprul electrolitic nealiat servește ca material adecvat pentru cristalizoarele pentru profile rotunde.

Aliajele de cupru cu adaosuri de Cr (0,7%), Zr (0,06%), și mici adaosuri de Co, Be și Ag au fost testate în special pentru a găsi materialele cu proprietăți de contracție și fluaj îmbunătățite. Rezultate excelente au fost obținute cu cuprul care conține argint, care prezintă o conductibilitate termică foarte bună [8,9,10].

Fără îndoială, acest material este foarte potrivit pentru cristalizoarele pentru profile rotunde. Totuși, trebuie verificat în acest caz singular dacă cheltuielile mai ridicate pentru materiale sunt compensate de avantajele suficient de mari la funcționare.

Când se analizează aceste avantaje, nu trebuie ținut seama doar de durata de funcționare a unui tub de cupru, ci și de siguranța funcțională mai bună datorată deformării mai mici a cristalizorului, ca și disponibilitatea mai mare a mașinii, modificării mai reduse a cristalizorului.

În condițiile alierii cu crom se ating duriții de 160 – 180 HB.

Uzura cuprului poate fi evitată prin aplicarea de straturi protective pe suprafața cristalizorului. Acesta este posibilă de exemplu, prin galvanizarea unui strat de 0,10 mm. de crom pe peretele de cupru, care asigură duriții până la 100HB [8,9,10,13].

Durabilitatea cristalizoarelor variază în limite foarte largi, date fiind influența factorilor implicați: calitatea și temperatura oțelului, intermitența turnării respectiv realizarea turnării secvențiale, randamentul ungerii, calitatea apei de răcire, respectarea parametrilor optimi de turnare. Cristalizoarele moderne tubulare ating 100-400 turnări, iar cele cu plăci - executând operații intermediare de rabotare și rectificare - până la 1000 de turnări [8,9,10,13].

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 prin pulverizarea apei.

În funcție de aplicația finală a semifabricatelor turnate, pot fi turnate o varietate de profile ale secțiunii transversale de diverse dimensiuni, de exemplu: profile pătrate, profile dreptunghiulare, profile cave, profile poligonale, profile rotunde [8,9,10,13].

Constructiv se realizează trei tipuri de cristalizoare și anume: compacte, tubulare și cu plăci tubulare [9,13].

Cristalizoarele compacte (figura 2.11) sunt formate dintr-un bloc forjat sau turnat din cupru, găurit în interior conform secțiunii semifabricatului. În pereți sunt prevăzute orificii pentru circulația apei de răcire, distribuite uniform în jurul perimetrului și cât mai aproape de fața interioară pentru a favoriza răcirea.

Acest tip de cristalizor însă se utilizează destul de rar, și numai pentru blumuri mijlocii și mari, datorită capacității reduse de răcire, ceea ce limitează viteza de turnare. De asemenea, prezintă două dezavantaje majore: costuri ridicate de

prelucrare și imposibilitatea de re-prelucrare pentru suprafețele lor de lucru fără creșterea ariei secțiunii transversale a cristalizorului.

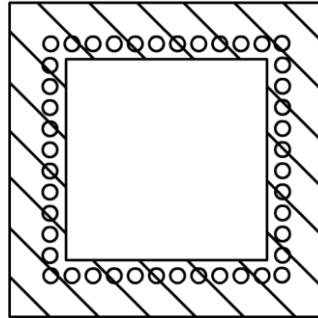


Figura 2.11. Cristalizor compact [26]

Datorită vitezei mici de turnare, zona de contact direct dintre metal și cristalizor este foarte scurtă (150-200 mm) în comparație cu lungimea cristalizoarelor construite de Concast care este de 600-700 mm. Datorită posibilității de recondiționare, cristalizoarele compacte au o durabilitate ridicată, de 600-1000 șarje [10,14,41].

Cristalizoarele tubulare sunt foarte răspândite pentru turnarea țagelilor și blumurilor mici cu secțiunea pătrată și dreptunghiulară (sub 200 x 200 mm) și a țagelilor rotunde cu diametre până la 300 mm destinate țevilor. Aceste cristalizoare sunt formate dintr-o țeavă de cupru înconjurată de o carcasă prin care circulă apa de răcire. Datorită capacității mare de răcire, cristalizoarele tubulare sunt foarte frecvent utilizate pentru turnarea cu viteză mare a țagelilor, atât pe instalații verticale cât și pe instalații curbe [10,13,14].

Pentru a răspunde acestor cerințe, prafurile de turnare continuă sunt analizate, având în vedere următoarele caracteristici: fuzibilitatea, vâscozitatea, tensiunea superficială și interfazică, capacitatea de absorbție a incluziunilor.

Aceste proprietăți, la rândul lor, sunt în mare măsură determinate de compoziția chimică și mineralogică, repartiția granulometrică, umiditatea fizică și chimică a prafului și respectiv a zgurii de praf de turnare (praf unguent) [7,13,41].

La adaosul prafului de turnare în cristalizor, acesta trebuie să se răspândească repede și uniform pe suprafața oțelului, acoperind astfel în întregime oglinda de metal. În acest mod se formează un strat izolator care reduce substanțial pierderile de căldură prin radiație.

Praful de turnare nu trebuie să ardă și să se topească prea repede pe suprafața oțelului, pentru a nu se forma un strat prea gros de zgură, dar în timp util, pentru a se asigura o ungere corespunzătoare a cristalizorului. În urma proceselor care au loc la suprafața băii metalice, trebuie să se formeze un strat relativ subțire de zgură lichidă, capabilă să absoarbă incluziunile nemetalice din oțel și în același timp să curgă în jos peste meniscul de metal, în spațiul dintre fir și peretele cristalizorului.

În plus, praful de turnare și zgura formată nu trebuie să carbureze și să impurifice oțelul, și nici să degaje gaze toxice în mediul înconjurător [13,41].

Oscilația cristalizorului (figura 2.12) este efectuată de către un motor electric, prin oscilator sau placa de oscilație. Diverse soluții tehnice sunt disponibile pe piață. Mișcarea în jos și în sus a cristalizorului evită lipirea crustei nou formate a firului de peretele cristalizorului. În figura 2.12. este prezentată o simulare a

oscilației cristalizorului, pentru o viteză de turnare de 1 m/min.

Orice soluție ar fi aleasă, ar trebui să garanteze că cristalizorul se mișcă exact pe linia mașinii de turnare. Cu cât acționarea conține mai puține părți de mișcare, cu atât este mai bine pentru siguranța și exactitatea oscilatorului. Uzura lagărelor și a îmbinărilor sistemelor complicate pot duce ușor la vibrații și la o mișcare de rostogolire a cristalizorului. Acesta va deteriora definitiv calitatea firului și chiar va cauza ruperi.

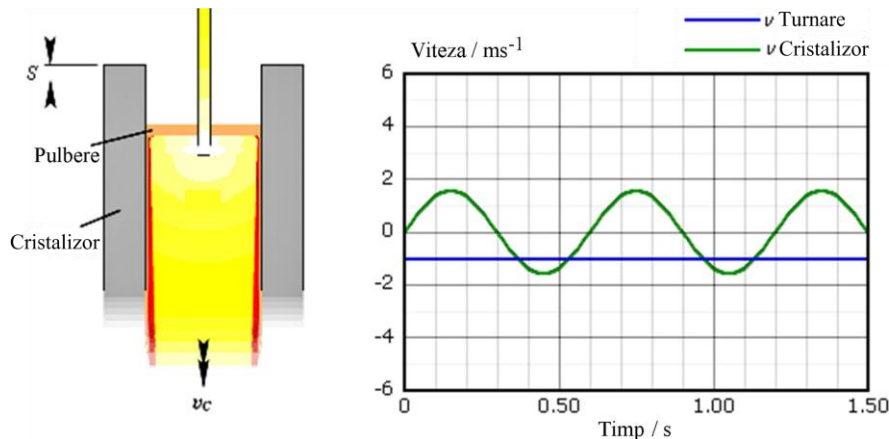


Figura 2.12. Oscilația cristalizorului [13]

Oscilația cristalizorului, împreună cu fluctuațiile nivelului de turnare, ca și cu vâscozitatea, tensiunea suprafeței de separație a oțelului lichid și a prafului de turnare (praf, zgură) va influența mult aspectul suprafeței firului și va produce urme de oscilație pe semifabricat.

Aceste urme sunt cauzate de preluarea unui supradebit al coroanei (cruste) meniscului de-a lungul peretelui cristalizorului declanșat de mișcările cristalizorului și de unduirile nivelului oțelului. Astfel de semne de oscilație sunt în anumite limite de dorit din punct de vedere metalurgic, deoarece ele au o influență favorabilă asupra cedării căldurii.

O suprafață complet plată a firului ar ceda inițial prea multă căldură și ar răci și contracta prea repede firul. Astfel s-ar pierde prea repede contactul dintre fir și peretele cristalizorului datorită contracției, iar distribuția tensiunii și a căldurii nu ar mai fi uniformă și probabil ar cauza fisurarea, ruperea firului [10,13,42].

Urmele de oscilație, din contră stabilesc contactul dintre crusta firului și peretele cristalizorului la un număr de puncte separate în loc de arii, astfel că disiparea căldurii la nivelul oțelului lichid din cristalizor se reduce. Timpul total de contact între fir și cristalizor, totuși, se prelungește datorită urmelor de oscilație, iar extragerea căldurii este satisfăcătoare și uniformă, fără să rezulte distorsiunea crustei.

Crusta de oțel care se formează în interiorul cristalizorului se contractă în timpul solidificării și răcirii ulterioare. În zona superioară a cristalizorului, crusta inițială a firului este foarte subțire și fierbinte și prin urmare necesită să fie susținută de peretele cristalizorului. În zona inferioară a cristalizorului, crusta este destul de stabilă pentru a se susține, dar nu trebuie, cu toate acestea, să fie în contact cu peretele cristalizorului pentru îndepărtarea în continuare a căldurii [10,13,42].

În practică o conicitate de 1,0-1,2% s-a dovedit utilă pentru un cristalizor

rotund de 700 mm. lungime și pentru viteze de turnare de până la 3,5 m/min.

Când se toarnă la viteze mari ar putea fi util să nu se întrebuițeze o conicitate liniară, de exemplu, o conicitate constantă pe lungimea totală a cristalizorului, ci una variabilă, la care se aplică o valoare mai mare a conicității în zona superioară a cristalizorului și una mai mică în secțiunea inferioară a cristalizorului.

O toleranță de $\pm 0,1$ mm. pentru măsura interioară a cristalizorului ar trebui să fie la cristalizoarele noi.

În cazul infiltrării apei între tubul cristalizorului și armătura pentru apă, cristalizorul trebuie schimbat. De obicei, durata de funcționare a tubului cristalizorului este de aproximativ 20.000 tone de oțel turnat. După acesta, tubul este scos din cristalizor și dat la deșeuri fără re-prelucrare.

Sistemul de control al nivelului cristalizorului urmărește nivelul actual al oțelului din cristalizor și în conformitate, controlează debitul (curgerea) de oțel din distribuitor în cristalizor prin controlarea deschiderii orificiului tubului distribuitorului [8,9,10,13].

2.3.3.5. Zona de răcire secundară, elemente de susținere, extragere și îndreptare

Scopul răcirii secundare – figura 2.13. este să continue răcirea firului după ce a ieșit din cristalizor și să solidifice complet secțiunea transversală a firului.

Totuși, avansarea solidificării este limitată de anumite restricții naturale, cum ar fi: conductibilitatea termică în crusta firului, eficiența de răcire a agentului răcitor și nu în ultimul rând, considerații de calitate a semifabricatului.

Crusta formată în cristalizor conferă forma secțiunii turnate. În majoritatea cazurilor ea nu prezintă însă suficientă rezistență mecanică la acțiunea presiunii ferostatice. Pentru desăvârșirea solidificării și ghidarea în condiții bune a firului, este amenajată zona de răcire secundară.

Această răcire se realizează prin stropire directă cu apă sub presiune – figura 2.14, prin duze, capabilă să străbată stratul de abur format prin evaporare și să asigure contactul continuu și permanent apă - metal. Răcirea cea mai intensă este aplicată oțelurilor inoxidabile austenitice, în vederea prevenirii precipitărilor de carburi. Regimul de răcire al oțelurilor susceptibile la formarea de tensiuni interne impune organizarea zonei în mai multe subzone [14].



Figura 2.13. Zona de răcire secundară [13]

Această organizare este favorabilă în același timp unui program larg de secțiuni turnate, conferind elasticitate instalației. În unele cazuri răcirea secundară are loc prin pulverizarea apei cu aer comprimat sau liber în aer, fără stropire. Aerul cald se evacuează prin tiraj natural sau forțat, printr-o hotă special amenajată.

Eficacitatea răcirii în zona secundară este determinată atât de debitul de apă utilizat (proporțional cu viteza de turnare), cât și de repartizarea apei pe suprafața metalului. Stropirea trebuie să asigure răcirea continuă, corespunzătoare unei căderii constante de temperatură de la 1200-1300° C la ieșire din cristalizor la 700 – 900° C la capătul zonei secundare [10,13,42].

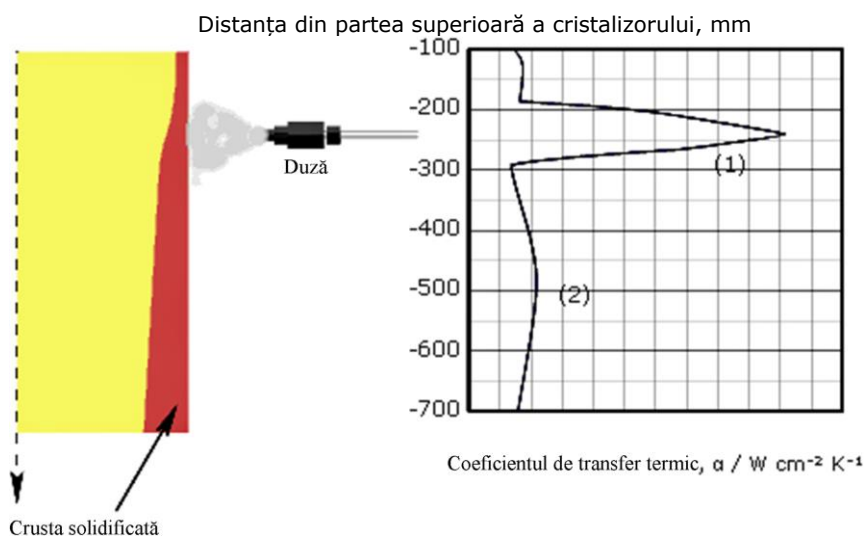


Figura 2.14. Creșterea grosimii crustei, prin stropire cu apă [13]

Căderea de temperatură se realizează mai ușor în cazul secțiunilor pătrate sau rotunde, unde zona lichidă se micșorează repede. Conținutul de căldură în cazul bramelor este în schimb ridicat un timp mai îndelungat, ceea ce explică existența conului de solidificare și în agregatul de extragere [14,43].

Zona de răcire secundară urmează imediat după cristalizor și în general se extinde peste 30 până la 50% din lungimea miezului lichid. Este divizată în subzone, care sunt controlate individual. Mediul de răcire, care este apa sau un amestec de aer și apă, este pulverizat prin duze la suprafața firului și este astfel controlat încât temperatura suprafeței firului scade uniform în direcția de turnare. Temperatura ar trebui să fie uniformă pe circumferința firului.

Extragerea căldurii în cristalizor este în principal determinată de tranziția căldurii de la suprafața firului la peretele cristalizorului. În zona de răcire secundară, totuși, cedarea căldurii este în special dependentă de fluxul de căldură în interiorul crustei firului. În anumite limite, transferul de căldură în crustă poate fi mărit prin creșterea diferenței de temperatură dintre interiorul și exteriorul crustei de oțel. Temperatura interiorului crustei, de exemplu suprafața de separație lichid - solid, este mai mult sau mai puțin invariabilă. Ca urmare, temperatura suprafeței exterioare a crustei, pe lângă grosimea crustei, va determina viteza de solidificare și de aici lungimea miezului lichid al firului; o temperatură scăzută a suprafeței exterioare înseamnă o diferență mare de temperatură în interiorul crustei. Totuși, posibilitățile de a realiza un timp scurt de solidificare prin răcirea intensă a

pulverizării sunt limitate de conductibilitatea termică scăzută a crustei de oțel.

Răcirea foarte intensă nu duce la un gradient care coboară constant în interiorul crustei, ci la o scădere bruscă a curbei de temperatură în crustă spre suprafața exterioară. Acesta cauzează tensiuni termice locale în crustă și în consecință fisurarea internă și superficială în fir. Unele oțeluri cu rezistență ridicată sunt deosebit de sensibile în această privință.

Sistemul de răcire prin pulverizare este divizat în bucle și zone controlate individual. În general, debitul apei pulverizate ar trebui să scadă de la cristalizor în direcția de turnare. Debitul apei pulverizate ar trebui să fie mai mari în partea superioară a mașinii de turnare pentru a realiza creșterea rapidă a crustei firului și astfel să îmbunătățească rezistența crustei în funcție de efort. Scăderea intensității răcirii în direcția de turnare trebuie să prevină temperatura suprafeței să devină prea scăzută în punctul (-tele) de îndreptare [8,10,13].

Duzele de pulverizare, unghiul de pulverizare, distanțele dintre duze și presiunea apei trebuie să fie în așa fel reglate încât o temperatură uniformă sau aproape uniformă a suprafeței să se realizeze în jurul periferiei firului la un anumit nivel. Mai multe zone de răcire sunt aranjate în succesiune de-a lungul firului și sunt controlate pentru a asigura scăderea debitelor de pulverizare și eficiența răcirii în concordanță cu viteza și cu lungimea miezului lichid al firului.

Cantitatea de apă de pulverizare necesară depinde de viteza de turnare. Se presupune un punct de lucru reprezentând debitul la viteza maximă de turnare ca bază de referință. Modificările debitului de apă sunt în proporție liniară față de viteza de turnare. Unitatea de control calculează o valoare de referință care servește ca multiplicator pentru a determina debitul actual la fiecare viteză de turnare.

Pulverizarea este menținută constantă la un nivel minim preselecat. Acesta este necesar pentru a menține un minim al răcirii chiar la viteze scăzute de turnare.

Toate zonele de pulverizare sunt supravegheate pentru a putea detecta duzele înfundate, țevile sau furtunurile sparte. Din acest motiv, sistemele de control compară continuu raportul teoretic presiune în funcție de debit al fiecărei zone (curba caracteristică a duzei) cu presiunile și debitul actual ale apei, iar în momentul în care apar discrepanțe, se inițiază o alarmă. Sunt supravegheate și debitul actual și cele dorite ale apei.

Cu agregatul de extragere – îndreptare se realizează pe lângă funcțiunile de extragere și îndreptare a firului și operația de introducere a barei false. În acest scop el este prevăzut cu role libere, răcite la interior sau stropite cu apă, viteza lor periferică reprezentând propriu-zis viteza de turnare.

Rezistențele opuse de material depind de mărimea secțiunii semifabricatului turnat, de calitatea oțelului și temperatură și determină forțele de apăsare la contactul metal-rolă. Suplimentar apar rezistențe datorită degajărilor din zonele unde crusta, accidental prea subțire, cedează sub acțiunea presiunii ferostactice. Aceste forțe au valoare limitată datorită rezistenței mecanice a materialului solidificat total sau parțial. Creșterea numărului de perechi de role motrice reduce solicitarea mecanică asupra firului turnat [10,13,40].

Bara de turnare obturează partea de jos a cristalizorului la începutul turnării și antrenează firul turnat până la angajarea lui între rolele de extragere. La ieșirea din agregatul de extragere - îndreptare, bara trebuie desprinsă și îndepărtată din traseul firului. Comparativ cu instalațiile de turnare cu fir vertical, unde bara de pornire se prezintă ca o tijă verticală, evacuată lateral, în instalațiile cu fir curb bara este executată din elemente articulate de lanț cu plăci.

Capul de prindere avea într-o variantă inițială profil coadă de rândunică,

asigurând o priză bună cu metalul. El rămâne solidar cu firul după decuplarea lui de restul firului. În etapa actuală el se execută detașabil, cu profil de gheară, care permite decuplarea ușoară printr-o mișcare de ridicare.

Capul de prindere se execută din oțel de calitate sau slab aliat, cu 0,2-0,25% C sau din fontă cenușie. Înainte de introducerea în cristalizor el se preîncălzește la 200° C și se acoperă cu mortar refractar și grafit. Fundul cavității capului pătrunde deasupra muchiei inferioare a cristalizorului cu 100 - 150 mm.

Interspațiile între cap și pereții cristalizorului se închid etanș cu fire de azbest și se acoperă cu bucăți de tablă. Pentru accelerarea solidificării primei porții de oțel turnat și în vederea creării jocului de contracție în cavitatea capului se încarcă fâșii de tablă.

Debitarea firului turnat continuu la lungimile de utilizare se execută prin tăiere mecanică sau cu oxigen. Față de tăierea mecanică cu foarfeci sau cu ferăstraie, care produce pierderi mai mici de metal și necesită o întreținere mai simplă, dar ocupă un spațiu mai mare și reclamă cheltuieli de instalare mai ridicate (în special la secțiunile mari). Ea este dezavantajată doar de consumul de metal mai mare (fâșia de tăiere - lățimea flăcării), de obligativitatea întreținerii curente a arzătoarelor și de gaze și de zgură. Este de remarcat economicitatea tăierii cu oxigen la secțiunile mari de țagă, la blumuri, la brame și menajarea muchiilor de tăiere.

La agregatele de tăiere cu oxigen se utilizează oxigen cu puritate minimă de 99,5% la presiunea de 12 - 20 daN/cm². Consumul de oxigen depinde de secțiunea și lungimile tăiate și variază între 0,2 - 0,3 Nm³/t pentru țagle și blumuri de 6 m lungime și 0,8 - 1 Nm³/t pentru țagle și blumuri de 2 m și brame de 6 m, tăierea având loc la 800° C, odată cu scăderea temperaturii consumul specific de oxigen crește.

Pentru instalațiile de tăiere cu oxigen se utilizează combustibili cu aprindere lentă - gaz natural, propan și în cazuri de necesitate acetilenă sau hidrogen - la presiunea de 2 daN/cm² și un consum mediu 0,03 Nm³/t. Lățimea fâșiei de tăiere depinde de temperatură și grosimea secțiunii de turnare între 6 - 10 mm pentru grosimile de tablă, blumuri și brame de 100 - 300 mm.

Viteza de tăiere depinde de temperatură și grosimea semifabricatului, fiind la temperatura uzuală de 800° C de 0,75 m lățime/min pentru 100 mm grosime, de 0,55 m/min pentru 200 mm și de 0,4 m/min pentru 300 mm, iar la temperatura de 1000° C viteza poate crește cu 15% [10,13].

2.3.3.6. Turnarea secvențială

La începutul folosirii în practica industrială a instalațiilor de turnare continuă, acestea se caracterizau printr-un regim discontinuu de lucru, la care după fiecare șarjă, instalația se golea și se pregătea pentru șarja următoare. În acest scop era necesară evacuarea metalului turnat, introducerea barei de pornire și etanșarea capului acesteia în cristalizor, precum și pregătirea unui distribuitor cu elemente noi pentru porțiunile solicitate (dop și orificiul de turnare). În funcție de tipul acestor instalații, durata acestor operații era de 15-60 min., ceea ce limita timpul efectiv de lucru la 50% [10,13,40].

Prin introducerea unor materiale refractare de calitate superioară și prin unele măsuri constructive și de exploatare, a devenit posibilă turnarea fără întrerupere a unui număr mai mare de șarje, procedeu denumit turnare secvențială.

În prezent turnarea secvențială reprezintă tehnologia standard a tuturor instalațiilor de turnare continuă (variind însă numărul șarjelor turnate într-o secvență și frecvența secvențelor), care sunt prevăzute cu dispozitive de schimbare

rapidă a oalei de turnare și a distribuitorului.

Această largă răspândire a turnării secvențiale se datorează avantajelor importante ale acestui procedeu, și anume [10,12,13]:

- mărirea productivității și a randamentului în urma reducerii timpilor pauză între șarje;
- micșorarea consumului de metal (respectiv mărirea scoaterii de metal bun) datorită reducerii resturilor de la șarje și de la capete;
- un echilibru termic mai favorabil al mașinii și cheltuieli de întreținere și exploatare mai mici (în special pentru rolele intermediare și manoperă).
- menționăm însă că turnarea secvențială pe o perioadă mai lungă impune și o serie de condiții, în special tehnologice, dintre care cele mai importante sunt:
 - comenzi mari din aceeași marcă de oțel și dimensiune de semifabricat;
 - sincronizarea perfectă între ciclurile de elaborare a cuptoarelor și ciclurile de turnare continuă;
 - corectitudinea și constanța compoziției chimice și a temperaturii de turnare a oțelului, pentru a putea fi dirijat mereu la turnarea continuă și a putea amesteca șarjele;
 - funcționarea corectă a instalației de turnare continuă pentru a reduce la minimum opririle;
 - calitatea superioară a cristalizoarelor, care să permită turnarea prelungită, asigurând o transmisie constantă de căldură și păstrarea formei inițiale.

2.4. Concluzii

Din studiul efectuat se desprind următoarele concluzii:

- în prezent majoritatea oțelărilor electrice sunt echipate cu cuptoare cu arc electric de mare putere tip (EBT) și mașini de turnare continuă;
- durata șarjei la asemenea cuptoare este cuprinsă între 45 – 75 min (foarte apropiată de cea la convertizoarele cu oxigen);
- productivitatea este în medie circa 100 t/h;
- în fluxul de fabricație este prevăzută procesarea oțelului prin așa numita metalurgie în oală, de regula în instalații de tip LF, de multe ori în flux cu instalații de vidare;
- durata procesării în asemenea instalații este cuprinsă între 42 – 80 minute, fiind influențată de structura secvenței de turnare;
- se tinde spre creșterea cantității de oțel turnat într-o secvență (respectiv a numărului de oale turnate);
- instalațiile moderne de turnare asigură turnarea unei game variate de semifabricate de diferite secțiuni poligonale, circulare și produse plate;
- tendința actuală este de a se turna semifabricate cu secțiune cât mai apropiată de cea finală.

3. SISTEME FUZZY ÎN PROCESUL TURNĂRII CONTINUE A OȚELULUI

3.1. Generalități

Logica Fuzzy reprezintă o metodă diferită de tratare a problemelor de reglare, față de metodele clasice. Bazele teoretice ale logicii Fuzzy au fost puse de profesorul Lotfi A. Zadeh de la Universitatea din Berkely, în 1965. Logica Fuzzy permite tratarea variabilelor vagi ale căror valori pot varia între 0 și 1, spre deosebire de logica binară care lucrează cu variabile care au valori numai 0 și 1. Inițial, ca și rețelele neuronale, logica Fuzzy a fost aplicată în domenii netehnice, în așa numitele sisteme expert, folosindu-se capacitatea lor de a lua decizii [38,39].

În 1975 au apărut primele aplicații ale logicii Fuzzy în sistemele de reglare. Din anul 1985, japonezii au început să o utilizeze în procesele industriale pentru rezolvarea problemelor de conducere. În Europa, cercetările în aplicarea logicii Fuzzy în reglare au debutat mai târziu. De exemplu, pentru Germania anul demarării unor cercetări sistematice se consideră 1991.

În cazul reglării Fuzzy algoritmi de reglare convenționali sunt înlocuiți printr-o serie de reguli lingvistice de forma **Dacă (premiza) atunci (concluzie)**. Astfel, se obține un algoritm euristic și poate să se ia în considerare experiența operatorului pentru conducerea proceselor. În aceste condiții logica Fuzzy se pretează foarte bine conducerii proceselor [21,38,39,40].

Se pot menționa ca exemple de sisteme de conducere Fuzzy, câteva aplicații industriale împreună cu avantajele lor, provenind în mare parte din Japonia, exemple care deja au devenit arhicunoscute: [38,39,40]

- comanda metrourilor, cu o funcționare mai confortabilă, mai economică și o precizie de oprire sporită (1987, în localitatea Sendai, Japonia);
- comanda ascensoarelor, cu un timp de așteptare redus;
- comanda instalațiilor de climatizare cu o reducere sensibilă.

Domeniile de aplicație au devenit extrem de largi în ultimii ani. Logica Fuzzy se aplică și în domeniul aparatelor casnice, aparate fotografice, camere video și altele. Se discută de succese spectaculoase în domeniul conducerii, pe baza logicii Fuzzy.

În prezent, se consideră că logica Fuzzy se pretează a fi utilizată în domenii particulare, cum ar fi:

- conceperea de regulatoare pentru procese greu modelabile;
- conceperea de regulatoare neliniare pentru procese modelabile.

În primul caz se aplică procedee euristice, aplicându-se/bazându-se pe cunoștințele operatorului. Pentru ajungerea la rezultate convenabile, este adesea necesar să se facă analize lungi și dificile [38,39,40]. În cel de al doilea caz, se profită de caracteristicile neliniare pentru îmbunătățirea performanțelor sistemelor de reglare convenționale care funcționează într-o manieră neliniară [38,39,40]. Logica Fuzzy se folosește în cazul proceselor de o complexitate deosebită, la care modelul matematic poate fi foarte greu determinat, deoarece utilizarea logicii Fuzzy nu presupune obligatoriu cunoașterea modelului matematic al procesului

3.2 Principiul reglării Fuzzy

Regulatorul Fuzzy, spre deosebire de un regulator clasic, nu tratează informația printr-o relație matematică bine definită (algoritm de reglare), ci utilizează inferențe cu mai multe reguli, bazându-se pe variabile lingvistice. Aceste inferențe sunt tratate prin operatori ai logicii Fuzzy.

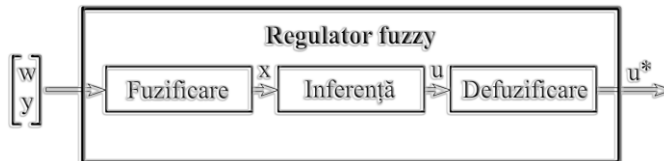


Fig. 3.1 Configurația unui regulator Fuzzy

După cum se vede în figura 3.1 în configurația unui regulator Fuzzy se disting trei părți:

- fuzificarea;
- inferența;
- defuzificarea.

Blocul de fuzificare realizează o prelucrare preliminară a datelor, de exemplu formarea erorii de reglare sau, determinarea variației unei anumite mărimi, de pildă diferența valorilor de la două momente de discretizare, și tratează aceste mărimi prin variabile lingvistice, ceea ce necesită asocierea unor funcții de apartenență. Mărimile de intrare ale regulatorului pot fi mărimea prescrisă w și ieșirile măsurate y ale procesului. Fuzificarea furnizează o serie de variabile Fuzzy, reunite în vectori x [38,39,40].

În blocul de inferență, valorile variabilelor Fuzzy sunt legate prin mai multe reguli care trebuie să țină cont de comportamentul static și dinamic al sistemului de reglare ca și de scopurile reglării avute în vedere. În particular, bucla de reglare trebuie să fie stabilă și bine amortizată. În figura 3.1. se consideră cazul regulatorului Fuzzy monovariabil la ieșire. Pentru variabila de ieșire a regulatorului, după inferență se obține o informație Fuzzy. Rezultatul inferenței este o mulțime Fuzzy u asociată ieșirii regulatorului la momentul t .

Deoarece elementul de execuție trebuie comandat cu o valoare reală concretă a semnalului de comandă, trebuie să se transforme mulțimea Fuzzy u a ieșirii într-o valoare determinată u^* . Aceasta se face în blocul de defuzificare.

Fuzificarea, inferența și defuzificarea provoacă un caracter nelinier al reglării cu logică Fuzzy.

Această configurație a fost introdusă de **Mamdani**, unul din primii specialiști care au aplicat logica Fuzzy în reglare. Într-o altă abordare, introdusă de **Sugeno**, fuzificarea singură este efectuată explicit și părțile de inferență și defuzificare se confundă [39,40,41].

3.3 Logica Fuzzy

3.3.1 Introducere

Acest subcapitol este consacrat prezentării bazelor generale ale logicii Fuzzy. În acest context, se va face o limitare la proprietățile esențiale. Există o bibliografie foarte vastă cu lucrări teoretice, cu o multitudine de variante, în care sunt propuse

reguli de tratare. O limitare la relațiile de bază se justifică prin faptul că reglarea Fuzzy nu utilizează decât o mică parte din toate regulile existente. Câteva elemente de bază prezentate sunt: variabile lingvistice, definirea variabilelor lingvistice, inferențe și operatori.

3.3.2 Noțiuni de bază

Un proces tehnic este descris prin mărimi fizice, care iau valori reale, precise, bine determinate (în limba engleză "*crisp values*"), într-un domeniu de valori. Descrierea unei anumite situații, a unui fenomen sau a unui procedeu conține în general expresii vagi cum ar fi: *câtva, mult, adesea, rar, cald, frig, rapid, lent, mic, mare* etc. Expresii de acest gen formează valori ale *variabilelor lingvistice* din logica Fuzzy. Până la a permite tratarea numerică, trebuie să se dea o definiție cu ajutorul unor *funcții de apartenență*. Se poate lua ca exemplu mărimea fizică temperatura, căreia i se asociază variabila lingvistică temperatura. Pentru mediul ambiant într-o regiune cu climat temperat se poate considera că temperatura ia valori reale între -20°C și $+35^{\circ}\text{C}$. În descrierea lingvistică cu mulțimi vagi, se poate spune că variabila lingvistică temperatura ia următoarele *valori lingvistice*: foarte rece între -20°C și 0°C , rece între 0°C și $+10^{\circ}\text{C}$, potrivit între 10°C și 20°C , cald între 20°C și 30°C și foarte cald între 30°C și 35°C . O astfel de descriere este foarte subiectivă. Ea permite o interpretare mai largă, în funcție de maniera de conducere. Chiar când se încearcă să se facă o descriere mai precisă, rămâne loc pentru un anumit grad de libertate în interpretarea fenomenului [22,39,40,41].

Logica Fuzzy a fost introdusă tocmai pentru a trata matematic informațiile vagi. Reprezentarea matematică a informației vagi are la bază introducerea *funcției de apartenență* ca o măsură a apartenenței unui element la o mulțime sau la o valoare lingvistică. *Modelarea lingvistică* constă în asocierea unei mărimi fizice a unei variabile lingvistice, cu mai multe valori lingvistice, pe baza cărora se vor putea asocia și diverse funcții de apartenență.

Descriind un procedeu el poate fi descompus în mai multe subprocedee, și astfel poate deveni foarte complex. Descrierea unui procedeu poate fi făcută simplu în maniera: [39,40,41]

*Dacă condiția 1, atunci operația 1, sau
dacă condiția 2, atunci operația 2, sau.
dacă condiția n, atunci operația n.*

Diferitele condiții se compun în general din mai multe variabile lingvistice, legate între ele prin operatorii *ȘI* respectiv *SAU*

3.3.2.1 Funcții de apartenență

În vederea tratării matematice a variabilelor lingvistice în scopul prelucrării raționamentelor prin logica Fuzzy cu calculatorul se asociază valorilor variabilelor lingvistice funcții de apartenență. În acest context se atribuie fiecărei valori lingvistice a variabilei lingvistice o funcție de apartenență $m_{(.)}(x)$, ale cărei valori variază între 0 și 1, ținând cont de clasificarea unui ansamblu vag. Se vorbește în acest caz de Fuzificare. Funcția de apartenență m dă o pondere unei anumite valori de intrare a variabilei x . Variabila x poate lua valori într-o mulțime numită univers de discuție (sau de discurs) U_x .

Astfel, funcțiile de apartenență sunt funcții definite pe universul de discuție U_x cu valori în intervalul $(0, 1)$, prin diverse expresii [39,40,41]:

$$m_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (3.1)$$

Unde:

A este mulțimea Fuzzy căreia i se asociază funcția de apartenență $m_A(x)$. Universul de discuție U_X poate fi o mulțime continuă infinită sau o mulțime discretă de valori.

O mulțime Fuzzy A este mulțimea de perechi de forma:

$$A = \{(x, m_A(x))\} \quad (3.2)$$

Unei valori lingvistice i se poate atașa o mulțime Fuzzy.

Se poate spune deci, că o variabilă lingvistică este definită de cvadruplul, (X, L_X, U_X, f_{sX}) , unde:

- X semnifică *numele (simbolic) al variabilei lingvistice*, de exemplu vârsta, înălțimea, viteza, temperatura, eroarea, variația erorii etc.

- L_X este o mulțime de valori lingvistice pe care le poate lua X . O valoare lingvistică reprezintă un simbol pentru o proprietate particulară a lui X . În cazul variabilei lingvistice temperatura putem avea:

$$L_X = (\text{rece}, \text{răcoros}, \text{confortabil}, \text{cald}, \text{fierbinte}).$$

Unui element arbitrar din L_X , notat l_X îi corespunde o mulțime Fuzzy A_X .

- U_X este domeniul fizic în care semnalul asociat variabilei lingvistice X ia valori (în sensul uzual al reprezentărilor cantitative exacte). În cazul variabilei lingvistice temperatura introdusă mai sus, U_X poate fi intervalul $(10^\circ \text{C}, 35^\circ \text{C})$. U_X poate fi discret sau continuu.

- Corespondența dintre valoarea lingvistică în termenii cantitativi ai elementelor lui U_X și mulțimea Fuzzy corespunzătoare A_X se face cu ajutorul unei funcții semantice f_{sX} , care dă un sens, o interpretare acestei valori lingvistice. Cu alte cuvinte, această funcție semantică ia un simbol ca și argument, de exemplu rece, și oferă interpretarea simbolului rece în termenii unei mulțimi Fuzzy [15,16,17].

În locul lui A_X se utilizează adesea și funcția de apartenență m_A , fără explicitarea unui argument.

Pentru mulțimea Fuzzy A_X , cu variabila x se utilizează frecvent și notațiile:

$$A_X = \sum_{U_X} m_A(x)/x, \text{ pentru cazul lui } U_X \text{ discret și:} \quad (3.3)$$

$$A_X = \int_{U_X} m_A(x)/x \text{ în cazul lui } U_X \text{ continuu.} \quad (3.4)$$

Operații cu mulțimi Fuzzy

Operațiile cu mulțimi Fuzzy propuse de Zadeh sunt:

- *Intersecția*, definită de relația:

$$m_{A \cap B}(x) = \min(m_A(x), m_B(x)) \quad (3.3)$$

- *Reuniunea*:

$$m_{A \cup B}(x) = \max(m_A(x), m_B(x)) \quad (3.4)$$

- *Complementarea*:

$$m_{A'}(x) = 1 - m_A(x) \quad (3.5)$$

La aceste operații devenite clasice s-au mai adăugat operații mai generale, cum ar fi norme și co-norme T și S .

Operatori de întărire

O întărire lingvistică sau o modificare este o operație, care modifică înțelesul

unui termen sau mai general a unei mulțimi Fuzzy. Dacă A este o mulțime Fuzzy atunci modificatorul M generează termenul compus $B=M(A)$. Rezultatul unei operații de întărire este tot o mulțime Fuzzy.

Următoarele operații au fost introduse:

- *Normalizare*:

$$Norm(A) = \frac{mA}{h_A} \quad (3.6)$$

unde h_A (înălțimea lui A) este valoarea maximă de apartenență din mulțimea A .

- *Concentrare*:

$$Con(A) = A^2 = m_A^2(x) \quad (3.7)$$

- *Dilatare*:

$$Dil(A) = A^{0,5} = \sqrt{m_A(x)} \quad (3.8)$$

- *Intensificarea contrastului*:

$$Intc(A) = 2m_A(x) + [1 - 2|1 - m_A(x)|^2] \quad (3.9)$$

Cu acești operatori se pot defini diverse mulțimi Fuzzy, cum ar fi de exemplu:

$$\begin{aligned} \text{foarte } A &= Con(A) = A^2 = \{(x, m_A^2(x))\} \\ \text{mai mult sau mai puțin } A &= Dil(A) = A^{0,5} = \{(x, m_A^{0,5}(x))\} \\ \text{plus } A &= A^{1,25} = \{(x, m_A^{1,25}(x))\} \\ \text{foarte foarte } A &= A^4 = \{(x, m_A^4(x))\} \\ \text{foarte}^n A &= A^{2n} = \{(x, m_A^{2n}(x))\} \\ \text{minus } A &= A^{0,75} = \{(x, m_A^{0,75}(x))\} \\ &\text{și altele.} \end{aligned}$$

Dacă considerăm de pildă valoarea lingvistică *bătrân* pentru mărimea lingvistică *vârstă*, și dacă *bătrân* corespunde unui om cu *vârsta* între 60 și 80 de ani, *foarte bătrân* ar corespunde unei vârste între 80 și 100 de ani și *foarte foarte bătrân* unei vârste de peste 100 de ani. Cineva care are gradul de apartenență la *bătrân* de 1/2 va avea gradul de apartenență de 1/4 la *foarte bătrân* și de 1/16 la *foarte foarte bătrân* [42,43,44].

3.3.2.2. Deduceri Fuzzy (inferențe)

În general, mai multe variabile lingvistice, convenabil definite prin funcții de apartenență, sunt legate între ele prin reguli, înainte de a se trage concluziile. Se vorbește în acest caz de deducții Fuzzy, sau inferențe. În acest context, se pot distinge în mare tipuri de operațiuni logice: cu o singură regulă și respectiv cu mai multe reguli [48,49,50].

Operațiunea logică cu o singură regulă apare atunci când trebuie comparate mai multe obiecte concurente într-o anumită situație și trebuie ales optimul. Evident, variabilele care determină situația sunt variabilele lingvistice (variabilele Fuzzy). Această problemă se întâlnește în domeniul netehnic, cum ar fi de exemplu cumpărarea unui aparat, investirea unor bani în acțiuni, angajarea personalului etc.

Dacă x_1, \dots, x_n sunt variabilele lingvistice pentru evaluarea unei anumite situații, criteriul u pentru luarea deciziei poate fi formulat printr-o regulă.

Forma exactă a acestei reguli depinde evident de problema în studiu. Ea este subiectivă și are un anumit grad de arbitrar [51,52,53].

Fiecărei variabile i se atribuie o funcție de apartenență $m_{A_i, \dots, X_{A_n}}$, unde

A_1, \dots, A_n sunt mulțimile Fuzzy definite de funcțiile de apartenență corespunzătoare. Valorile numerice, gradele de apartenență, sunt diferite pentru fiecare obiect concurrent. Gradul de apartenență m_B pentru criteriul de evaluare u se poate determina numai cu reguli de calcul. Se poate alege atunci, de exemplu, obiectul concurrent pentru care gradul de apartenență este maxim [17,18].

Inferența cu mai multe reguli apare atunci când sunt mai multe variabile, care iau mai multe valori și decizia trebuie luată diferit, în funcție de valorile pe care le iau aceste variabile. Acest caz apare în probleme de conducere.

Regulile pot fi exprimate în forma generală:

*operație := dacă condiție 1, atunci operație 1, sau
dacă condiție 2, atunci operație 2, sau
dacă condiție n, atunci operație m.*

Condițiile pot depinde de una sau mai multe variabile. În al doilea caz, variabilele sunt legate între ele prin operatorii logicii Fuzzy [53,54].

Fiecărei variabile îi sunt atribuite funcții de apartenență, ținând cont de ansamblul vag format de aceste variabile. Inferențele cu mai multe reguli sunt caracterizate prin faptul că în general mai multe reguli sunt simultan verificate. În urma inferenței rezultă o mulțime Fuzzy. Pentru obținerea ca rezultat a unui singur număr real este necesară a fi efectuată o operație care trebuie să țină cont de diferitele condiții și care se obține prin regulile de calcul ale logicii Fuzzy [55,56].

3.3.2.3. Reguli de inferență generale

Există două reguli de inferență care sunt utilizate în mod frecvent în teoria mulțimilor Fuzzy: *modus ponens generalizat* și *regula inferenței de compoziție*. Ultima se consideră un caz particular al primei.

Modus ponens generalizat are următoarea schemă de inferență:

S_1 este Q_1 ,
dacă S_1 este P_1 atunci S_2 este P_2 ,
 S_2 este Q_2 ;

sau utilizând o relație logică:

$$\{(S_1 = Q_1) \wedge [(S_1 = P_1) \Rightarrow (S_2 = P_2)]\} \Rightarrow (S_2 = Q_2) \quad (3.10)$$

Această schemă de inferență poate fi interpretată astfel: "Dacă S_1 are proprietatea Q_1 și dacă este îndeplinită implicația "dacă S_1 are proprietatea P_1 atunci S_2 are proprietatea P_2 " atunci S_2 are proprietatea Q_2 ", unde S_1 și S_2 sunt subiecte și P_1, P_2, Q_1 și Q_2 sunt proprietăți caracterizate de mulțimi Fuzzy [57].

Regula de inferență de compoziție apare în general astfel:

S_1 este P ,
 S_1 este R S_2 ,
* S_2 este Q ;

unde se folosește o relație Fuzzy R în loc de reguli *dacă...atunci...* Această regulă de inferență poate fi interpretată astfel: "Dacă S_1 are proprietatea P și dacă S_1 este într-o anumită relație Fuzzy R cu S_2 , atunci, pe baza acestor considerente, S_2 va avea proprietatea Q ".

În general nu se pot reprezenta regulile *dacă...atunci...* printr-o relație Fuzzy.

În multe lucrări se propun diverse moduri de a trata regula de inferență de compoziție. Două din metodele mai des întâlnite sunt metoda "*maxim-minin*" și respectiv metoda "*maxim-produs*".

3.3.2.4 Defuzificare

Sarcina interfeței de defuzificare este de a găsi o singură valoare exactă, care să cuprindă mulțimea Fuzzy care rezultă la ieșire.

În practică s-au dezvoltat câteva metode de defuzificare, dintre care în continuare se vor prezenta câteva dintre ele, scoțându-se în evidență și calitățile lor. Acestea sunt [42,43,44,58]:

- metoda centrului de greutate (CG);
- metoda centrului sumelor (CS);
- metoda de defuzificare de înălțime (DI);
- metoda centrului suprafeței celei mai mari (CSCM);
- metoda primului din maxime (PM);
- metoda maximului din mijloc (MM).

Presupunem că se definește un set de m reguli:

dacă x_1 este I_{x1}^k ai ... ai x_n este I_{xn}^k atunci u este I_u^k , unde $k = 1, \dots, m$, activarea acestor reguli cu valori exacte la intrare x_1^*, \dots, x_n^* va avea ca rezultat m mulțimi Fuzzy notate B_u^1, \dots, B_u^m . Reuniunea acestor mulțimi Fuzzy se va nota cu \underline{B}_u sau m_u :

$$\underline{B}_u = \bigcup_{k=1}^m B_u^k \quad (3.11)$$

și ea corespunde funcției de apartenență combinată.

Timpul de calcul în metodele de defuzificare

În cazul utilizării inferenței max-prod împreună cu funcții de apartenență liniare pe porțiuni și metoda de defuzificare a centrului sumelor timpul de calcul este redus. Utilizând inferența maxim-minim și funcții de apartenență mai complexe timpul de calcul va crește de aproape 100 de ori [42,43,44].

Compararea și evaluarea metodelor de defuzificare

În continuare se vor prezenta avantajele și dezavantajele metodelor de defuzificare. Înainte de a face aceasta, trebuie prezentate criteriile pe care trebuie să le satisfacă o metodă de defuzificare ideală. Se poate spune că nici una din metodele enumerate mai înainte nu satisface toate criteriile [42,43,44].

Criteriile pentru metodele de defuzificare sunt:

1. *Continuitatea*: O mică variație a mărimilor de intrare ale regulatorului Fuzzy nu trebuie să dea o variație mare a mărimii de ieșire. De exemplu, în cazul unui regulator Fuzzy cu două intrări x_1 și x_2 și o ieșire u , când două valori ale intrărilor (x_{11}, x_{21}) ai (x_{12}, x_{22}) diferă puțin, atunci valorile corespunzătoare de ieșire u_1 și respectiv u_2 nu trebuie să difere mult [45,46]:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 : |x_{11} - x_{12}| < \delta \wedge |x_{21} - x_{22}| < \delta \Rightarrow |u_1 - u_2| < \varepsilon \quad (3.12)$$

2. *Dizambiguitatea*: O metodă de defuzificare este dizambiguă dacă algoritmul de găsimă a lui u^* este bine definit. Acest criteriu nu este satisfăcut de metoda centrului suprafeței celei mai mari.

3. *Plauzibilitatea*: Fiecare ieșire defuzificată are o componentă orizontală și o componentă verticală. Se definește u^* ca fiind plauzibil dacă se află aproximativ în mijlocul mulțimii suport a lui \underline{B}_u și are un grad de apartenență mare în \underline{B}_u . Metoda centrului de suprafață, de exemplu, nu satisface câteodată această proprietate, deși centrul suprafeței se află în mijlocul mulțimii suport, gradul de apartenență poate fi cel mai mic posibil [42,43,44].

4. *Complexitatea calculului*: Acest criteriu este important în aplicațiile practice ale reguletoarelor Fuzzy. Metoda de înălțime, împreună cu metoda primului maxim sau maximul din mijloc sunt metode rapide, pe când metoda centrului de greutate este lentă. Complexitatea de calcul a centrului sumelor depinde de forma funcției de apartenență de ieșire [42,43,44,45].

5. *Ponderarea în calcule*: Un criteriu diferit este cel numit al ponderării mulțimilor Fuzzy de ieșire, criteriu care dă și diferența dintre metoda centrului de greutate și metoda centrului sumelor. O metodă de defuzificare ponderează calculul dacă ea însumează părțile care se suprapun în mulțimea Fuzzy de ieșire B_u . Metoda centrului sumelor și metoda de înălțime au această proprietate.

Tabelul 3.1. prezintă o comparație în metodele de defuzificare amintite anterior. Din acest tabel rezultă că metoda de înălțime ar fi una din cele mai avantajoase metode. Singurul dezavantaj este faptul că valoarea defuzificată nu are în mod necesar gradul de apartenență maxim. În reguli de bază bune, acest dezavantaj nu joacă nici un rol, deoarece regulile bune produc întotdeauna mulțimi Fuzzy.

Tabelul 3.1 Criteriile pentru metodele de defuzificare

| Nr | Criteriile | CG | CS | MM | PM | DI | CSCM |
|----|----------------|----|----|----|----|----|------|
| 1. | Continuitate | da | da | nu | nu | da | nu |
| 2. | Dizambiguitate | da | da | da | da | da | nu |
| 3. | Plauzibilitate | da | da | nu | nu | da | nu |
| 4. | Complex. Calc. | da | nu | nu | nu | nu | da |
| 5. | Ponderarea | nu | da | nu | nu | da | nu |

3.4 Aplicarea logicii Fuzzy în reglare

3.4.1 Generalități

Reglarea Fuzzy este o versiune simplificată a logicii Fuzzy, prin aceea că în reglarea Fuzzy se folosește o singură metodă de inferență, care este o combinație între valori exacte de intrare și reguli *dacă - atunci*. Aceste reguli sunt reprezentate printr-o relație Fuzzy binară [42,43,44].

Revenind la schema de principiu a unui regulator Fuzzy aceasta se poate prezenta ca în figura 3.2.

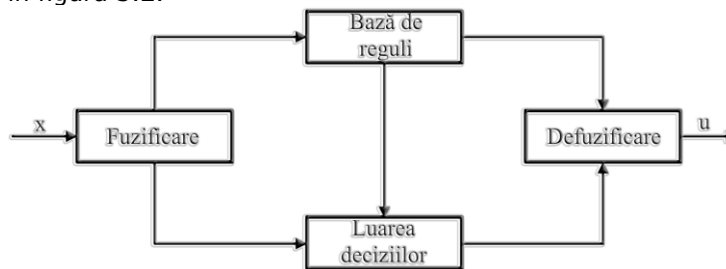


Fig. 3.2 Schema de principiu a unui regulator Fuzzy

Pe baza reprezentării din figura 3.2 se poate spune că un regulator Fuzzy de bază constă din:

Baza de reguli:

- Ea este alcătuită din toate regulile *dacă - atunci*. În premize sau antecedente sunt introduse valorile de intrare x , astfel încât să se poată decide care regulă poate fi utilizată și care nu și în ce mod anume poate fi utilizată. Ieșirile

regulilor care au fost activate sunt puse împreună și trimise spre interfața de defuzificare [42,43,44,45].

Fuzificarea: Intrările $(w,y)^T$ nu sunt mulțimi Fuzzy ci valori reale precise. Deci ele trebuie fuzificate, adică lor trebuie să li se atribuie valori Fuzzy. Aceste valori Fuzzy se introduc în premisele *dacă - atunci*, ca și rezultat se determină care regulă poate fi activată împreună cu gradul de apartenență rezultat de la fiecare regulă. Acest grad depinde de cât de mult intrarea și premisele regulii corespund una alteia [42,43,44,46].

Luarea deciziei: Regulile care pot fi activate în concordanță cu interfața de fuzificare pot fi activate prin interfața de luare a deciziilor, fiecare cu o forță particulară. Forța determină gradul de influență a concluziei unei reguli particulare în concluzia generală a sistemului. În mod obișnuit aceasta se face în felul următor. Să spunem că forța este 0,6, atunci mulțimea de ieșire B este limitată la 0,6 sau toate gradele de apartenență sunt înmulțite cu 0,6, adică cu cele două metode de inferență min sau produs:

$$m_B(u) = \min(0,6; m_B(u)) \text{ sau } m_B(u) = 0,6 \times m_B(u)$$

Rezultatul acestei operații este o mulțime Fuzzy cu gradul de apartenență maxim limitat.

Se fac de asemenea operații de reuniune sau utilizând norme S sofisticate și rezultatele sunt tratate de interfața de defuzificare.

Defuzificarea: mulțimea Fuzzy care vine spre a fi defuzificată are o formă foarte complicată, deoarece ea este o combinație de câteva mulțimi cu grade de apartenență limitate, așa cum s-a descris mai sus. Scopul interfeței de defuzificare este de a găsi o singură valoare reală precisă u care să cuprindă mulțimea Fuzzy de ieșire. Așa cum s-a prezentat anterior există mai multe metode de defuzificare, fiecare cu avantajele și dezavantajele ei. Cea mai frecvent utilizată este metoda centrului de greutate [23,42,43,44,46].

3.4.2 Definirea prin funcții de apartenență a variabilelor de intrare și de ieșire

Primul lucru care trebuie făcut în reglarea Fuzzy este definirea domeniilor variabilă Fuzzy care ia 7 valori Fuzzy, atât de intrare cât și de ieșire. Pentru valori negative cât și pozitive se pot introduce 7 mulțimi Fuzzy: **negativ mult NB, negativ mediu NM, negativ puțin NS, aproximativ zero ZE, pozitiv puțin PS, pozitiv mediu PM și pozitiv mult PB**, care pot avea diverse forme, ca în exemplul din figura 3.3.

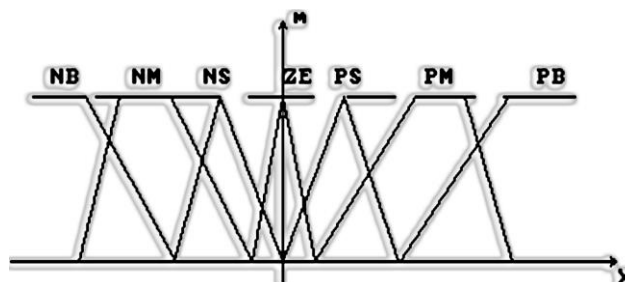


Fig. 3.3 Forme ale funcțiilor de apartenență

În același mod se pot defini 5 valori Fuzzy: *NB, BS, ZE, PS și PB*, sau respectiv trei: *negativ NG, aproximativ zero ZE și pozitiv PO*.

O împărțire mai fină a intervalului pentru o variabilă Fuzzy, adică utilizarea a mai mult de șapte valori Fuzzy, nu aduce nici o ameliorare a comportamentului dinamic al reglării. Din contra, o astfel de alegere complică formularea regulilor de inferență .

Funcțiile de apartenență pot fi simetrice și distribuite într-o manieră echidistantă (figura 3.4) cu acoperire unitară. Această reprezentare se recomandă să se aleagă pentru o primă analiză, ea urmând a fi schimbată după caz, odată cu modificarea strategiei de reglare. Pentru obținerea unui comportament optim în reglare, în final se poate ajunge să se utilizeze funcții de apartenență nesimetrice și cu o distribuție ne-echidistantă, chiar și cu factor de acoperire variabil. Trebuie să se evite lacunele sau spațiile goale între funcțiile de apartenență vecine (figura 3.5). Acestea provoacă zone moarte, de neintervenție a regulatorului, ceea ce conduce adesea la instabilitatea reglării. O posibilă regulă de alegere ar fi ca funcțiile de apartenență să se întrepătrundă cu 25%. De asemenea trebuie să se evite zonele cu grade de apartenență 1 lipite una de alta (figura 3.5). Aceasta conduce la o aplatizare a caracteristicilor regulatorului [42,43,44,47].

O altă regulă ar fi ca suma gradelor de apartenență pentru o valoare din universul de discuție să fie 1 (acoperire unitară).

Funcțiile de apartenență prezintă o anumită cuantificare datorată conversiei analog-numeric și reprezentării numerice a funcțiilor de apartenență (figura 3.6) Această cuantificare este mai pronunțată când se lucrează pe un număr redus de biți. În general alegerea funcțiilor de apartenență pentru mărimile de intrare și de ieșire se face după experiența operatorului.

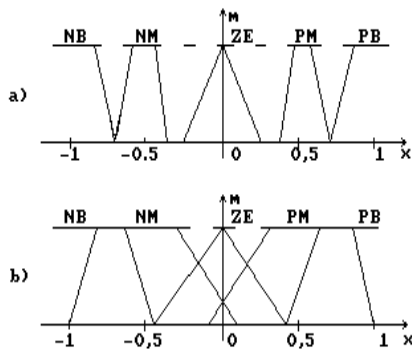


Fig. 3.4 Funcții de apartenență simetrice

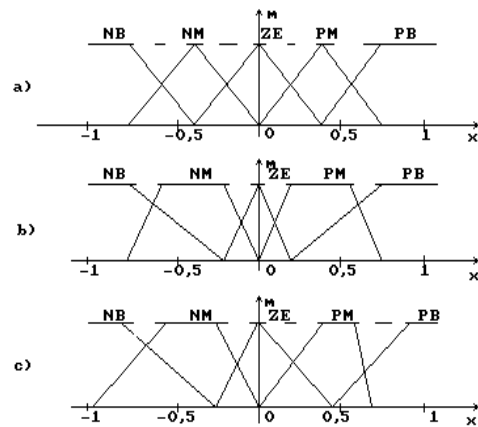


Fig. 3.5 Funcțiile de apartenență asimetrice

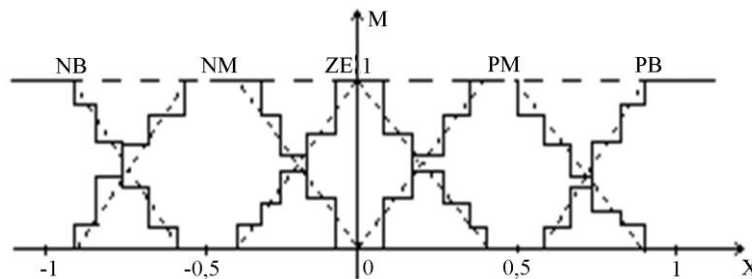


Fig. 3.6 Funcții de apartenență cuantificate [15]

3.4.3 Inferența

Strategia de reglare include ca element esențial metoda de inferență adoptată. Ea leagă mărimile de intrare măsurate, care sunt variabilele de intrare Fuzzy x (transformate în variabile lingvistice prin Fuzzyficare), de variabila de ieșire u , exprimată și ea lingvistic.

Formularea concretă a inferenței depinde evident de comportamentul static și dinamic al sistemului condus și al organelor de comandă, cât și de scopurile reglării avute în vedere. Nu este posibil să se indice reguli precise. Experiența joacă un rol important. Stabilirea inferențelor poate avea loc iterativ printr-o modificare a strategiei de reglare.

În continuare se prezintă diferite posibilități de a exprima inferențele, prin descriere lingvistică sau simbolică, prin matrici și tabele de inferențe. Se descrie tratarea numerică prin diverse metode cum ar fi: inferența max-min, max-prod sau suma-prod.

3.4.3.1 Metode de descriere a inferenței

Descrierea lingvistică a inferenței. Descrierea lingvistică a unei reguli constă în faptul că fiecare regulă are o premiză în care apare o condiție precedată de simbolul *dacă* și o concluzie, în care apare o operație, o acțiune, precedată de simbolul *atunci*. În cazul mai multor reguli acestea se leagă prin conjuncția "SAU".

Descrierea simbolică a inferenței. Descrierea lingvistică a inferenței este în general mai greoaie. Prin descrierea simbolică se obține o anumită simplificare în scriere. Valorile Fuzzy sunt utilizate prin simbolul lor:

Dacă ($x_1=NG$ și $x_2=ZE$), *atunci* $u=PG$, *sau*
dacă ($x_1=NG$ și $x_2=PM$), *atunci* $u=PM$, *sau*

Descrierea simbolică este mai compactă și în consecință este caracterizată de o mai mare claritate.

Descrierea prin matrice de inferență. O simplificare a descrierii inferenței se obține cu ajutorul unei reprezentări grafice, numită matrice de inferență, baza de reguli sau tabel de reguli. Tabelul 3.2 prezintă această matrice de inferență pentru un exemplu ipotetic cu două mărimi de intrare și o mărime de ieșire.

La intersecția unei coloane cu o linie se găsesc valorile Fuzzy ale variabilei de ieșire u , legate de valorile variabilelor de intrare x_1 și x_2 . Variabilele de ieșire sunt legate prin operatorul ȘI, iar regulile sunt combinate prin operatorul SAU, pentru a obține variabila de ieșire.

Dacă toate pozițiile matricii sunt completate se discută de reguli de inferență complete. În caz contrar este vorba de reguli de inferență incomplete. Pentru sectoarele în care nici o regulă de inferență nu este definită, se obține totuși o valoare bine determinată pentru semnalul de ieșire prin defuzificare. La limită, această valoare poate fi zero.

Dacă există mai mult de două variabile trebuie să juxtapse mai multe matrici de inferență.

Acest gen de descriere devine complicat când sunt mai mult de trei variabile de intrare și dacă acestea sunt împărțite în mai multe valori Fuzzy.

Tabelul 3.2 Exemplu ipotetic cu trei variabile de intrare $x_{1,2,3}$ și două variabile de ieșire $u_{1,2}$. [16]

| Regula nr. | x_1 | x_2 | x_3 | u_1 | u_2 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | NB | ZE | NB | PB | NB |
| 2 | NG | ZE | ZE | PB | NB |
| 3 | NB | ZE | PB | ZE | NB |

3.4.3.2 Metode de inferență utilizate în reglarea Fuzzy

Există mai multe posibilități de a realiza operațiile de inferență care se aplică funcțiilor de apartenență. Metoda de inferență precizează cum sunt utilizați diferiți operatori într-o inferență, permițând prelucrarea numerică cu calculatorul.

Pentru reglarea Fuzzy se utilizează în general una din metodele următoare :

- metoda de inferență max-min;
- metoda de inferență max-produs;
- metoda de inferență suma-produs.

Aceste metode permit tratarea numerică cu calculatorul a inferenței.

3.5 Structuri complexe de conducere bazate pe logica Fuzzy

Se poate face o clasificare a sistemelor de conducere bazate pe logica Fuzzy în 7 tipuri, numindu-se regulatoare lingvistice. Prin regulator Fuzzy lingvistic se înțelege un sistem expert Fuzzy care poate fi simplu, conținând numai câteva reguli "dacă...atunci" sau unul complicat, care conține câteva sute de reguli [42,43,44].

Tipul 1: Sisteme de conducere pentru selectarea intrării. Figura 3.7 prezintă arhitectura unui sistem de conducere Fuzzy a cărui scop este de a selecta intrarea adecvată dintr-un set de funcții de intrare sau o valoare specifică ca ieșire a unei alegeri finite de parametri. O astfel de structură a fost utilizată de L. A. Zadeh și respectiv M. Sugeno în exemplul teoretic al conducerii unui vehicul. P. Wang a utilizat această structură pentru reglarea unui motor de curent continuu într-un sistem de urmărire a țintei.

Tipul 2: Sistem de conducere cu eroare după ieșire. Acest tip este cel mai popular, fiind studiat de mulți cercetători și la el se face referire când se vorbește de "sistem de reglare Fuzzy". Scopul fundamental al acestei arhitecturi prezentată în Figura 3.8 este de a genera o intrare de comandă bazată pe informația de eroare după ieșire rezultată din reacția negativă.

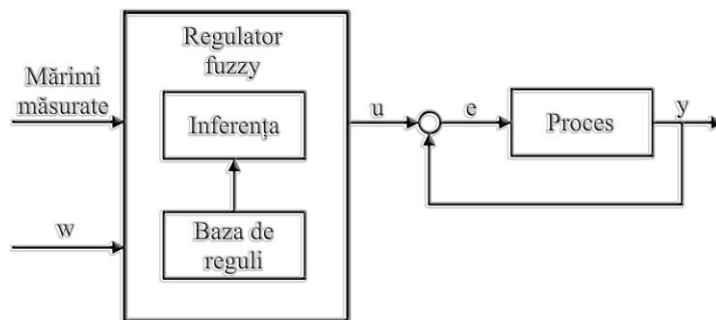


Fig. 3.7 Sistem de conducere pentru selectarea intrării

În mod obișnuit, eroarea după ieșire, viteza de variație a erorii sau integrala erorii (configurații PID) sunt utilizate pentru a determina o intrare de comandă mai acceptabilă pentru procesul în buclă deschisă. Intrarea w a sistemului este în mod obișnuit o intrare dorită sau de referință. Acest sistem a fost tratat pe larg în paragrafele anterioare ale capitolului.

Tipul 3: Sisteme pentru controlul parametrilor proceselor. Mai rar discutate

în literatura de specialitate, se pot considera că o aplicație inovatoare a reglării Fuzzy ar putea conduce la aplicații practice utile. Schema bloc a acestora este prezentată în Figura 3.9.

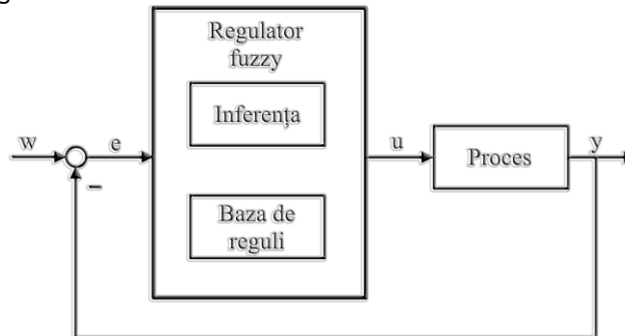


Fig. 3.8 Sistem de conducere cu eroare după ieșire

Tipul 4: Sisteme Fuzzy pentru alegerea celui mai bun compensator. Acest tip de sisteme este prezentat în figura 3.10 și este similar cu tipul al treilea, cu deosebirea că decizia este aplicată unui compensator sau unui subsistem.

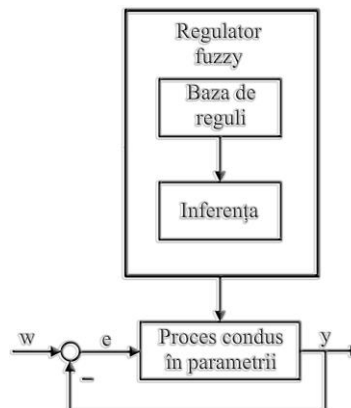


Fig. 3.9 Sisteme pentru controlul parametrilor proceselor

Tipul 5: Conducere Fuzzy cu indice multiplu de performanță. Tipul al cincilea (figura 3.11) este mai robust în două privințe: el asigură un model matematic, care în mod normal nu este disponibil sau dificil de obținut analitic. Acest tip permite introducerea unor indici de performanță multipli, într-o manieră adaptivă, cum ar fi:

- consumul de energie;
- securitatea;
- confortul;
- cerințe speciale pentru un anumit sistem.

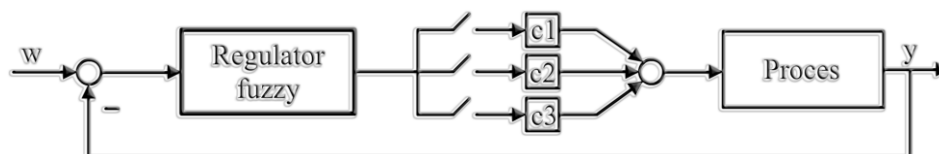


Fig. 3.10 Sisteme Fuzzy pentru alegerea celui mai bun compensator

Exemplul cel mai bun pentru acest tip îl reprezintă conducerea metroului Sendai, realizată de firma Hitachi în Japonia, proiectată numai cu 8 reguli. Conducerea sistemului electromecanic este realizată prin optimizarea mai multor indici de performanță, care asigură satisfacerea cerințelor consumatorilor și economia de energie în același timp.

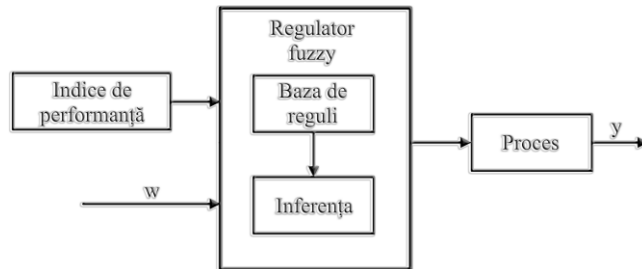


Fig. 3.11 Conducere Fuzzy cu indice multiplu de performanță

Tipul 6: Reguli lingvistice Fuzzy ca model matematic pentru sisteme cu dinamica complexă sau necunoscută. În tipul al șaselea se încadrează sisteme Fuzzy modele pentru sisteme greu de modelat cu metode cunoscute. Exemple pentru tipul al șaselea sunt sistemele de reglare a temperaturii cuptoarelor de tratament termice și a furnalelor, unde reglarea automată a ciclului de temperaturi este extrem de dificilă cu teoria convențională a reglării. În Japonia o astfel de structură se utilizează într-o uzină de purificare a apelor, în care se folosesc în total 47 de reguli Fuzzy pentru a controla cantitatea de clor adăugată apei [42,43,44].

Tipul 7: Sisteme de conducere Fuzzy de nivel ridicat Scopul tipului șapte prezentat în figura 3.15 este de conduce nu unul ci mai multe sisteme de reglare convenționale.

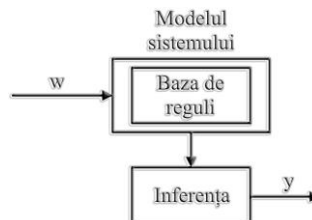


Fig. 3.12 Modelul sistemului Fuzzy

Cel mai bun exemplu pentru acest tip este reglarea Fuzzy a unui grup de ascensoare, realizată de firma Mitsubishi Electric Co. Acest sistem reduce timpul mediu de așteptare a ascensoarelor cu aproape 20% și face ca un pasager să nu aștepte mai mult de 60 de secunde pentru un ascensor.

Clasificarea efectuată mai sus poate fi lărgită și cu alte tipuri. Din aceste exemplificări se vede că în practică la ora actuală logica Fuzzy a ajuns să fie utilizată în cele mai sofisticate sisteme de conducere [21,43,44,48].

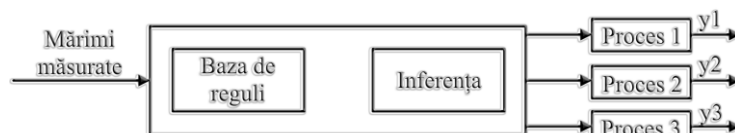


Fig. 3.13 Sisteme de conducere Fuzzy de nivel ridicat

3.6 Concluzii

Din studiul efectuat referitor la sisteme Fuzzy din procesul turnării continue și prezentat în sinteză în acest capitol, se desprind următoarele concluzii:

- regulatorul Fuzzy, spre deosebire de un regulator clasic, nu tratează informația printr-o relație matematică bine definită (algoritm de reglare), ci utilizează inferențe cu mai multe reguli, bazându-se pe variabile lingvistice;
- primele aplicații ale logicii Fuzzy în sistemele de reglare au apărut în 1975 iar din 1985 japonezii au început să o utilizeze în procesele industriale pentru rezolvarea problemelor de conducere;
- în Europa, cercetările în aplicarea logicii Fuzzy în reglare au debutat mai târziu, de exemplu, pentru Germania anul demarării unor cercetări sistematice se consideră 1991;
- sistemele de reglare Fuzzy pot fi considerate de dată recentă și ca urmare cu cât se efectuează mai multe cercetări pot fi furnizate noi informații tehnice în acest domeniu.

PARTEA a II-a
CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND
CONDUCEREA PROCESULUI DE TURNARE
CONTINUĂ A OȚELULUI UTILIZÂND
SISTEMELE FUZZY

4. CERCETĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA CALITĂȚII SUPRAFEȚEI SEMIFABRICATELOR DE OȚEL TURNATE CONTINUU

4.1. Influența lungimii cristalizorului asupra grosimii crustei

4.1.1. Considerații tehnologice

În contact cu pereții reci ai cristalizorului, are loc o răcire puternică a oțelului lichid pe o înălțime de 140 ... 200 mm sub nivelul oțelului lichid (sub meniscul de oțel lichid). Răcirea se produce ca urmare a cedării de căldură prin conductibilitate, de la oțelul lichid la pelicula de zgură unguentă, de la aceasta la fața interioară a cristalizorului și în continuare apei de răcire, ceea ce asigură formarea și creșterea rapidă a crustei marginale cu cristale fine, uniforme și echiace, care formează zona I de solidificare. După parcurgerea acestei distanțe, crusta se desprinde de pereții cristalizorului și până la ieșirea din acesta are loc o răcire încetinită, datorită spațiului izolator de aer cedarea de căldură are loc prin radiație. În aceste condiții se formează zona a II-a de solidificare sau zona intermediară cu cristale columnare [59].

Această zonă este mult mai puțin întinsă, comparativ cu cea de la turnarea clasică, chiar dacă viteza de solidificare este mult mai mare, cristalele nu au timp să crească pe axele preferențiale de transmitere a căldurii (axe aproximativ perpendiculare pe crustă). Răcirea oțelului în cristalizor (răcirea primară) este deosebit de importantă pentru calitatea suprafeței semifabricatului (suprafață fără fisuri transversale, longitudinale, înfășurări etc.).

În zona de răcire secundară, semifabricatele se răcesc atât ca urmare a stropirii cu apă, cât și prin contact direct cu rolele masive de ghidare, când are loc solidificarea centrului firului. Această zonă este formată din cristale echiaxiale și neorientate de dimensiune mai mici decât la turnarea clasică, ea reprezintă zona a V-a de solidificare (luând în considerare turnarea clasică). Comparativ cu turnarea clasică, zona a V-a de solidificare conține mult mai puține impurități, deoarece o bună parte din ele se decantează în cristalizor și de asemenea segregarea este mai puțin pronunțată comparativ cu turnarea clasică (durata solidificării scăzute, respectiv viteza mare de solidificare) [59].

La ieșirea din cristalizor temperatura suprafeței semifabricatului este de circa 1200° C și de 900 – 1100° C după răcirea secundară, respectiv între rolele de îndreptare sau de tragere. Temperatura suprafeței semifabricatelor în zona de debitare este de 800-850° C, uniformizarea temperaturii pe toată secțiunea având loc în funcție de fluxul tehnologic aplicat, respectiv în cuptoarele cu propulsie când în fluxul tehnologic după turnare urmează procesul de laminare, respectiv în depozit când laminarea se desfășoară în altă unitate industrială siderurgică.

4.1.2. Prelucrarea datelor. Rezultate. Analiză tehnologică

În continuare se prezintă rezultatele prelucrării unor date [1,2,4,6] referitoare la turnarea continuă a oțelului în vederea obținerii unor relații de corelații între parametrii turnării. Prelucrarea datelor s-a efectuat în programele de calcul

EXCEL și MATLAB în vederea obținerii unor corelații simple și multiple, exprimate atât sub formă analitică cât și grafică și prezentate în lucrare sub ambele forme.

De menționat că toate corelațiile sunt reprezentative atât din punct de vedere a coeficienților de corelație cât și sensului tehnologic, chiar dacă punctele de extrem sau staționare nu sunt situate în intervalul tehnologic.

În figura 4.1 se prezintă dependența dintre căldura evacuată din cristalizor în funcție de viteza de turnare. Dependența este exprimată prin corelație polinomială de gradul 2. Domeniul de variație a parametrilor este foarte bine conturat, atât la partea superioară cât și la cea inferioară, fiecare fiind delimitat de o curbă exprimată sub formă analitică printr-o corelație de gradul 2.

În figura 4.2. se prezintă corelațiile obținute în programul de calcul EXCEL privind variația grosimii crusteții firului în funcție de lungimea cristalizorului, pentru diferite viteze de turnare. Din analiza tehnologică a corelațiilor se observă o descreștere a grosimii crusteții pe măsură ce viteza de turnare crește, ca urmare a reducerii posibilităților de evacuare a unei cantități mai mari de căldură.

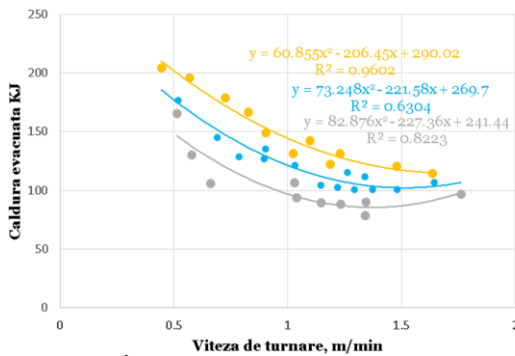


Fig. 4.1. Îndepărtarea căldurii din cristalizor

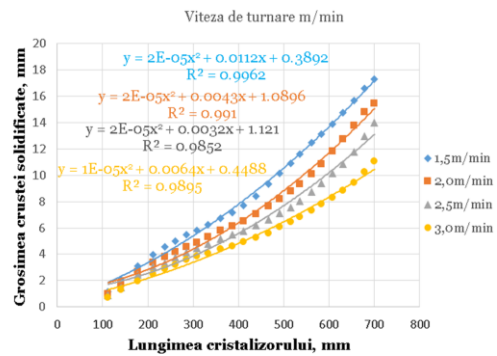


Fig. 4.2. Variația grosimii crusteții firului în funcție de lungimea cristalizorului

Se observă că vitezele mai mari de turnare conduc la o scădere uniformă a cantității de căldură distribuite. Această scădere se explică prin faptul că semifabricatele turnate cu viteză mare sunt în contact cu peretele răcit al cristalizorului o perioadă scurtă de timp și prin urmare, o cantitate mai mică de căldură poate fi îndepărtată pe unitatea de volum sau greutate de oțel, comparativ cu turnarea unui semifabricat turnat cu o viteză mai mică și care este mai mult timp în contact cu cristalizorul [59].

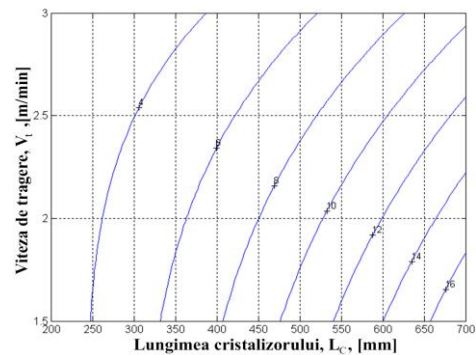
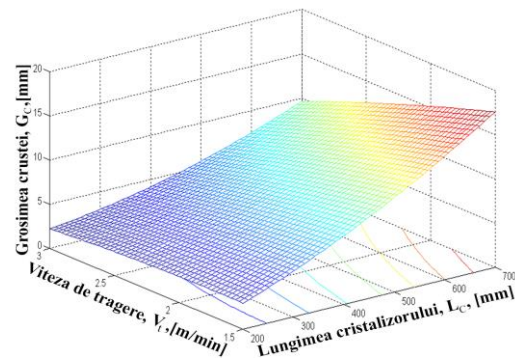


Fig. 4.3. Influența lungimii cristalizorului și vitezei de turnare asupra grosimii semifabricatului
De asemenea se constată că pentru aceeași viteză de turnare grosimea crusteii crește cu creșterea lungimii cristalizorului (crește durata răcirii primare), evident în limitele tehnice.

Aceleași date au fost prelucrate și în programul de calcul MATLAB în vederea obținerii unei corelații duble de gradul 2, grafic fiind reprezentată printr-o suprafață de regresie.

Ecuția de regresie este de forma:

$$Z = -0,45y^2 - 0,0096xy + 0,0283x + 3,4450y - 4,6339; \quad (4.1)$$

x – lungimea cristalizorului, mm; y – viteza de tragere, m/min;

z – grosimea crusteii, mm.

Punct de șa; x = 62,1780 mm; y = 3,1645 m/min; z = 1,6955 mm;

$R^2 = 0,9939$;

Din analiza datelor prezentate în figura 4.3 se observa că o creștere a lungimii cristalizorului și turnarea cu viteză mai mică determină o crustă groasă (peste 10mm). Este foarte important ca la turnarea continuă pentru un cristalizor dat (deci o lungime cunoscută stabilită) viteza de turnare pentru un semifabricat de secțiune cunoscută să depășească o anumită limită.

4.1.3. Concluzii

Analizând rezultatele obținute se pot concluziona următoarele:

- prin prelucrarea în programelor de calcul EXCEL și MATLAB, a datelor aferente parametrilor dependenți și independenți, specifici pentru turnarea continuă, se obțin corelații simple și multiple reprezentative, atât din punct de vedere a coeficienților de corelație cât și sensului tehnologic.

- corelațiile obținute pot fi utilizate în practica curentă și în mod deosebit în cercetare, ba mai mult se consideră că pot fi îmbunătățite și extinse.

4.2. Analiza factorilor de influență asupra vâscozității zgurilor de lubrifiere

4.2.1. Considerații tehnologice

Pentru a evita prinderea semifabricatului de suprafața interioară a cristalizorului, fața interioară a acestuia se unge cu ulei de rapiță, tehnologie veche, frecvent utilizând-se așa numitele prafuri de lubrifiere, care se adaugă în cristalizor, preiau căldură de la oțelul lichid, se zgurifică și zgura rezultată se interpune între fața interioară a cristalizorului și crusta semifabricatului, sub forma unei pelicule/film (cu grosime de câțiva microni) împiedicând astfel prinderea acestuia la peretele cristalizorului. Prinderea semifabricatului la fața interioară a cristalizorului este evitată și de oscilația cristalizorului (mișcarea în jos și în sus), aceasta fiind un factor foarte important la turnarea continuă a semifabricatelor din oțel.

Reducerea aderenței dintre crusta firului (semifabricatului) și peretele cristalizorului, previne tensiunile de tracțiune prea ridicate în crusta de oțel care ar putea genera fisuri pe suprafața semifabricatului, sau chiar la o ruptură a crusteii firului [60].

Calitatea suprafeței semifabricatelor turnate continuu este influențată, pe lângă o serie de factori tehnologici și de caracteristicile prafurilor de turnare [60].

Prafurile de turnare utilizate la turnarea continuă a oțelurilor, au un rol

complex, ele trebuind să asigure:

- prevenirea reoxidării oțelului la turnarea continuă;
- captarea și reținerea incluziunilor nemetalice din oțelul lichid;
- izolarea termică;
- asigurarea transferului termic;
- lubrifierea între crusta de oțel solidificată și peretele cristalizorului.

Pentru a răspunde acestor cerințe, prafurile de turnare continuă trebuie analizate având în vedere următoarele caracteristici: fuzibilitatea, vâscozitatea, tensiunea superficială și interfacială, capacitatea de absorbție a incluziunilor. Aceste proprietăți, la rândul lor, sunt în mare măsură determinate de compoziția chimică și mineralogică, repartitia granulometrică, umiditatea fizică și chimică a prafului și respectiv a zgurii rezultate din topirea prafului de turnare [60].

Deși comportarea reală a prafului de turnare reprezintă rezultanta acțiunii tuturor acestor caracteristici, este necesar ca ele să fie studiate fiecare în parte și apoi analizate prin interferențele dintre ele [60].

Din punct de vedere al compoziției chimice, prafurile sau mai exact zgurile din praf de turnare continuă fac parte din domeniul zgurilor metalurgice reducătoare, adică din sistemul SiO_2 - CaO - Al_2O_3 . În afara celor trei oxizi de bază, prafurile de turnare continuă mai conțin MgO , Na_2O , CaF_2 , C , MnO , Fe_2O_3 , B_2O_3 , etc. Prezența acestor componenți modifică caracteristicile rezultate din sistemul SiO_2 - Al_2O_3 - CaO , ei influențând fiecare în alt mod celelalte proprietăți ale zgurii rezultate din topirea prafului [60].

4.3.2. Cercetări și rezultate

Cercetările efectuate au avut în vedere stabilirea unor dependențe între vâscozitate și compoziția chimică respectiv temperatura zgurii.

Pentru stabilirea unor corelații mai precise între temperatură, conținutul de MgO și Al_2O_3 respectiv CaO/SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ din zguri, au fost prelucrate o serie de date experimentale de la prafuri obținute după rețete proprii utilizate la turnarea continuă, în programele de calcul EXCEL și MATLAB, ceea ce a permis stabilirea unor dependențe reprezentate atât grafic cât și analitic [61].

Prin prelucrarea datelor în programul EXCEL au rezultat corelații simple exprimate prin funcții polinomiale de gradul 1,2,3 și exponențiale, prezentate în continuare atât sub formă grafică cât și analitică. De menționat că sunt prezentate cele mai semnificative corelații (figurile 4.4 – 4.9) atât din punct de vedere a valorilor pentru coeficienți de corelație cât și din punct de vedere tehnologic.

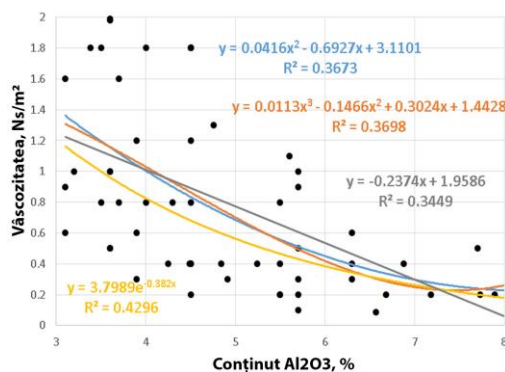


Fig. 4.4. Corelația $\eta=f(\text{Al}_2\text{O}_3)$

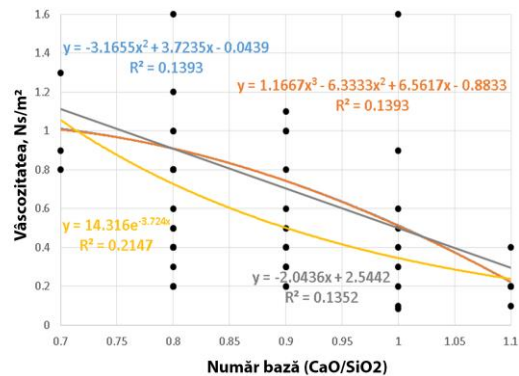


Fig. 4.5. Corelația $\eta=f(\text{CaO/SiO}_2)$

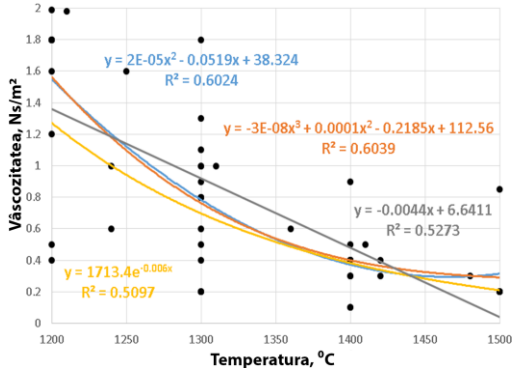


Fig. 4.6. Corelația $\eta=f$ (Temperatura)

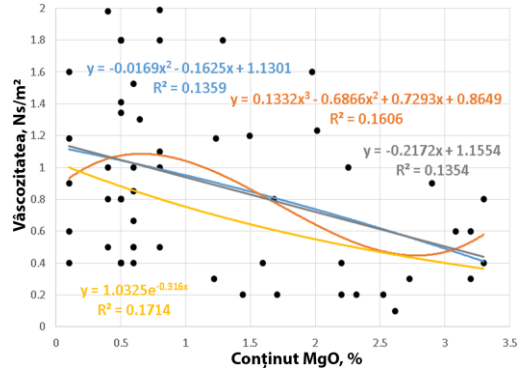


Fig. 4.7. Corelația $\eta=f$ (MgO)

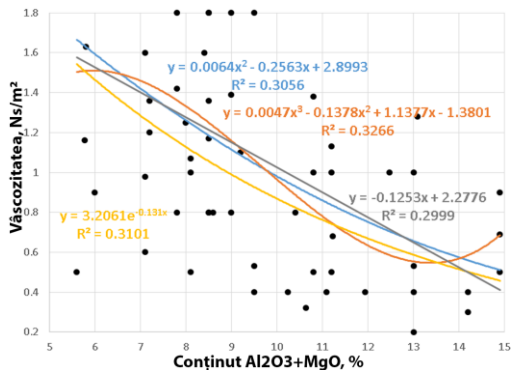


Fig. 4.8. Corelația $\eta=f$ (Al_2O_3+MgO)

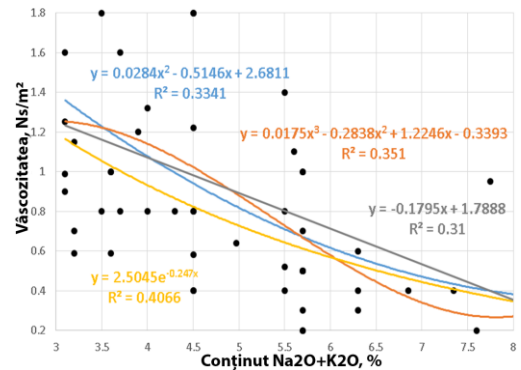


Fig. 4.9. Corelația $\eta=f$ (Na_2O+K_2O)

Corelația multiplă permite alegerea valorilor optime pentru temperatură MgO, CaO/SiO₂ și Al₂O₃ care să determine obținerea unei vâscozități într-un anumit domeniu, în funcție și de oțelul care se toarnă (temperatura de turnare, dimensiunea semifabricatului, destinația etc.) de dorit să fie 0,4-1,4 Ns/m².

Limite de variație ale variabilelor independente: CaO/SiO₂ = 0,7 - 1,14 ;

(Al₂O₃+MgO) = 5,585 - 14,9%; T = 1200 - 1500 °C;

Limite de variație ale variabilei dependente:

- Vâscozitatea $\eta=0,08-5,14$ Ns/m²

Valorile medii și abaterile variabilelor

| | | |
|---------------------------------------|--------------------------|---------|
| CaO/SiO ₂ | 0,88224 | 0,10503 |
| (Al ₂ O ₃ +MgO) | 8,9374 % | 2,1778 |
| T | 1332,8 °C | 99,163 |
| η | 0,8469 NS/m ² | 0,84795 |

Ecuția hipersuprafeței de regresie:

$$\eta = -3.8075 \cdot CaO / SiO_2^2 - 0.0043 \cdot (Al_2O_3 + MgO)^2 + 1.9617e - 005 \cdot T^2 - 0.6181 \cdot CaO / SiO_2 \cdot (Al_2O_3 + MgO) - 0.0011 \cdot (Al_2O_3 + MgO) \cdot T + 0.010126 \cdot T \cdot CaO / SiO_2 - 2.7738 \cdot CaO / SiO_2 + 2.2249 \cdot (Al_2O_3 + MgO) - 0.057106 \cdot T + 33.962 \quad (4.2)$$

Coeficientul de corelație: $r_f = 0.9547$

Abaterea de la suprafața de regresie: $s_f = 0.2524$

Coordonatele punctului șa sunt :

| | |
|---------------------------------------|---------------------------|
| CaO/SiO ₂ | 0,92793 |
| (Al ₂ O ₃ +MgO) | 7,4678 % |
| T | 1427,6228 °C |
| η | 0,21964 NS/m ² |

Deoarece aceasta hipersuprafața nu poate fi reprezentată în spațiul cu 4 dimensiuni, s-a recurs la înlocuirea, succesiv, a câte unei variabile independente cu valoarea ei medie. Aceste suprafețe, care aparțin spațiului cu 3 dimensiuni pot fi reprezentate și interpretate de tehnologi.

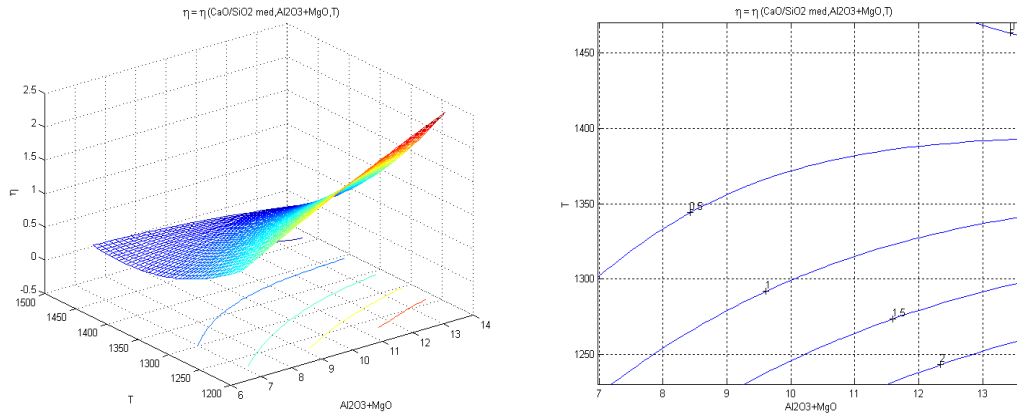


Fig. 4.10. Variația vâscozității zgurii unguente în funcție de temperatură și Al₂O₃+MgO

$$\eta [\text{CaO} / \text{SiO}_{2\text{med}}] = -0.0043 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO})^2 + 1.9617e - 005 \cdot T^2 - 0.0011 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) \cdot T + 1.6795 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - 0.0481 \cdot T + 28.5513$$

$$\text{CaO/SiO}_2 = (\text{CaO/SiO}_2)_{\text{med}} = 0.88224 \quad (4.3)$$

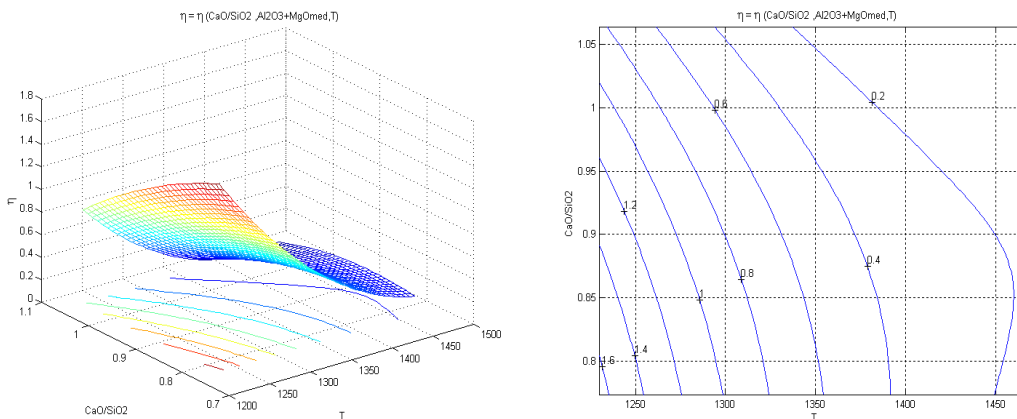


Fig. 4.11. Variația vâscozității zgurii unguente în funcție de temperatură și CaO/SiO₂

$$\eta [(Al_2O_3 + MgO)_{med}] = 1.9617e - 005 \cdot T^2 - 3.8075 \cdot CaO / SiO_2^2 + 0.0101 \cdot T \cdot CaO / SiO_2 - 0.0670 \cdot T - 8.298 \cdot CaO / SiO_2 + 53.5026$$

$$(Al_2O_3 + MgO) = (Al_2O_3 + MgO)_{med} = 8.9374 \% \quad (4.4)$$

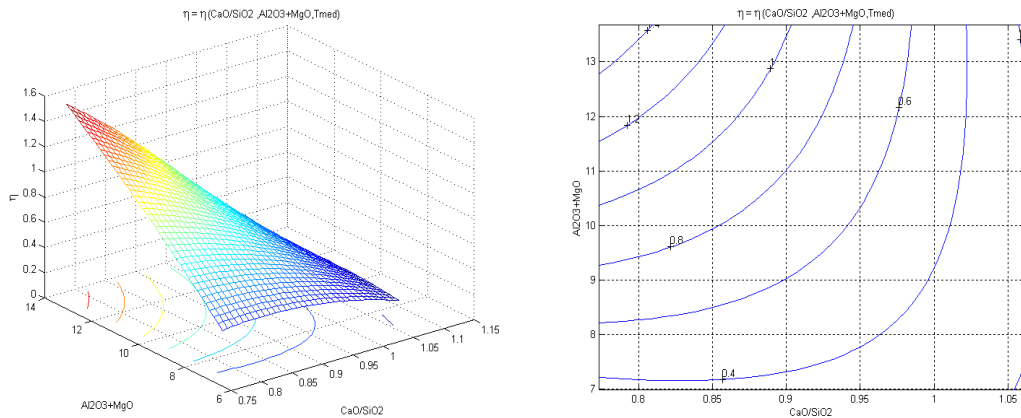


Fig. 4.12. Variația vâscozității zgurii unguente în funcție de $(Al_2O_3 + MgO)$ și CaO/SiO_2

$$\eta [T_{med}] = -3.8075 \cdot CaO / SiO_2^2 - 0.0043 \cdot (Al_2O_3 + MgO)^2 - 0.6181 \cdot CaO / SiO_2 \cdot (Al_2O_3 + MgO) + 10.7223 \cdot CaO / SiO_2 + 0.7432 \cdot (Al_2O_3 + MgO) - 7.3022$$

$$T = T_{med} = 1427.6228 \text{ } ^\circ C \quad (4.5)$$

4.2.3. Analiza tehnologică a rezultatelor obținute

Din cercetările efectuate referitoare la vâscozitatea zgurilor de lubrifiere utilizate la turnarea continuă au rezultat următoarele concluzii:

- temperatura zgurii rezultate din topirea prafurilor de turnare adăugate în cristalizoarele instalației de turnare continuă are o influență semnificativă asupra vâscozității (figurile 4.6, 4.10 și 4.11), vâscozitatea scăzând semnificativ cu creșterea temperaturii (crește mobilitatea anionilor în mod deosebit a celor complecși ;
- vâscozitatea zgurii de lubrifiere scade cu creșterea componentilor cu caracter fluidificator (figurile 4.4, 4.7, 4.8, 4.9, și 4.12), respectiv care au capacitatea de ruperea a rețelei anionului complex al siliciului SiO_4^{4-} ;
- referitor la indicele de bazicitate acesta a fost cuprins în limitele 0,70-1,14, deci în limite în care vâscozitatea nu este puternic influențată de anioni complecși ai siliciului, nici de formarea ortosilicaților de calciu (în zgurile acide creșterea bazicității conduce la ruperea rețelei complexe a anionilor, aceștia se transformă în anioni de dimensiuni mici ce se deplasează mai ușor).
- din reprezentările grafice se pot determina limitele de variație a componentelor din compoziția chimică;
- pentru a corespunde cerințelor impuse privind limitele de variație pentru vâscozitate se consideră că zgura trebuie să aibă următoarele caracteristici;

$\text{Al}_2\text{O}_3 = 4\text{-}12,5\%$; $\text{MgO} = 0,5 - 4,5\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO} = 11\text{-}15\%$; oxizi alcalini $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ max. 6% și CaO/SiO_2 0,80 – 1,20 și $T = 1350^\circ\text{C} - 1550^\circ\text{C}$.

4.3. Tensiune superficială

4.3.1. Considerații tehnologice

Zgurile metalurgice lichide fiind topituri ionice au tensiuni superficiale relativ mari (300-600 mJ/m^2), dar de câteva ori mai mică decât a metalelor [62].

Se consideră că tensiunea superficială a oxizilor puri în stare lichidă (topită) depinde de ponderea legăturii electrovalente, știut fiind faptul că aceasta variază de la oxid la oxid, în funcție de diferența de electronegativitate între cation și anion. În funcție de aceasta variază și tensiunea superficială a oxizilor puri, scăzând de la CaO la Al_2O_3 și SiO_2 . Această regulă, deși este fondată științific, nu se verifică integral în practică, din cauza lipsei valorilor sigure ale tensiunii superficiale ale oxizilor în stare pură [62,71].

În topiturile de doi sau mai mulți oxizi, tensiunea superficială este determinată de faptul că particulele (ionii) din stratul superficial, sunt supuse unor atracții preponderente din partea fazei în care se află (zgura) și de aceea valoarea ei depinde de energia de legătură a particulelor din stratul superficial cu particulele vecine din aceeași fază. Concentrația oxigenului în stratul superficial al zgurilor lichide este aproximativ constantă, iar influența înlocuirii unui oxid din zgură prin altul asupra tensiunii superficiale, se explică prin apariția în stratul superficial a unor noi cationi care au altă energie de legătură cu oxigenul. Valorile energiei de legătură în CaO, MgO, MnO și Al_2O_3 sunt apropiate și de aceea înlocuirea lor reciprocă nu trebuie să conducă la modificări esențiale ale tensiunii superficiale, în timp ce introducerea SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , Na_2O , cu valori mai mici de energie de legătură trebuie să conducă la micșorarea tensiunii superficiale a zgurii, lucru care se confirmă în practică [62,69].

Tensiunea superficială a zgurii trebuie să asigure o formă de menisc optimă. Aceasta este în funcție de compoziția chimică a zgurii, de oțelul care se toarnă și de temperatură.

4.3.2. Cercetări și rezultate

Prin prelucrarea în programul Matlab datelor privind tensiunea superficială și compoziția chimică pentru un număr de 20 de probe, pentru zgurile din sistemul CaO-SiO₂-Al₂O₃, specific zgurilor reducătoare, s-au obținut ecuații de corelație triplă (ecuații polinomiale de gradul 2) care sunt prezentate în continuare atât sub formă analitică cât și sub formă grafică [62].

Pentru parametri independenți luați în studiu s-a avut în vedere compoziția chimică și anume: CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, respectiv bazicitatea definită ca $B = (\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$. De asemenea s-a luat în studiu ca parametru independent și temperatura zgurii.

Deoarece această hipersuprafață nu poate fi reprezentată în spațiul cu 4 dimensiuni, s-a recurs la înlocuirea, prin permutări a câte unei variabile independente cu valoarea ei medie. Aceste suprafețe, care aparțin spațiului cu 3 dimensiuni pot fi reprezentate și interpretate de tehnologi [66,68,70].

Ecuația hipersuprafeței de regresie : $\sigma = f(\text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3)$

$$\sigma = 5.2539 \cdot 10^{-4} \text{CaO}^2 + 4.0233 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{SiO}_2)^2 - 3.7942 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)^2 - 3.8559 \cdot 10^{-3} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 - 4.6744 \cdot$$

$$\cdot 10^{-4} \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 5,466 \cdot 10^{-3} \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} + 0.17659 \text{CaO} - 0.1853 \text{SiO}_2 + 74.4903 \text{Al}_2\text{O}_3 + 75.5949 \quad (4.6)$$

Coeficientul de corelație: $r_f = 0.9999$

Pentru $\text{CaO} = (\text{CaO})_{\text{med}} = 35,733\%$; - figura 4.13

$$\sigma_{(\text{CaOmed})} = 4.0233 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{SiO}_2)^2 - 3.7942 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)^2 - 4.6744 \cdot 10^{-4} \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 0.3231 \cdot \text{SiO}_2 + 74.295 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 82.576 \quad (4.7)$$

Pentru $\text{SiO}_2 = (\text{SiO}_2)_{\text{med}} = 32,867\%$; - figura 4.14

$$\sigma_{(\text{SiO}_2\text{med})} = -3.7942 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)^2 + 0.0005 \cdot 10^{-4} \text{CaO}^2 - 5.466 \cdot 10^{-3} \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} + 74.4749 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.0498 \cdot \text{CaO} + 73.85 \quad (4.8)$$

Pentru $\text{Al}_2\text{O}_3 = (\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{med}} = 6,993\%$; - figura 4.15

$$\sigma_{(\text{Al}_2\text{O}_3\text{med})} = 0.0005 \cdot 10^{-4} \text{CaO}^2 + 4.0233 \cdot 10^{-3} \cdot (\text{SiO}_2)^2 - 3.8559 \cdot 10^{-3} \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 0.1383 \cdot \text{CaO} - 0.18859 \cdot \text{SiO}_2 + 410.9681 \quad (4.9)$$

Ecuția hipersuprafeței de regresie: $\sigma = f(\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{B})$

$$\sigma = -0.0001 \cdot \text{CaO}^2 - 3.7719 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3^2 + 1.9395 \cdot \text{B}^2 - 0.0019 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 0.1703 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{B} - 0.0161 \cdot \text{B} \cdot \text{CaO} + 0.0444 \cdot \text{CaO} + 74.2324 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 0.9344 \cdot \text{B} + 75.2327 / \text{B} = (\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 \quad (4.10)$$

Coeficientul de corelație: $r_f = 0.9999$

Pentru $\text{CaO} = (\text{CaO})_{\text{med}} = 35,733\%$; - figura 4.16

$$\sigma_{(\text{CaOmed})} = -3.7719 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3^2 + 1.9395 \cdot \text{B}^2 - 0.1703 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{B} + 74.1644 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.5111 \cdot \text{B} + 76.5859 \quad (4.11)$$

Pentru $\text{Al}_2\text{O}_3 = (\text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{med}} = 6,993\%$; - figura 4.17

$$\sigma_{(\text{Al}_2\text{O}_3\text{med})} = 1.9395 \cdot \text{B}^2 - 0.00018 \cdot \text{CaO}^2 - 0.0161 \cdot \text{B} \cdot \text{CaO} - 2.126 \cdot \text{B} + 0.0311 \cdot \text{CaO} + 409.8953 \quad (4.12)$$

Pentru $\text{B} = \text{B}_{\text{med}} = 1,14$; - figura 4.18

$$\text{T}_{(\text{Bmed})} = -0.00018 \cdot \text{CaO}^2 - 3.7719 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3^2 - 0.0019 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.0260 \cdot \text{CaO} + 74.038 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 76.6926 \quad (4.13)$$

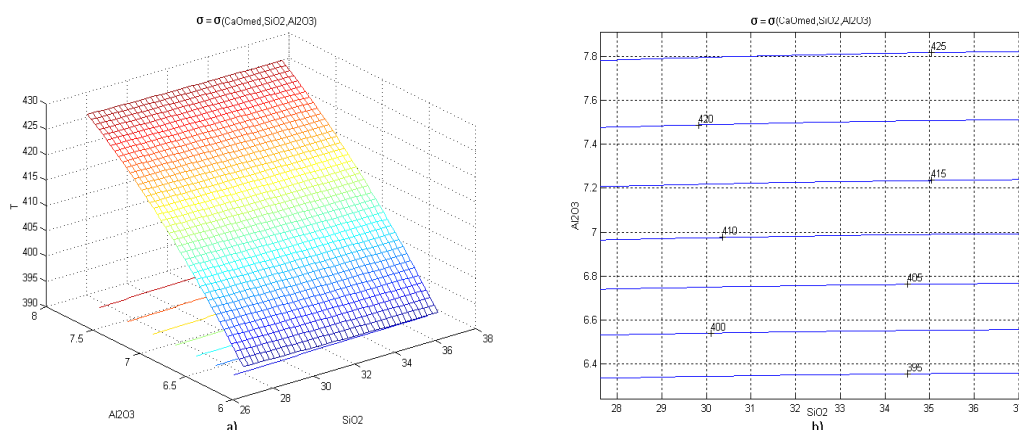


Fig. 4.13. $\sigma = f(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2)$ – corelație de grad 2, ecuația 4.8;

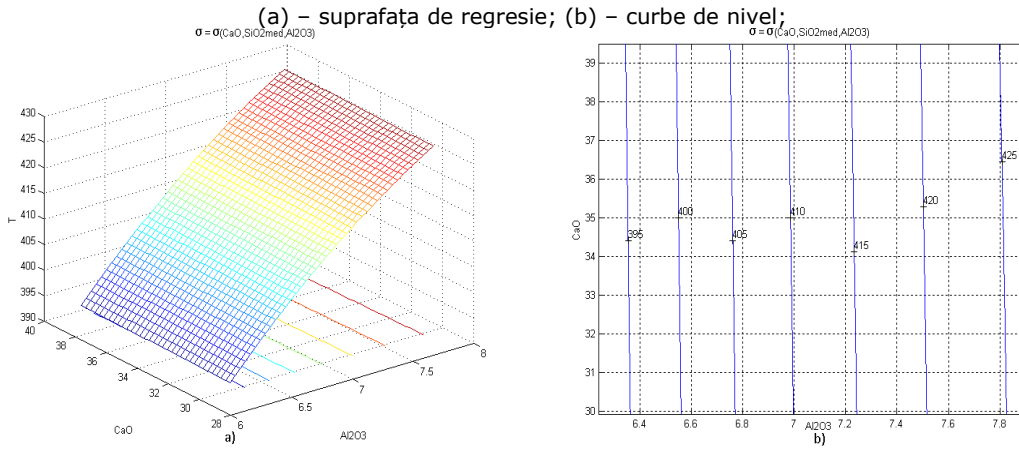


Fig. 4.14. $\sigma = f(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO})$ – corelație de gradul 2, ecuația 4.9;
(a) – suprafața de regresie; (b) – curbe de nivel;

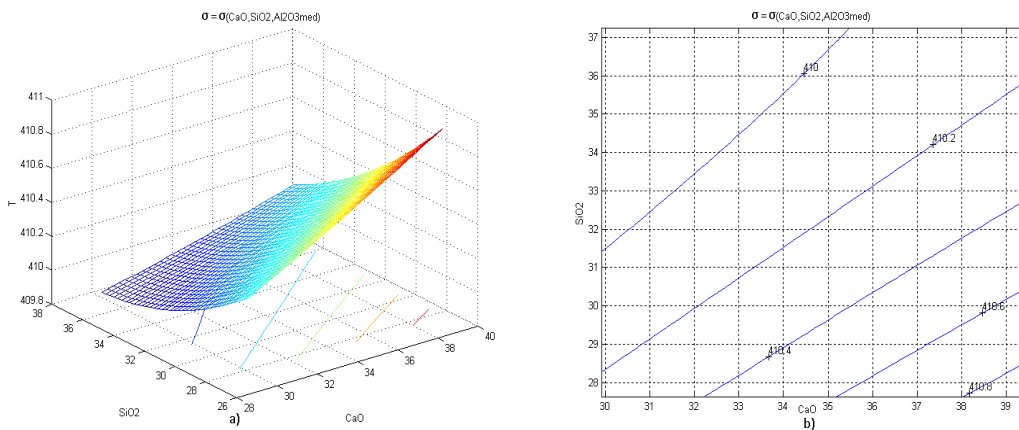


Fig. 4.15. $\sigma = f(\text{CaO}, \text{SiO}_2)$ – corelație de gradul 2, ecuația 4.10;
(a) – suprafața de regresie; (b) – curbe de nivel;

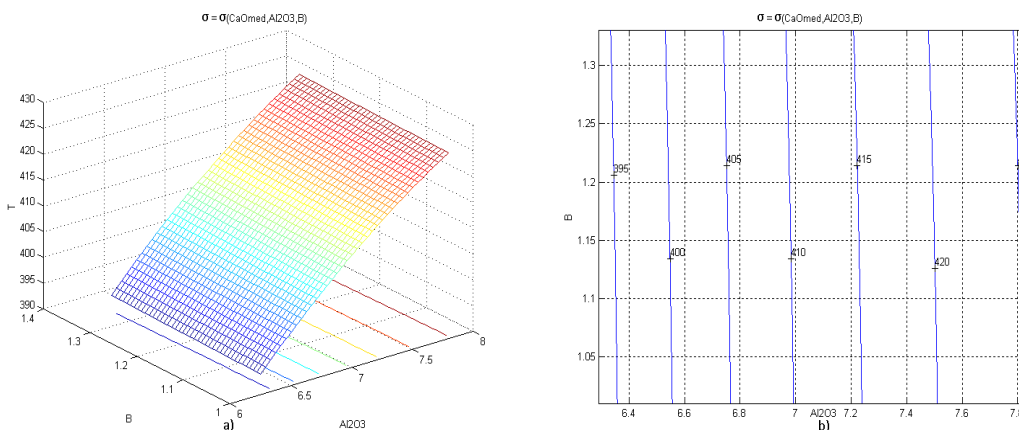


Fig. 4.16. $\sigma = f(\text{Al}_2\text{O}_3, \text{B})$ – corelație de gradul 2;

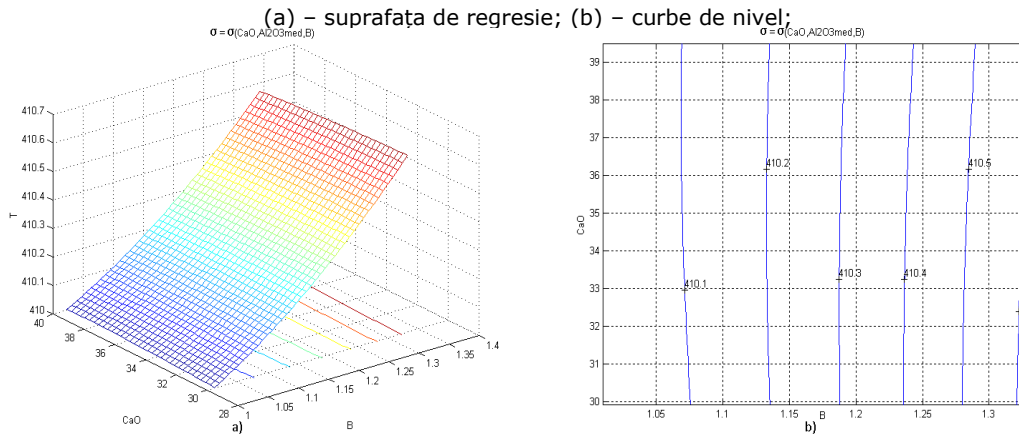


Fig. 4.17. $\sigma = f(\text{CaO}, \text{B})$ – corelație de gradul 2;
(a) – suprafața de regresie; (b) – curbe de nivel;

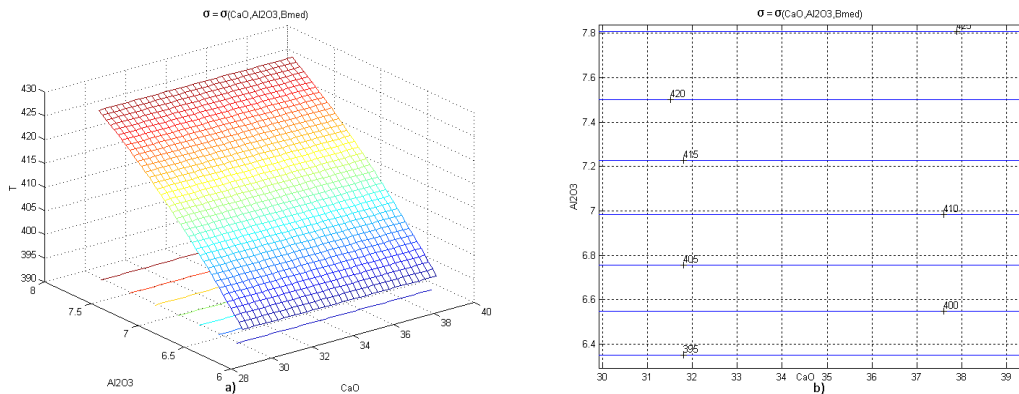


Fig. 4.18. $\sigma = f(\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3)$ – corelație de gradul 2;
(a) – suprafața de regresie; (b) – curbe de nivel;

4.3.3. Concluzii

Din studiul efectuat rezultă următoarele concluzii:

- pentru obținerea unei tensiuni superficiale mai mari de 400 mJ/m^2 este necesar să se asigure zguri de lubrifiere cu următoarele caracteristici: $\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,62-8,60\%$; $\text{CaO} = 27-42\%$; $\text{SiO}_2 = 25-40\%$ și bazicitatea $B = (\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 = 0,95-1,40$.
- creșterea conținutului de Al_2O_3 conduce la creșterea tensiunii superficiale, fapt explicabil prin tensiunea mare a acestui oxid, dar nu trebuie depășită limita menționată mai sus deoarece poate avea ca efect secundar creșterea vâscozității;
- datele existente în literatura de specialitate, permit utilizarea unor programe de calcul pentru obținerea unor corelații între tensiunea superficială a zgurilor de lubrifiere și compoziția chimică;
- se pot obține ecuații de corelație pe subdomenii de compoziție chimică, indice de bazicitate, temperatură, care să reprezinte cât mai fidel situația reală;
- cunoașterea tensiunilor superficiale alături de alte caracteristici, în primul

- rând de vâscozitate este de un real folos pentru practica turnării continue a oțelului (atât pentru producătorul cât și utilizatorul prafurilor de lubrifiere);
- deoarece turnarea continuă a oțelului este o tehnologia care s-a impus pe plan mondial în timp relativ scurt (cca 60 de ani) considerăm utilă continuarea cercetărilor referitoare la caracteristicile acestor zguri.

4.4. Influența parametrilor de răcire asupra vitezei de turnare continuă a oțelului

4.4.1. Cadrul experimental

În cadrul cercetărilor efectuate s-a urmărit stabilirea unor ecuații de corelație între parametrii care caracterizează procesul de turnare continuă, temperatura oțelului la intrarea în cristalizor, supraîncălzirea oțelului și debitul apei de răcire în cristalizor și diferite zone ale răcirii secundare. Paralel cu acești parametri s-au urmărit și valorile pentru viteza de turnare, la turnarea semifabricatelor rotunde cu $\phi 270$ mm [63,66].

Oțelul s-a elaborat într-un cuptor electric cu arc tip EBT, de capacitate 100t, tratat în instalațiile LF și VD după care s-a turnat pe o instalație de turnare continuă cu 5 fire.

4.4.2. Prelucrarea datelor. Rezultate

Datele obținute au fost procesate în programul de calcul MATLAB, utilizând trei tipuri de ecuații de corelație (z - parametru dependent; x , y - parametri independenți):

$$z = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6 \quad (1)$$

$$z = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5y + a_6y^2 + a_7y^3 + a_8y^4 + a_9y^5 \quad (2)$$

$$z = a_1 + a_2 \log(x) + a_3 \log(x)^2 + a_4 \log(x)^3 + \frac{a_5}{y} + \frac{a_6}{y^2} + \frac{a_7}{y^3} + \frac{a_8}{y^4} + \frac{a_9}{y^5} \quad (3)$$

z - viteza de turnare, m/min

x - temperatura oțelului la turnare [$^{\circ}\text{C}$], pentru toate corelațiile;

y - debitul apei de răcire în zona 1A [l/min], corelațiile din fig.4.19; 4.20 și 4.21;

y - debitul apei de răcire în zona 1B [l/min], corelațiile din fig. 4.22; 4.22 și 4.24;

y - debitul apei de răcire în zona 2 [l/min], corelațiile din fig. 4.25; 4.26 și 4.27;

y - debitul apei de răcire în zona 3 [l/min], corelațiile din fig. 4.28; 4.29 și 4.30.

Rezultatele obținute sunt prezentate sub formă grafică, astfel: a) suprafața de corelație; b) curbele de nivel în proiecție plană; c) curbele de nivel în proiecție spațială și d) coeficienții ecuației de corelație.

La o primă analiză, se poate observa că ecuația 1 are cea mai simplă formă analitică (polinomială de gradul 2) comparativ cu cea polinomială de gradul 5 (ecuația 2) și mai ales cu ecuația 3 (combinație logaritmică - polinomială).

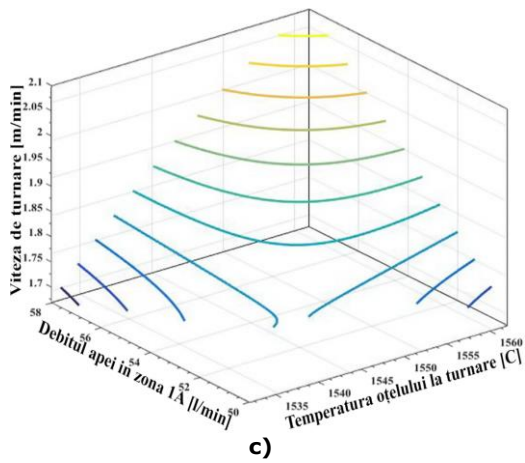
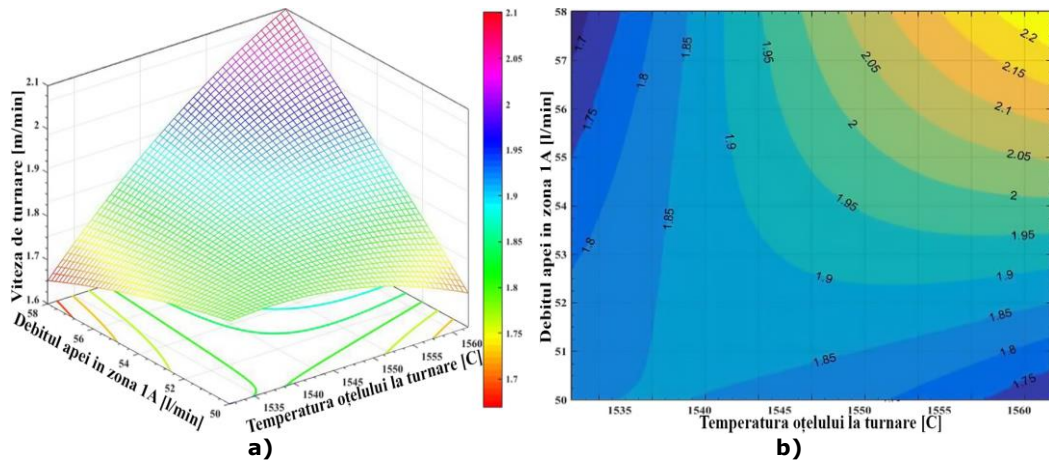
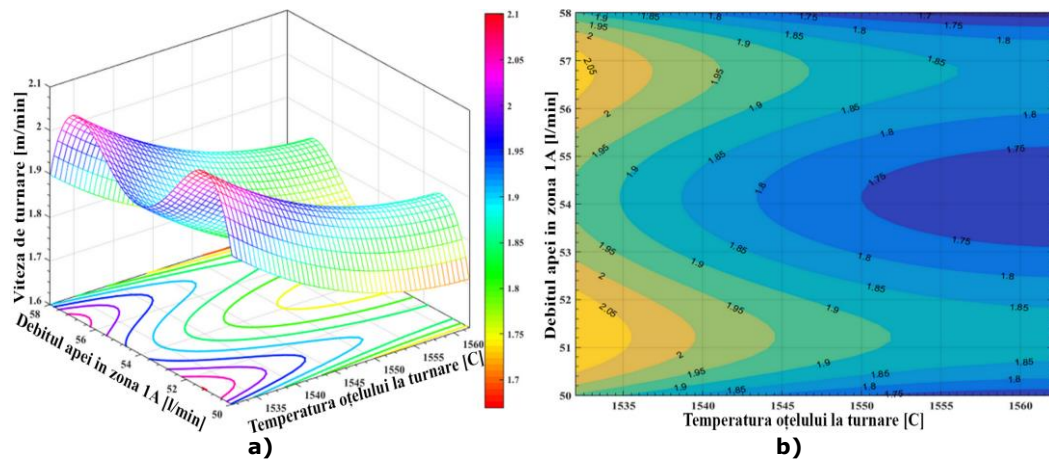


Fig. 4.19. Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 1A);
 a) suprafața de regresie; b) contur în plan;
 c) curbe de nivel;

Ecuția 1:
 $Z = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6$

$R^2 = 0,52869$;
 $a_1 = 0,00039$; $a_2 = -0,00344$;
 $a_3 = 0,00264$; $a_4 = -1,35823$;
 $a_5 = -3,72223$; $a_6 = 1153,39115$;



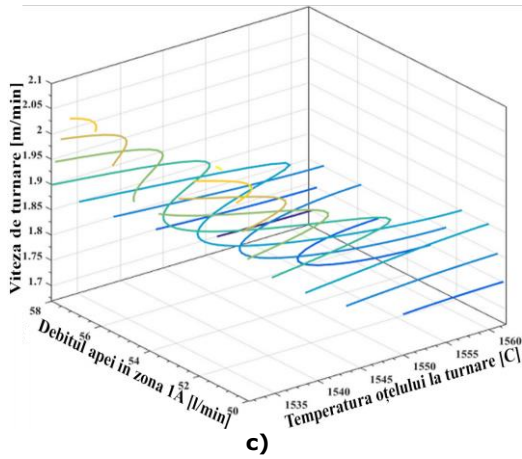


Fig. 4.20.

Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 1A);
 a) suprafața de regresie; b) contur în plan;
 c) curbe de nivel;

Ecuția 2:

$$Z = a_1 + a_2X + a_3X^2 + a_4X^3 + a_5Y + a_6Y^2 + a_7Y^3 + a_8Y^4 + a_9Y^5$$

R² = 0,61243;

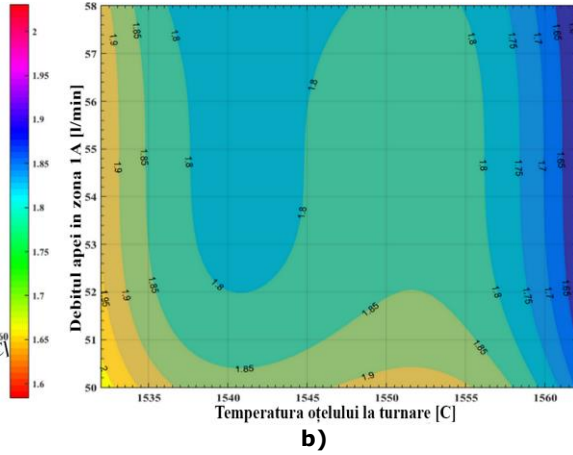
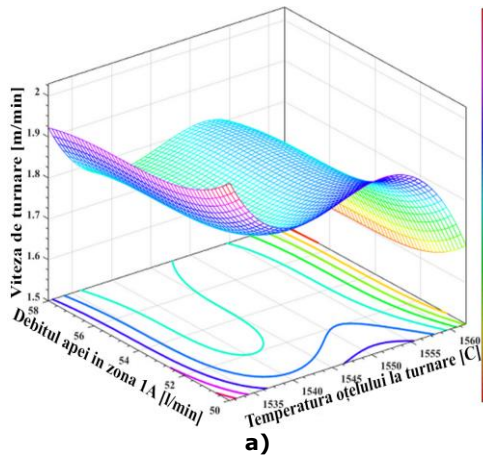
a₁=0; a₂=-7,52129;

a₃=0,00460; a₄=0;

a₅=0; a₆=14,07756;

a₇=-0,52186; a₈=0,00724;

a₉=0;



a)

b)

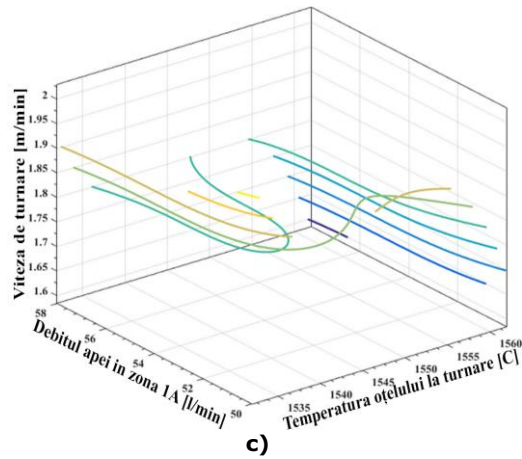


Fig. 4.21.

Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 1A);
 a) suprafața de regresie; b) contur în plan;
 c) curbe de nivel;

Ecuția 3:

$$Z = a_1 + a_2 \log(x) + a_3 \log(x)^2 + a_4 \log(x)^3 + \frac{a_5}{y} + \frac{a_6}{y^2} + \frac{a_7}{y^3} + \frac{a_8}{y^4} + \frac{a_9}{y^5}$$

R² = 0,54409;

a₁=11890; a₂=-48574;

a₃=66145; a₄=-300000;

a₅=16829; a₆=-92059;

a₇=16786; a₈=0; a₉=0;

c)

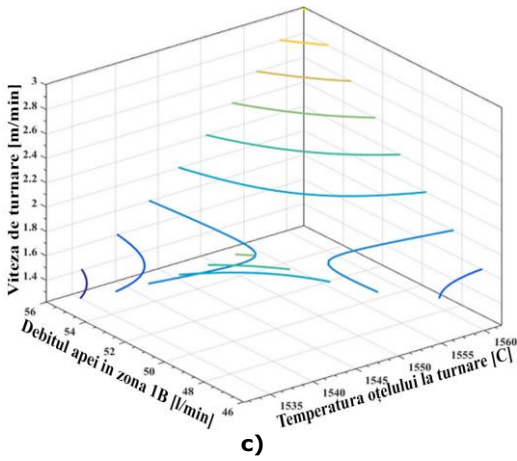
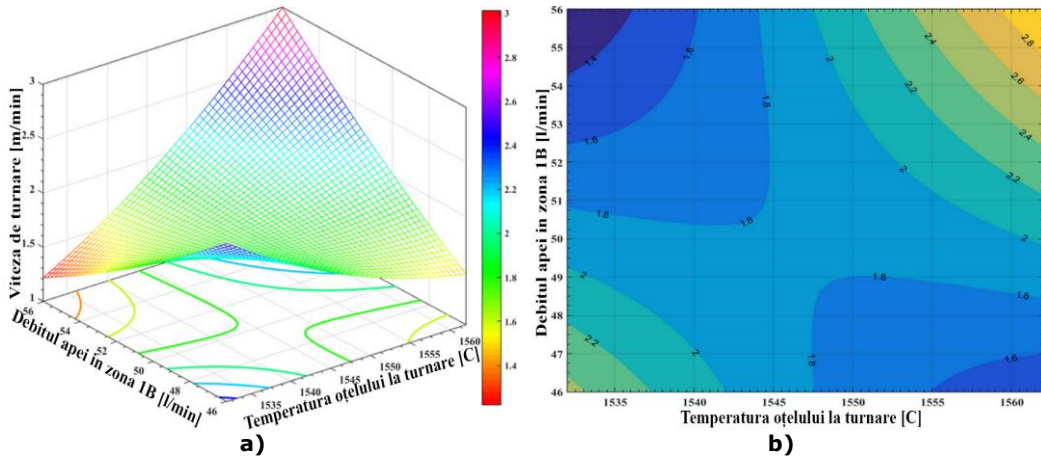
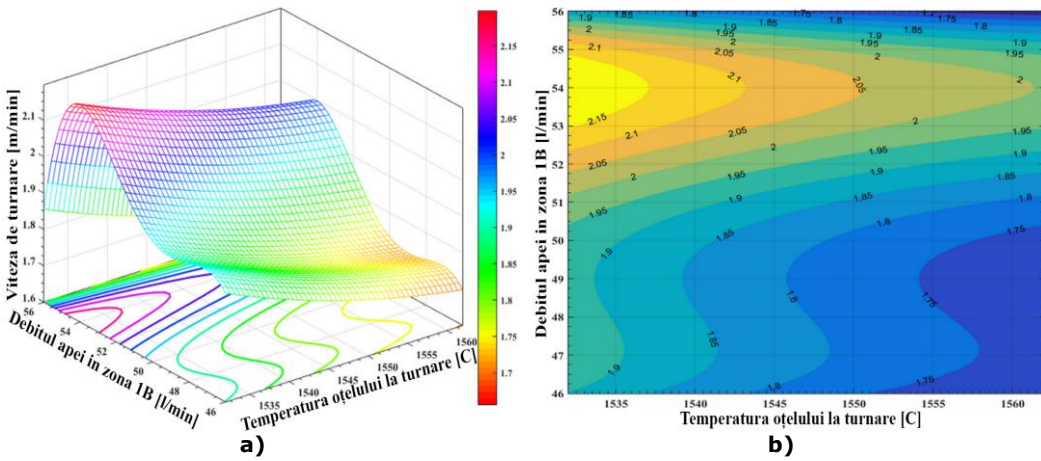


Fig. 4.22. Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 1B); a) suprafața de regresie; b) contur în plan; c) curbe de nivel;

Ecuția 1:
 $Z = a_1X^2 + a_2Y^2 + a_3XY + a_4X + a_5Y + a_6$

R² = 0.71748;
 $a_1 = 0,00065; a_2 = 0,00258;$
 $a_3 = 0,00925; a_4 = -2,47158;$
 $a_5 = -14,56371; a_6 = 2274,28489;$



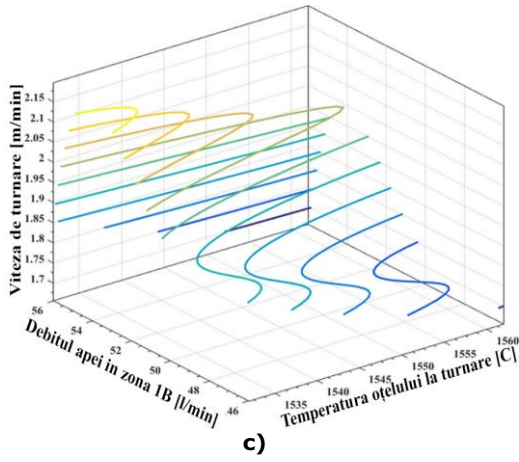


Fig. 4.23.
Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 1B);
a) suprafața de regresie; b) contur în plan; c) curbe de nivel;

Ecuția 2:
$$z = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5y + a_6y^2 + a_7y^3 + a_8y^4 + a_9y^5$$

R² = 0.79421;
a₁=0; a₂=-1,59968;
a₃=0,00092; a₄=0;
a₅=0; a₆=3,71578;
a₇=-0,14897; a₈=0,00223; a₉=0;

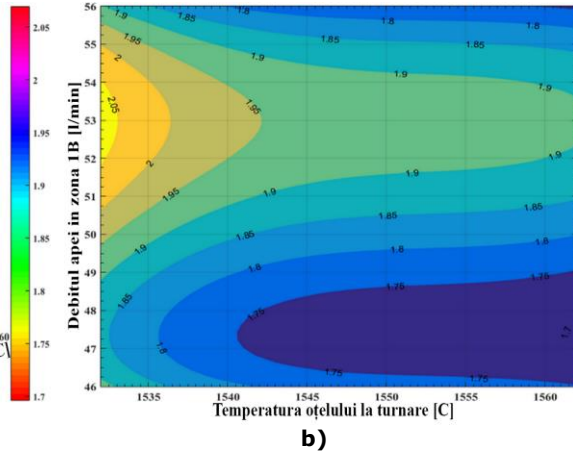
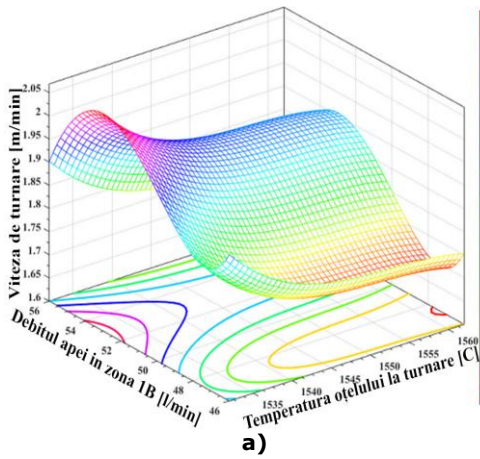
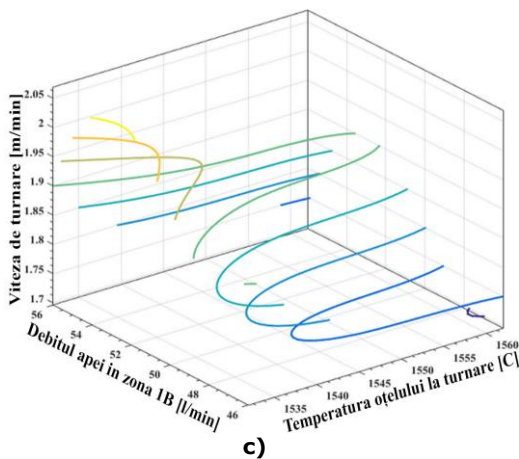


Fig. 4.24.
Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 1B);
a) suprafața de regresie; b) contur în plan; c) curbe de nivel;

Ecuția 3:
$$z = a_1 + a_2 \log(x) + a_3 \log(x)^2 + a_4 \log(x)^3 + \frac{a_5}{y} + \frac{a_6}{y^2} + \frac{a_7}{y^3} + \frac{a_8}{y^4} + \frac{a_9}{y^5}$$

R² = 0.702100744917242
a₁=21424; a₂=-87475;
a₃=11905; a₄=-54000;
a₅=44161; a₆=-22154;
a₇=36930; a₈=0; a₉=0;



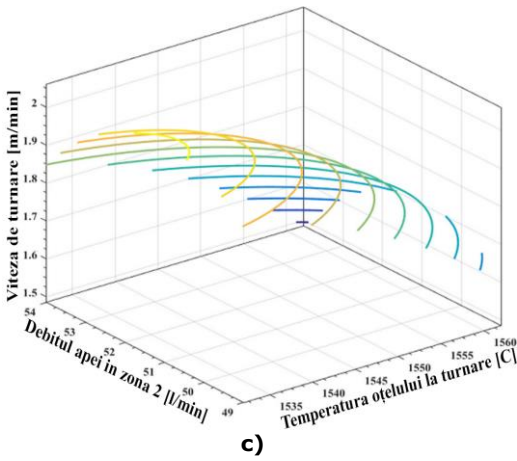
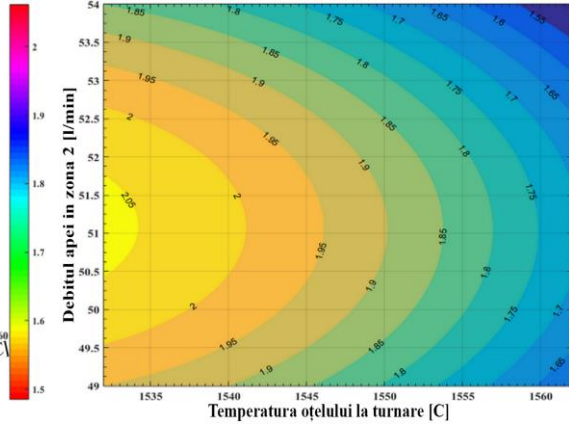
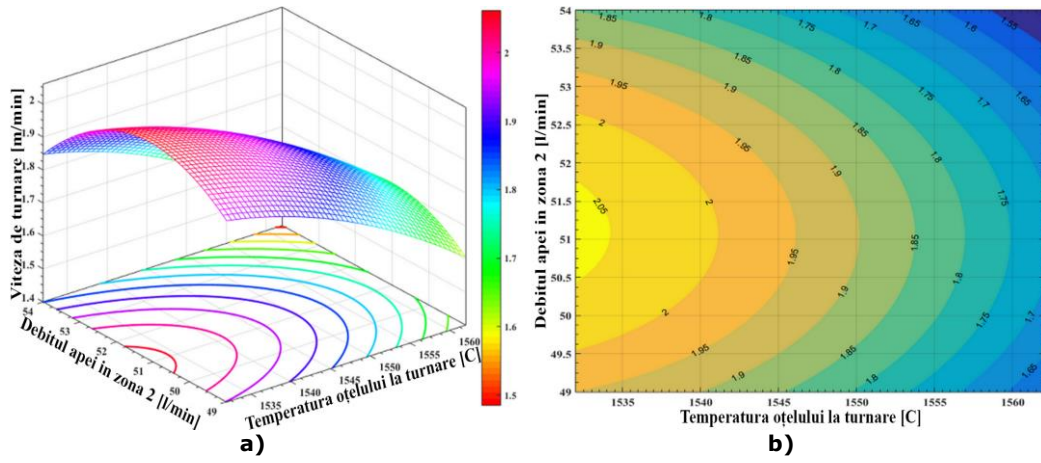
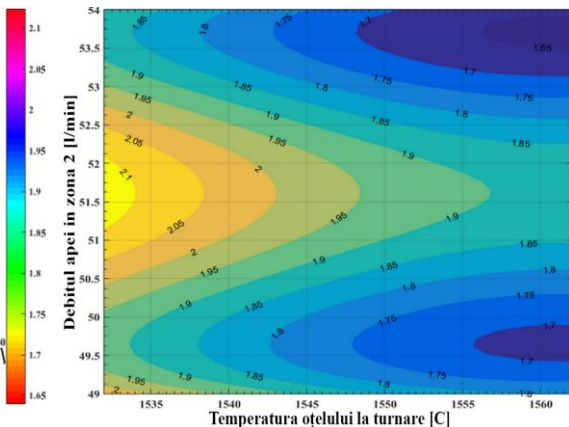
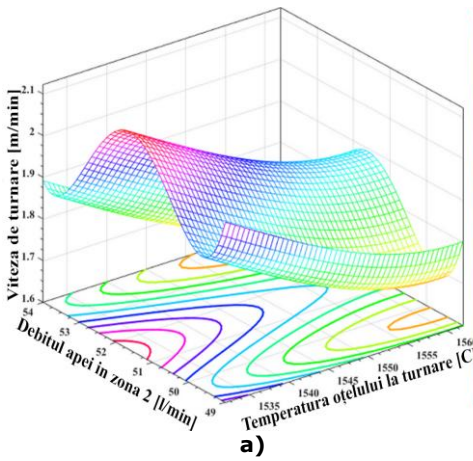


Fig. 4.25.
 Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 2);
 a) suprafața de regresie; b) contur în plan;
 c) curbe de nivel;

Ecuția 1:
 $Z = a_1X^2 + a_2Y^2 + a_3XY + a_4X + a_5Y + a_6$

R² = 0.76230;
 $a_1 = -0,00023$; $a_2 = -0,02534$;
 $a_3 = -0,00013$; $a_4 = 0,73284$;
 $a_5 = 2,79633$; $a_6 = -627,26823$;



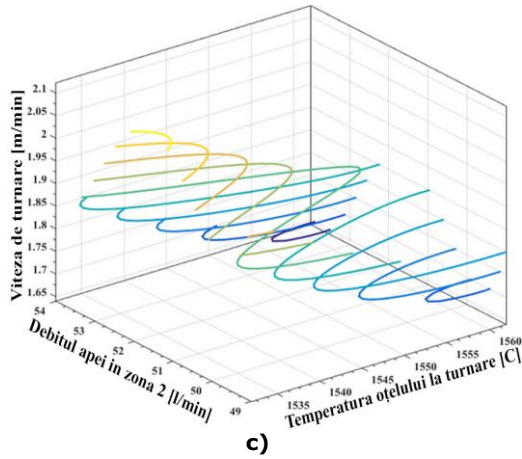


Fig. 4.26.

Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 2);
 a) suprafața de regresie; b) contur în plan;
 c) curbe de nivel;

Ecuția 2:

$$z = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5y + a_6y^2 + a_7y^3 + a_8y^4 + a_9y^5$$

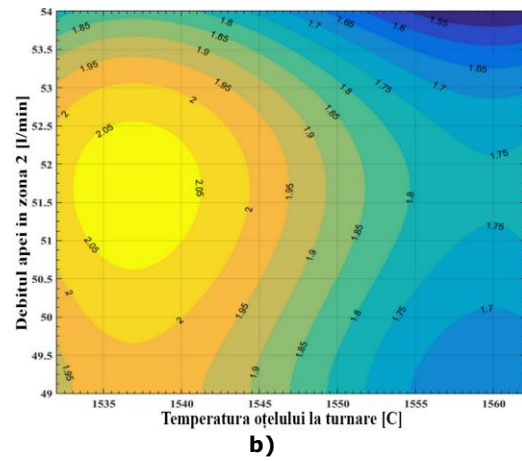
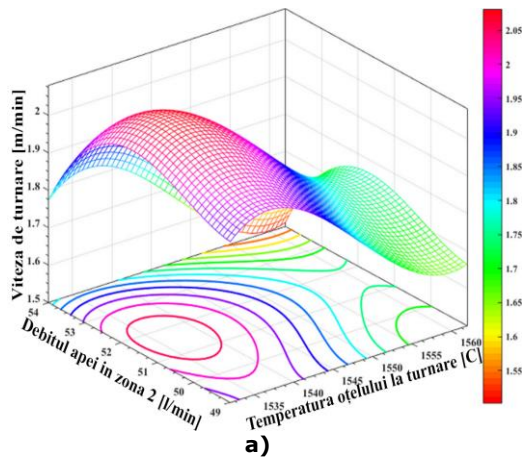
R² = 0.86142;

a₁=0; a₂=36,64747;

a₃=-0,02389; a₄=0;

a₅=0; a₆=-70,41481;

a₇=2,72890; a₈=-0,03963; a₉=0,0002;



a)

b)

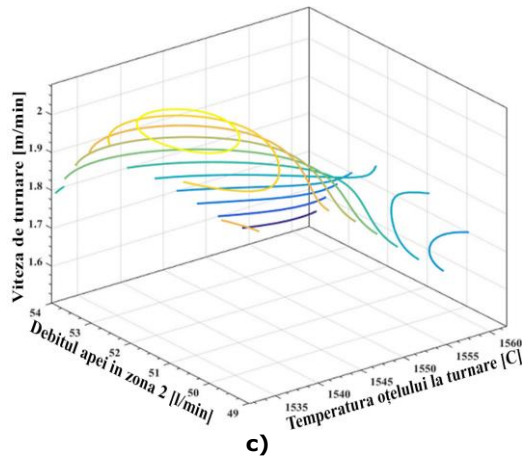


Fig. 4.27.

Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 2);
 a) suprafața de regresie; b) contur în plan;
 c) curbe de nivel;

Ecuția 3:

$$z = a_1 + a_2 \log(x) + a_3 \log(x)^2 + a_4 \log(x)^3 + \frac{a_5}{y} + \frac{a_6}{y^2} + \frac{a_7}{y^3} + \frac{a_8}{y^4} + \frac{a_9}{y^5}$$

R² = 0,79973;

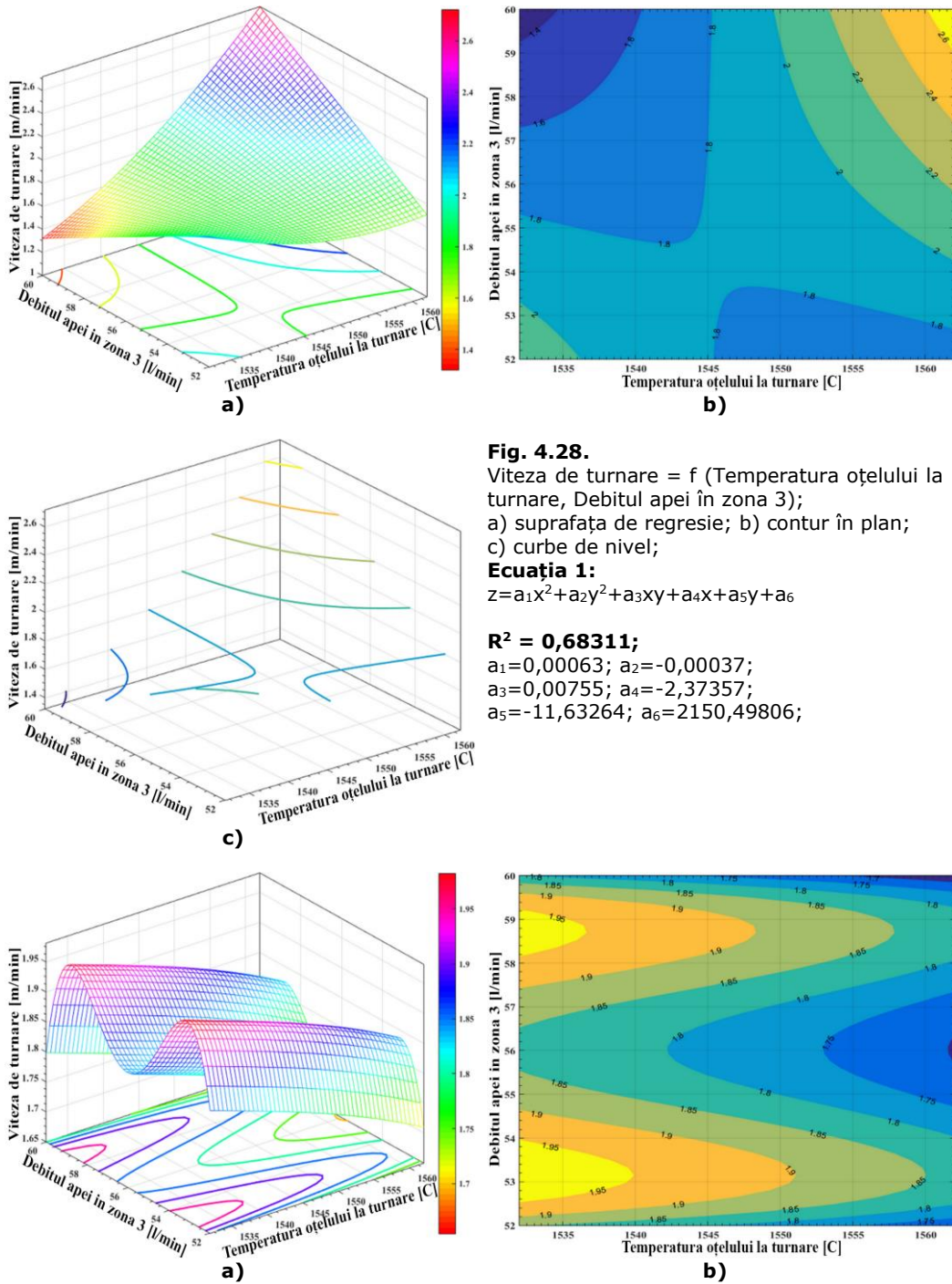
a₁=-78060; a₂=31882;

a₃=-43407; a₄=197000;

a₅=17588; a₆=-88439;

a₇=14811; a₈=0; a₉=0;

c)



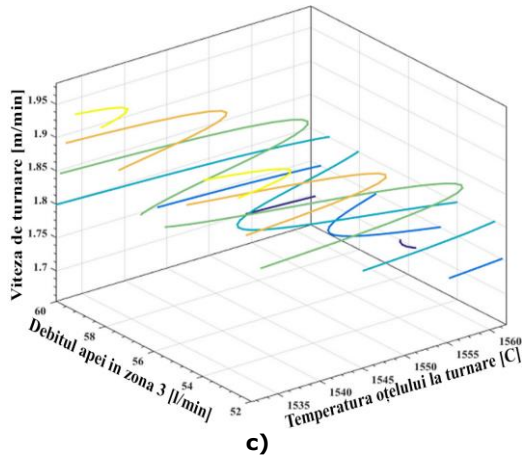


Fig. 4.29.
Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 3);
a) suprafața de regresie; b) contur în plan;
c) curbe de nivel;

Ecuția 2:
$$z = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5y + a_6y^2 + a_7y^3 + a_8y^4 + a_9y^5$$

R² = 0.62121;
a₁=0; a₂=-8,35244;
a₃=0,00543; a₄=0;
a₅=0; a₆=13,73756;
a₇=-0,49166; a₈=0,00659; a₉=0;

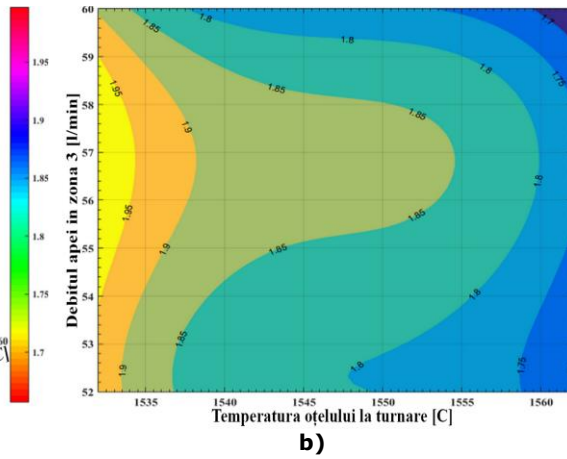
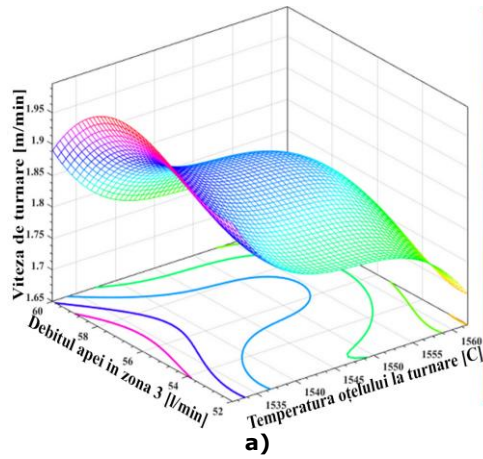
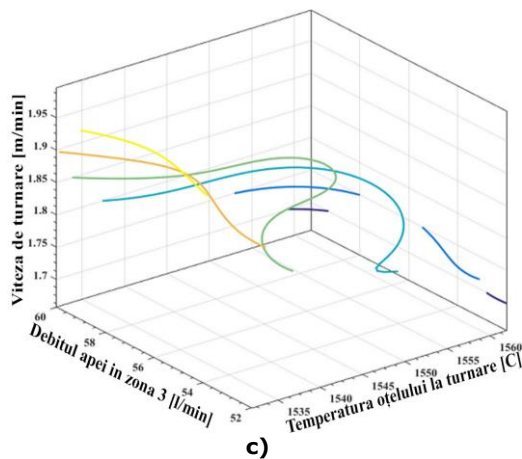


Fig. 4.30.
Viteza de turnare = f (Temperatura oțelului la turnare, Debitul apei în zona 3);
a) suprafața de regresie; b) contur în plan;
c) curbe de nivel;

Ecuția 3:
$$z = a_1 + a_2 \log(x) + a_3 \log(x)^2 + a_4 \log(x)^3 + \frac{a_5}{y} + \frac{a_6}{y^2} + \frac{a_7}{y^3} + \frac{a_8}{y^4} + \frac{a_9}{y^5}$$

R² = 0.55463;
a₁=44677; a₂=-18249;
a₃=24848; a₄=-113000;
a₅=38611; a₆=-21071;
a₇=38268; a₈=0; a₉=0;



4.4.3. Analiza tehnologică a rezultatelor obținute

În urma prelucrării datelor colectate în cadrul experimentărilor industriale și a prelucrării lor în programul de calcul MATLAB, s-au obținut 4 grupe de corelații duble, utilizând 3 tipuri de ecuații de corelație. Toate corelațiile obținute sunt prezentate sub formă analitică și grafică, fiind reprezentative atât sub aspect tehnologic, cât și a sensului tehnologic [64,65].

Referitor la temperatura de turnare, reprezentările grafice confirmă faptul că o creștere a temperaturii de turnare, determină o reducere a vitezei de turnare, ce asigură o eliminare optimă de căldură din sistemul oțel lichid-cristalizer, în sistemul cristalizer apă de răcire, respectiv sistemul semifabricat apă de răcire din zona secundară.

În toate cele patru grupe de corelații, respective cele trei tipuri din fiecare grupă, influența temperaturii are același sens. De exemplu în figurile 4.24, 4.25 și 4.26 se constată că:

- în figura 4.24 la o temperatură a oțelului de 1550 °C și debitul apei de răcire secundară în zona 2 de 51 l/min., viteza de turnare este de 1,9 m/min, iar în figura 4.26 tot de 1,9 m/min;

- în figura 4.27 la aceleași valori pentru parametri menționați mai sus viteza de turnare este tot de 1,95 m/min, o diferență de 2,62% față de cele 2 cazuri prezentate anterior, deci în condiții din practică nesensibile;

- de menționat că și în cazul celorlalte grupe de corelații, respective celor trei tipuri de ecuații utilizate la fiecare grupă se obțin rezultate similare corelații [67].

4.5. Concluzii

Pe baza cercetărilor efectuate, respective a rezultatelor obținute pot fi concluzionate următoarele:

- între parametric de răcire din zona secundară a instalației de turnare continuă și viteza de turnare continuă a oțelului se pot stabili corelații tehnologice reprezentative, exprimate analitic și grafic;
- pe baza reprezentărilor grafice, se pot alege în funcție de temperatura de turnare a oțelului și debitul apei de turnare se poate alege viteza de turnare prescrisă;
- rezultatele pot fi utilizate în practică la turnarea semifabricatelor \varnothing 180mm.

5. SISTEM FUZZY PENTRU CONTROLUL DEBITULUI APEI PENTRU RĂCIREA SECUNDARĂ A OȚELULUI

5.1. Generalități

În prezentul capitol se propune o soluție Fuzzy care, grefată pe structura existentă a sistemului de conducere a turnării continue elimină fisurile apărute în zona de răcire secundară (figura 5.1), prin generarea corecțiilor necesare modificării valorii impuse pentru debitul apei și respectiv vitezei de turnare.

Sistemele de eliminare a fisurilor, existente în acest moment, nu se pot elimina fisurile dacă acestea sunt detectate în zona secundară de răcire a oțelului, utilizând principiul predictiv propus, acest dezavantaj este eliminat, practic, baza de reguli 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.

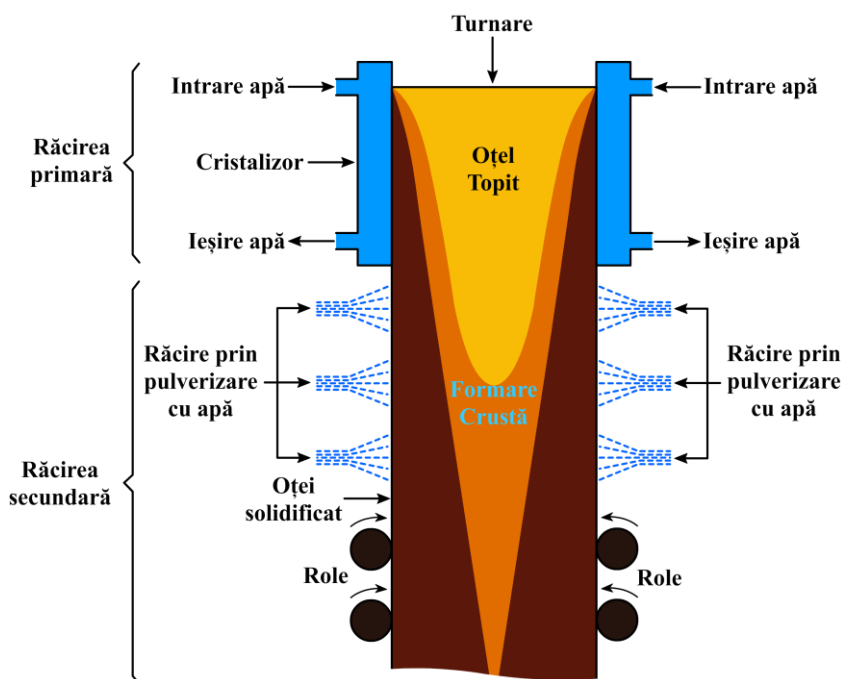


Fig. 5.1 Răcirea primară și secundară din turnarea continuă a oțelului

În prezent, turnarea continuă asigură cea mai mare parte a semifabricatelor pentru industria metalurgică. Procesul este unul foarte complex, cu o productivitate ridicată, dar, datorită unor probleme tehnologice, poate genera defecte de calitate prin crăparea crustei semifabricatului. Aceste defecte conduc la o calitate inferioară a semifabricatelor și la pierderi economice. Domeniul turnării continue a fost dezvoltat și consolidat ca o direcție importantă de cercetare, concentrându-se

eforturile colective de cercetare ale numeroșilor specialiști din domeniul academic și din industria metalurgică.

Introducerea unui astfel de sistem inteligent este o abordare relativ nouă în domeniu. Sistemul Fuzzy poate fi adaptat la toate tipurile de instalații de turnare continuă, deoarece nu necesită schimbări hardware majore și poate fi aplicată la orice instalație de turnare continuă.

Căldura oțelului este îndepărtată parțial prin încălzirea apei de răcire din cristalizor dar cea mai mare cantitate de căldură este extrasă prin evaporarea apei, chiar dacă procentul de evaporare al apei pulverizate pe suprafața firelor este în general mai mic de 20%.

Sistemul de răcire secundar este împărțit în 3 zone: zona 1 sau zona cu role de picior situată pe ieșirea din cristalizor, zona 2 și zona 3, aceste zone au debitul de apă controlat individual. Debitul apei pulverizate trebuie să fie mai mare în partea superioară a turnării (zona 1), pentru a crește crusta semifabricatului, s-a ținut cont de acest lucru și în regulile Fuzzy.

Scopul unui sistem inteligent este de a îmbunătăți sistemul clasic de ajustare a debitului. Din punct de vedere tehnic, modificările aduse instalației nu sunt foarte mari din punct de vedere al echipamentelor, dar sunt foarte importante din punctul de vedere al sistemului de control utilizat prin introducerea unor regulatoare Fuzzy.

Sistemele clasice actuale sunt limitate la o repartitie rigidă a fluxului de apă în fiecare zonă: 40% în prima zonă, 40% în a doua zonă și 20% în a treia zonă.

Un sistem inteligent are capacitatea de a elimina dezavantajele sistemelor actuale, având posibilitatea de a modifica în timp real repartizarea fluxului de apă pentru fiecare zonă.

În cadrul tezei au fost studiate mai multe tipuri de sisteme Fuzzy având un număr diferit de intrări și ieșiri astfel:

- sistem Fuzzy pentru fiecare zonă în parte cu 3 intrări și 3 ieșiri;
- sistem Fuzzy adaptiv cu 5 intrări și 5 ieșiri;
- sistem Fuzzy adaptiv cu 3 intrări și 3 ieșiri;
- sistem Fuzzy pentru fiecare zonă în parte cu 3 intrări și o ieșire.

5.2. Structura sistemului Fuzzy pentru controlul debitului apei de răcire

Logica Fuzzy permite tratarea variabilelor vagi ale căror valori pot varia continuu în orice interval numeric definit, luând decizii în funcție de poziția indicatorului în intervalul numeric și a regulilor predefinite.

Aplicabilitatea logicii Fuzzy este variată, 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. 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.

Sistemele Fuzzy concepute primesc din proces următoarele valori, în funcție de zona de turnare în care se află semifabricatul:

- viteza de turnare în zona de răcire 1, v_1
- debitul apei de răcire în zona de răcire 1, q_1
- temperatura oțelului în zona de răcire 1, T_1
- viteza de turnare în zona de răcire 2, v_2

- debitul apei de răcire în zona de răcire 2, q_2
- temperatura a oțelului în zona de răcire 2, T_2
- viteza de turnare în zona de răcire 3, v_3
- debitul apei de răcire în zona de răcire 3, q_3
- temperatura oțelului în zona de răcire 3, T_3

Deoarece condițiile și regulile se modifică în funcție de zona în care se află semifabricatul, a fost necesară proiectarea de sisteme Fuzzy diferite pentru fiecare zonă de răcire în parte.

În funcție de viteza de turnare și temperatura oțelului, se calculează coeficientul de risc tehnologic, care afișează o valoare procentuală și determină riscul de apariție al unei fisuri, în cazul în care valoarea returnată este mai mare de 75% firul este blocat iar cantitatea de oțel rămasă în distribuitor este repartizată pe firele rămase și în același timp este crescută viteza de turnare.

În urma prelucrării datelor de intrare, se generează corecțiile necesare pentru a modifica valorile impuse ale vitezei de turnare și respectiv ale debitului apei de răcire secundară, cu scopul de a elimina orice fisură din semifabricat.

Este pentru prima dată pe plan național și mondial, când se comandă modificarea celor șase mărimi ($v_1, v_2, v_3, q_1, q_2, q_3$ viteza de turnare și debitul apei de răcire pentru fiecare zonă de răcire în parte), pentru eliminarea fisurilor din semifabricatul turnat continuu. Bazele de reguli sunt astfel concepute încât, prima mărime care se modifică este debitul apei de răcire, iar după aceea se modificată viteza de turnare. Acest principiu s-a folosit pentru a menține pe cât posibil productivitatea instalației (diminuarea vitezei de turnare duce la scăderea productivității). În figura 5.2 se prezintă schema bloc a ansamblului IFS (Intelligent Fuzzy System).

În figura 5.3 este prezentată schema bloc a structurii propuse, care este un sistem de decizie Fuzzy (IFS).

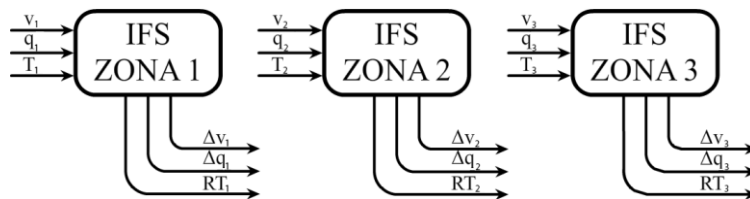
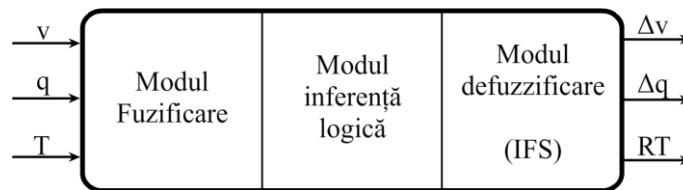


Fig. 5.2 Schema bloc a ansamblului IFS



v –viteza de turnare; q –debitul apei la răcirea secundară; T –temperatura oțelului; RT –riscul tehnologic; Δv –corecție viteza de turnare; Δq –corecție debit apă răcire secundară.

Fig. 5.3 Schema bloc a sistemului de decizie Fuzzy

În această situație, IFS (figura 5.4) v-a comanda modificări ale vitezei de turnare și ale debitului apei din răcirea secundară, pentru eliminarea riscului de apariție a unei fisuri. Se remarcă faptul că, pentru prima dată, este luat în considerare riscul de fisurare a crustei, în cazul unui procentaj de risc de peste 75% firul fiind blocat, în literatura de specialitate neexistând referiri la acest aspect.

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. 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.

5.3. Proiectarea IFS

Proiectarea propriu-zisă a IFS s-a realizat în Matlab folosind toolbox-ul Fuzzy. Practic sunt trei IFS-uri, câte un IFS pentru fiecare zonă în parte a răcirii secundare, numite IFS ZONA 1, IFS ZONA 2 și IFS ZONA 3 și au ca mărimi de intrare viteza de turnare (v), debitul apei în răcirea secundară (q), temperatura oțelului (T).

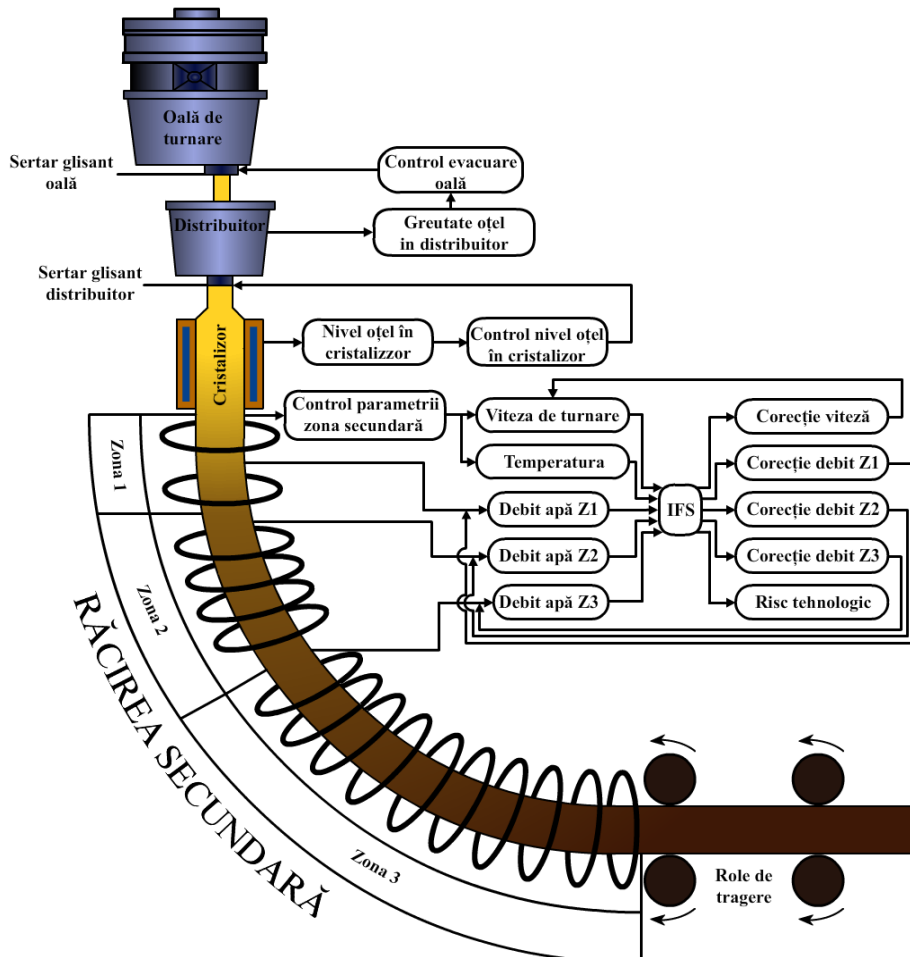


Fig. 5.4 Structura sistemului de control

Cele trei sisteme produc la ieșire câte 3 mărimi și anume: corecția debitului apei de răcire secundară, corecția vitezei de turnare și riscul tehnologic.

5.3.1. Proiectarea IFS ZONA 1

În vederea realizării IFS ZONA 1 s-au ales trei mărimi de intrare și trei mărimi de ieșire, fiind stabiliți termenii lingvistici (atât pentru intrări cât și pentru ieșiri), funcțiile de apartenență și baza de reguli. În figura 5.5 este prezentată schema bloc a IFS-ZONA 1.

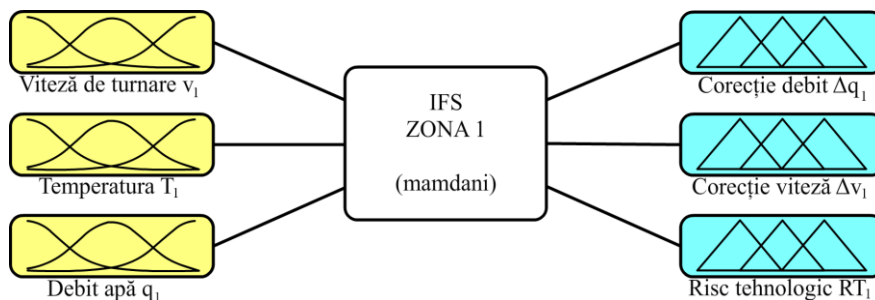


Fig. 5.5 Schema bloc IFS pentru ZONA 1

Având în vedere caracteristicile procesului au fost adoptate funcții de apartenență de tip triunghiular, atât pentru mărimile de intrare cât și pentru cele de ieșire.

I. Informații „mărimi intrare”

Pentru două dintre mărimile de intrare (viteză turnare v_1 și temperatura T_1) s-au ales câte patru termeni lingvistici (Mică, F.Mică, Mare, Risc), iar pentru debit apă q_1 s-au ales câte doi termeni lingvistici (Mic, Mare) și se pot observa în figurile 5.6 - 5.7.

În Tabelul 5.1 se prezintă valorile și tendința vitezei de turnare v_1 .

1) Viteza de turnare v_1 [m/min].

Tabelul 5.1 Valorile reale și tendința pentru viteza de turnare v_1

| Stări | Domeniul real [m/min] | Tendința |
|--------|-----------------------|----------|
| F.Mică | [0,6 ÷ 1,15] | Scădere |
| Mică | [0,6 ÷ 1,7] | Scădere |
| Mare | [0,6 ÷ 1,7] | Creștere |
| Risc | [1,15 ÷ 1,7] | Creștere |

Număr stări: 4

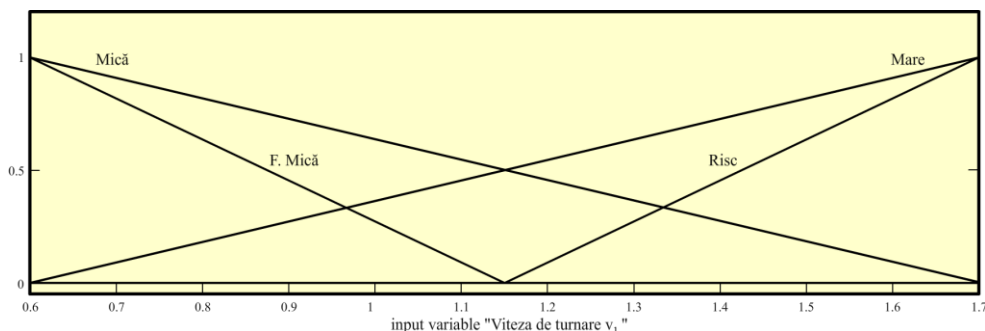


Fig. 5.6 Funcții de apartenență „Viteza de turnare v_1 ”

În Tabelul 5.2 se prezintă valorile reale și tendința pentru temperatura oțelului.

2) Temperatura oțelului T_1 (Diferența de temperatură a oțelului față de temperatura lichidus, [°C]).

Tabelul 5.2 Valorile reale și tendința pentru temperatura oțelului

| Stări | Domeniul real [°C] | Tendința |
|--------|--------------------|----------|
| F.Mică | [5 ÷ 37,5] | Scădere |
| Mică | [5 ÷ 70] | Scădere |
| Mare | [5 ÷ 70] | Creștere |
| Risc | [37,5 ÷ 70] | Creștere |

Număr stări: 4

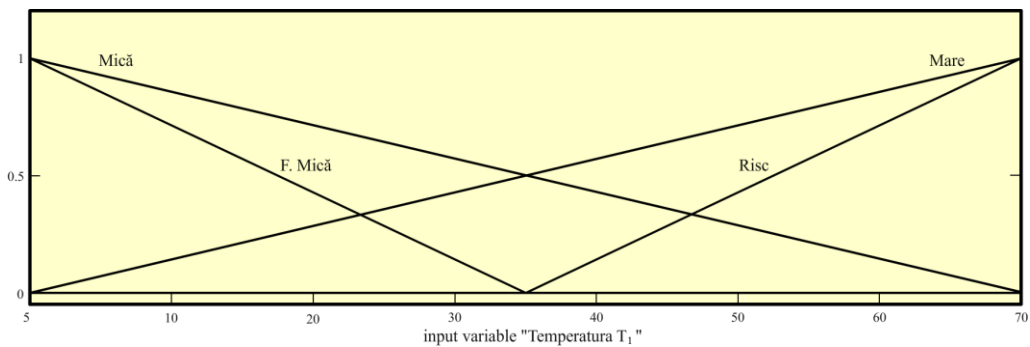


Fig. 5.7 Funcții de apartenență „Temperatură T_1 ”

În Tabelul 5.3 se prezintă valorile reale și tendința pentru debitul apei.

3) Debit apă q_1 (debitul apei de răcire, [l/min]).

Tabelul 5.3 Valorile reale și tendința pentru debitul apei

| Stări | Domeniul real [l/min] | Tendința |
|-------|-----------------------|----------|
| Mic | [60 ÷ 168] | Scădere |
| Mare | [60 ÷ 168] | Creștere |

Număr stări: 2

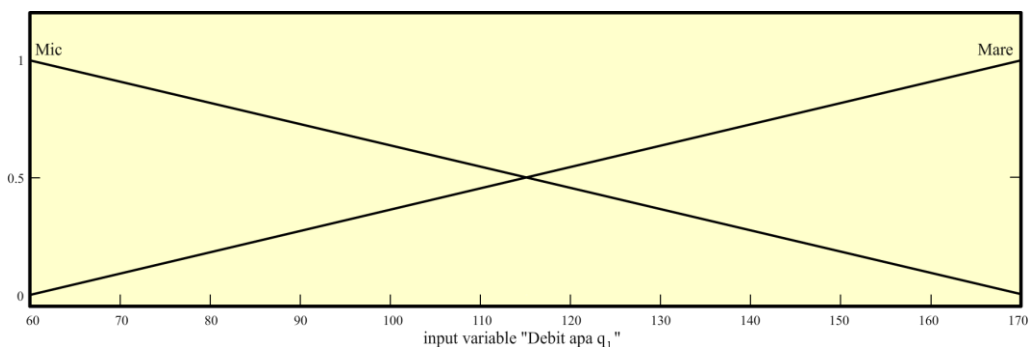


Fig. 5.8 Funcții de apartenență „Debit apă q_1 ”

II. Informații „mărimi ieșire”

Pentru mărimea de ieșire Risc Tehnologic RT_1 s-a ales un singur termen lingvistic (Crește), pentru Corecție Debit Δq_1 doi termeni (Scade și Crește) iar

pentru Corecție Viteză Δv_1 trei termeni lingvistici (Scade, Crește și Risc). În Tabelul 5.4 se prezintă valorile reale și tendința pentru corecția debitul apei de răcire în zona de răcire secundară.

4) Corecție debit Δq_1 (corecția debitul apei în zona de răcire secundară, [l/min]).

Tabelul 5.4 Valorile reale și tendința pentru corecția debitul apei

| Stări | Domeniul real [l/min] | Tendința |
|--------|-----------------------|----------|
| Scade | [-108 ÷ 108] | Scădere |
| Crește | [-108 ÷ 108] | Creștere |

Număr stări: 2

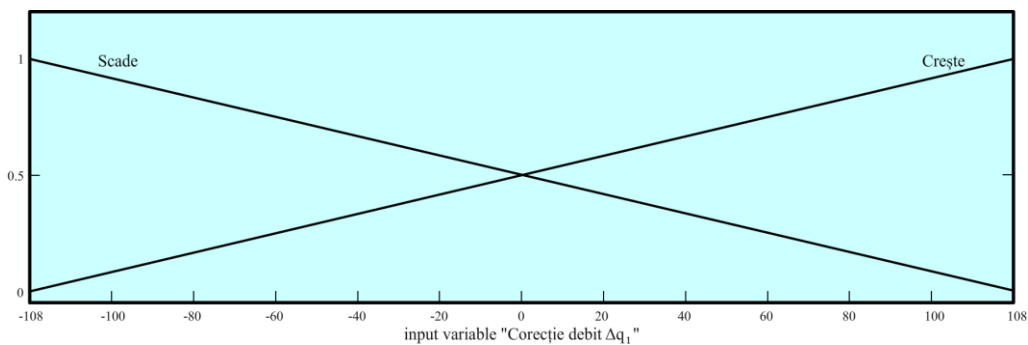


Fig. 5.9 Funcții de apartenență „Corecție debit Δq_1 ”

În Tabelul 5.5 se prezintă valorile reale și tendința pentru corecția vitezei.

5) Corecție viteză Δv_1 (corecția vitezei de turnare, [m/min]).

Tabelul 5.5 Valorile reale și tendința pentru corecția vitezei

| Stări | Domeniul real [m/min] | Tendința |
|--------|-----------------------|----------|
| Scade | [-1,1 ÷ 1,1] | Scădere |
| Crește | [-1,1 ÷ 1,1] | Creștere |
| Risc | [0 ÷ 1,1] | Creștere |

Număr stări: 3

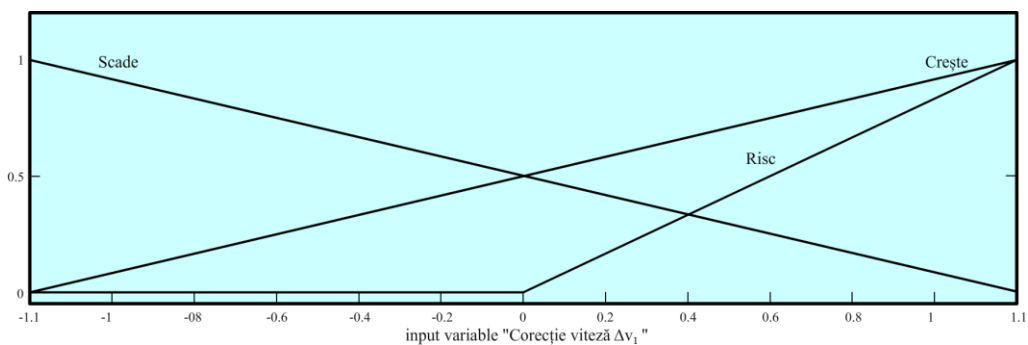


Fig. 5.10 Funcții de apartenență „Corecție viteză Δv_1 ”

În Tabelul 5.6 se prezintă valorile reale și tendința pentru riscul tehnologic.

6) Risc tehnologic RT_1 [%].

Tabelul 5.6 Valorile reale și tendința pentru riscul tehnologic

| Stări | Domeniul real [%] | Tendința |
|--------|-------------------|----------|
| Crește | [0 ÷ 100] | Creștere |

Număr stări: 1

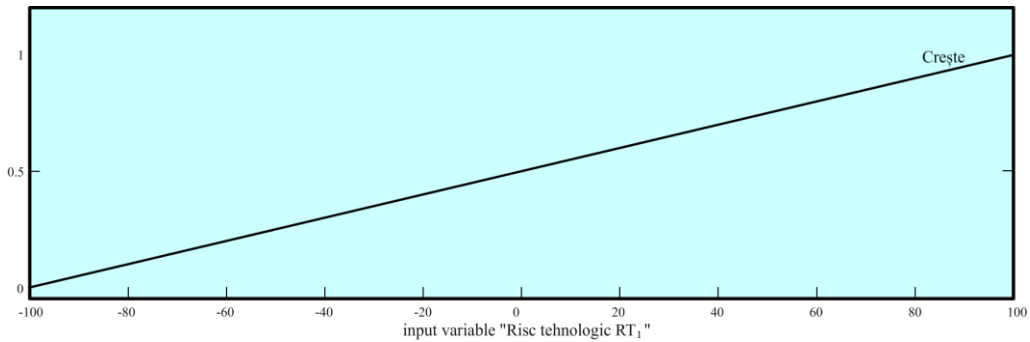


Fig. 5.11 Funcții de apartenență „Risc tehnologic RT₁”

Inferența utilizată este de tip Mamdani max-min iar tabela de inferență pentru reguli este prezentată în figura 5.12. Sunt surprinse valorile la un moment oarecare de timp pentru mărimile de intrare (viteză turnare=1.2, diferența de temperatura=50, debit apă=100) și valorile corecțiilor efectuate de către IFS ZONA 1 (corecție debit apă=68, corecție viteză turnare=-0.605, risc tehnologic=10).

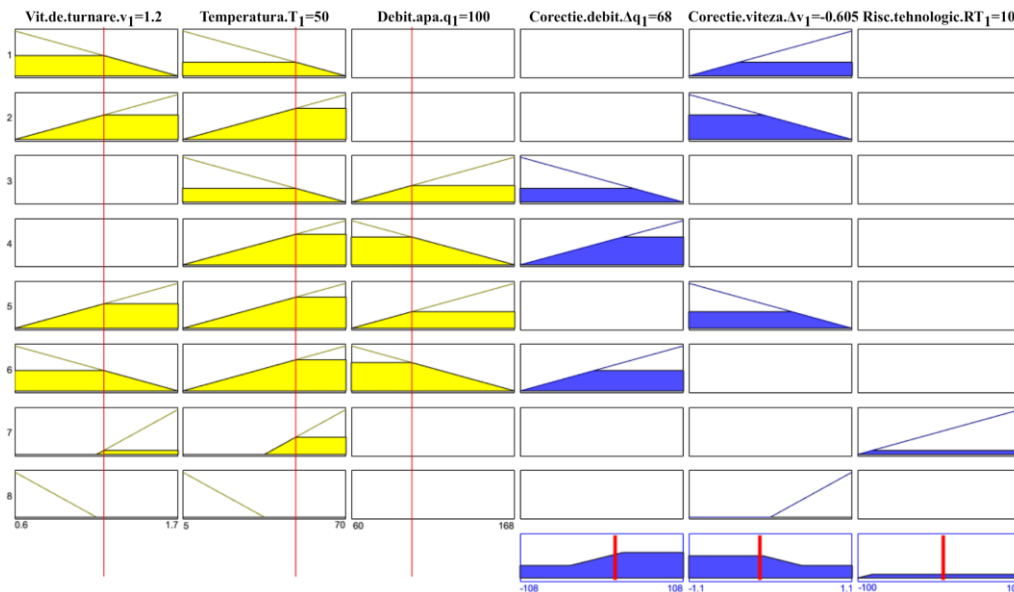


Fig. 5.12 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 1

5.3.2. Proiectarea IFS ZONA 2

În vederea realizării IFS ZONA 2 s-au ales trei mărimi de intrare și trei mărimi de ieșire, fiind stabiliți termenii lingvistici (atât pentru intrări cât și pentru ieșiri), funcțiile de apartenență și baza de reguli. În figura 5.13 este prezentată schema bloc a IFS ZONA 2.

Având în vedere caracteristicile procesului au fost adoptate funcții de apartenență de tip triunghiular, atât pentru mărimile de intrare cât și pentru cele de ieșire.

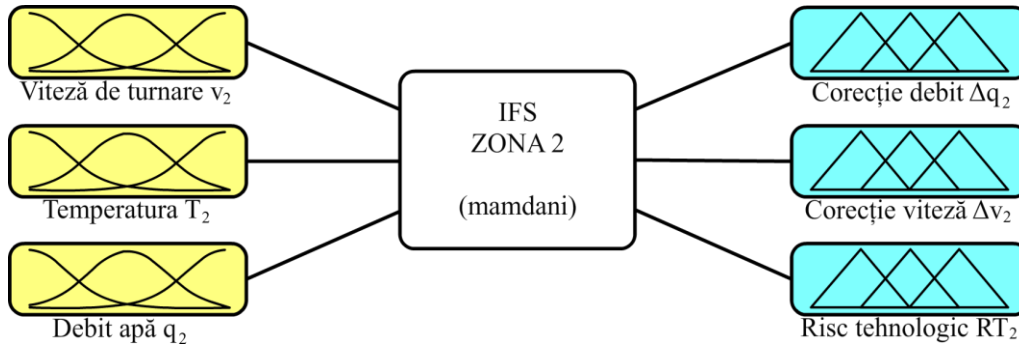


Fig. 5.13 Schema bloc a IFS ZONA 2

I. Informații „mărimi intrare”

Pentru două dintre mărimile de intrare (viteză turnare v_2 și temperatura T_2) s-au ales câte patru termeni lingvistici (Mică, F.Mică, Mare, Risc), iar pentru debit apă q_2 s-au ales câte doi termeni lingvistici (Mic, Mare) și se pot observa în figurile 5.14 - 5.16.

În Tabelul 5.7 se prezintă valorile reale și tendința vitezei de turnare v_2 .

7) Viteza de turnare v_2 (viteza de turnare, [m/min]).

Tabelul 5.7 Valorile reale și tendința pentru viteza de turnare

| Stări | Domeniul real [m/min] | Tendința |
|--------|-----------------------|----------|
| F.Mică | [0,6 ÷ 1,15] | Scădere |
| Mică | [0,6 ÷ 1,7] | Scădere |
| Mare | [0,6 ÷ 1,7] | Creștere |
| Risc | [1,15 ÷ 1,7] | Creștere |

Număr stări: 4

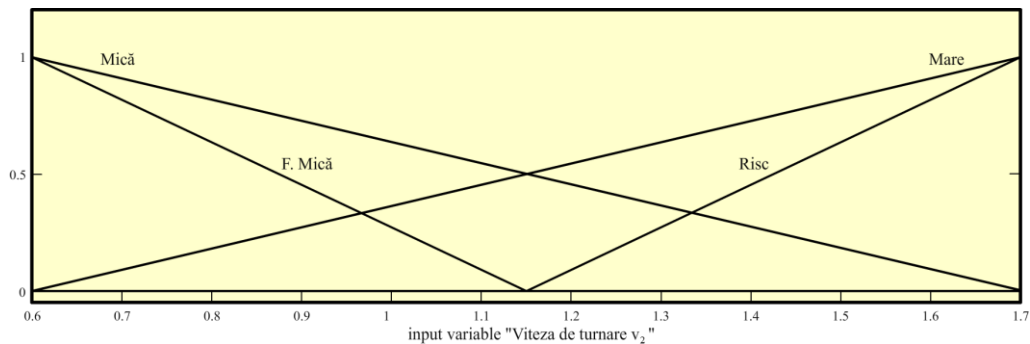


Fig. 5.14 Funcții de apartenență „Viteza de turnare v_2 ”

În Tabelul 5.8 se prezintă valorile reale și tendința pentru temperatura oțelului.

8) Temperatura oțelului T_2 (Diferența de temperatură a oțelului față de temperatura lichidus, [°C]).

Tabelul 5.8 Valorile reale și tendința pentru temperatura oțelului

| Stări | Domeniul real [°C] | Tendința |
|--------|--------------------|----------|
| F.Mică | [5 ÷ 37,5] | Scădere |
| Mică | [5 ÷ 70] | Scădere |
| Mare | [5 ÷ 70] | Creștere |
| Risc | [37,5 ÷ 70] | Creștere |

Număr stări: 4

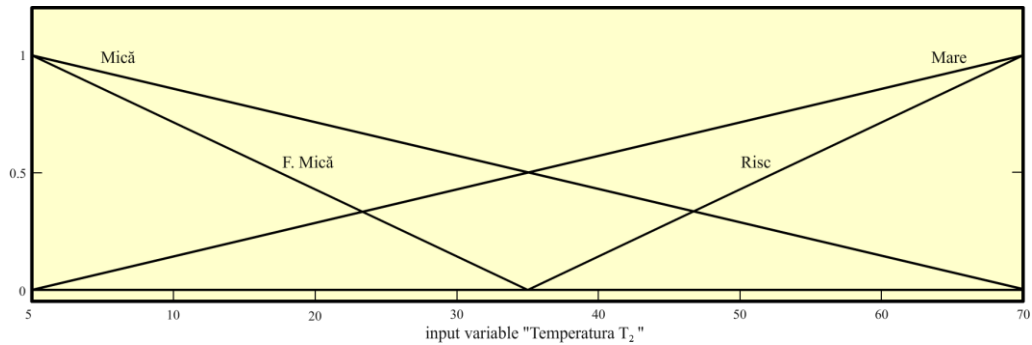


Fig. 5.15 Funcții de apartenență „Temperatură T₂”

În Tabelul 5.9 se prezintă valorile reale și tendința pentru debitul apei.

9) Debit apă q₂ (debitul apei de răcire, [l/min]).

Tabelul 5.9 Valorile reale și tendința pentru debitul apei

| Stări | Domeniul real [l/min] | Tendința |
|-------|-----------------------|----------|
| Mic | [85 ÷ 238] | Scădere |
| Mare | [85 ÷ 238] | Creștere |

Număr stări: 2

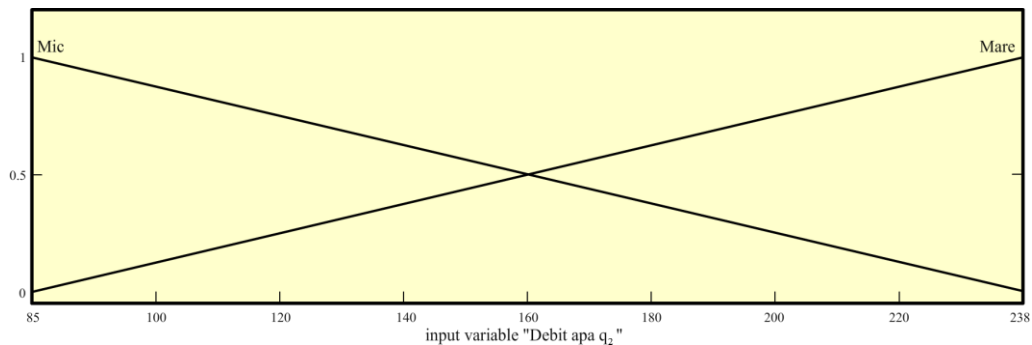


Fig. 5.16 Funcții de apartenență „Debit apă q₂”

II. Informații „mărimi ieșire”

Pentru mărirea de ieșire Risc Tehnologic RT₂ s-a ales un singur termen lingvistic (Crește), pentru Corecție Debit Δq₂ doi termeni (Scade și Crește) iar pentru Corecție Viteză Δv₂ trei termeni lingvistici (Scade, Crește și Risc). În Tabelul 5.10 se prezintă valorile reale și tendința pentru corecția debitul apei de răcire în zona de răcire secundară.

10) Corecție debit Δq_2 (corecția debitul apei în zona de răcire secundară, [l/min]).

Tabelul 5.10 valorile reale și tendința pentru corecția debitul apei de răcire

| Stări | Domeniul real [l/min] | Tendința |
|--------|-----------------------|----------|
| Scade | [-153 ÷ 153] | Scădere |
| Crește | [-153 ÷ 153] | Creștere |

Număr stări: 2

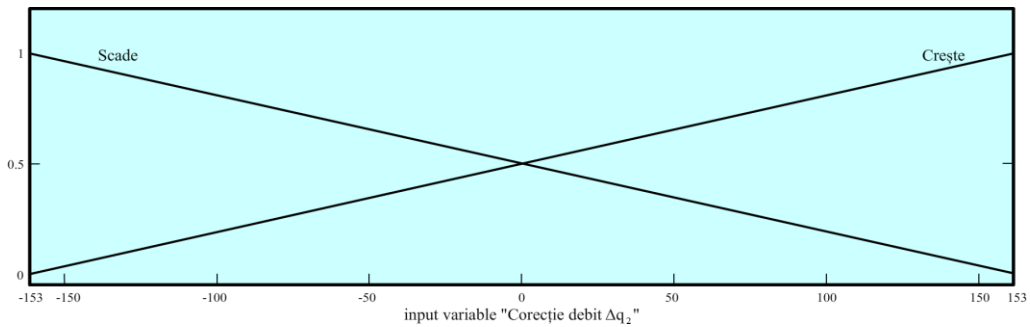


Fig. 5.17 Funcții de apartenență „Corecție debit Δq_2 ”

În Tabelul 5.11 se prezintă valorile reale și tendința pentru corecția vitezei.

11) Corecție viteză Δv_2 (corecția vitezei de turnare, [m/min]).

Tabelul 5.11 Valorile reale și tendința pentru corecția vitezei

| Stări | Domeniul real [m/min] | Tendința |
|--------|-----------------------|----------|
| Scade | [-1,1 ÷ 1,1] | Scădere |
| Crește | [-1,1 ÷ 1,1] | Creștere |
| Risc | [0 ÷ 1,1] | Creștere |

Număr stări: 3

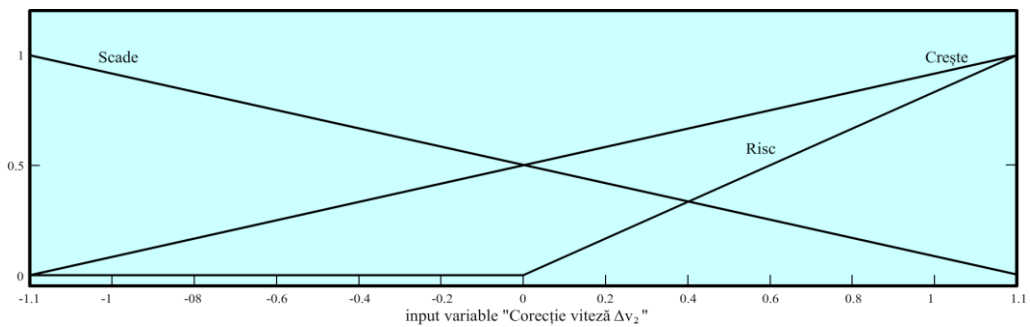


Fig. 5.18 Funcții de apartenență „Corecție viteză Δv_2 ”

În Tabelul 5.12 se prezintă valorile reale și tendința pentru riscul tehnologic.

12) Risc tehnologic RT_2 [%].

Tabelul 5.12 Valorile reale și tendința pentru riscul tehnologic

| Stări | Domeniul real [%] | Tendința |
|--------|-------------------|----------|
| Crește | [0 ÷ 100] | Creștere |

Număr stări: 1

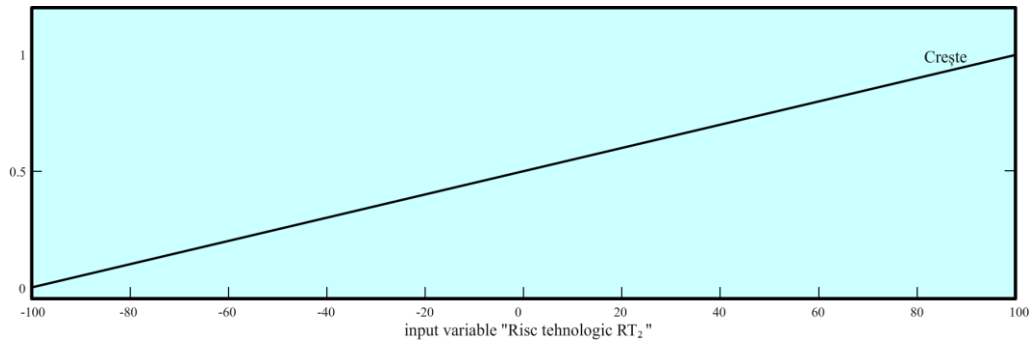


Fig. 5.19 Funcții de apartenență „Risc tehnologic RT₂”

Inferența utilizată este de tip Mamdani max-min iar tabela de inferență pentru reguli este prezentată în figura 5.20. Sunt surprinse valorile la un moment oarecare de timp pentru mărimile de intrare (viteză turnare=1.2, diferența de temperatura=50, debit apă=100) și valorile corecțiilor efectuate de către IFS ZONA 2 (corecție debit apă=107, corecție viteză turnare=-0,605, risc tehnologic=10).

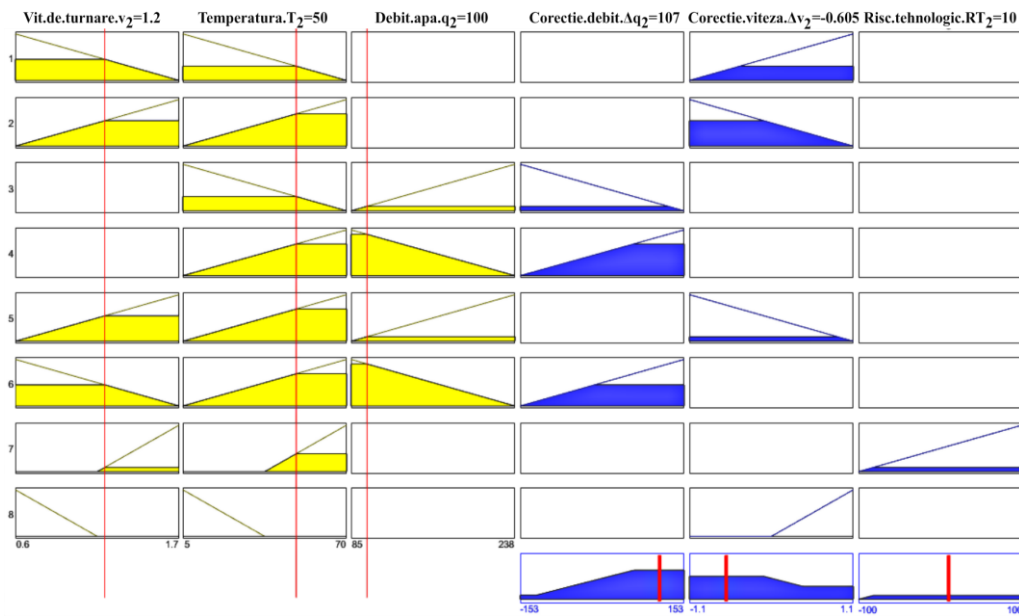


Fig. 5.20 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 2

5.3.3. Proiectarea IFS ZONA 3

În vederea realizării IFS ZONA 3 s-au ales trei mărimi de intrare și trei mărimi de ieșire, fiind stabiliți termenii lingvistici (așa pentru intrări cât și pentru ieșiri), funcțiile de apartenență și baza de reguli. În figura 5.21 este prezentată schema bloc a IFS ZONA 3.

Având în vedere caracteristicile procesului au fost adoptate funcții de apartenență de tip triunghiular, atât pentru mărimile de intrare cât și pentru cele de ieșire.

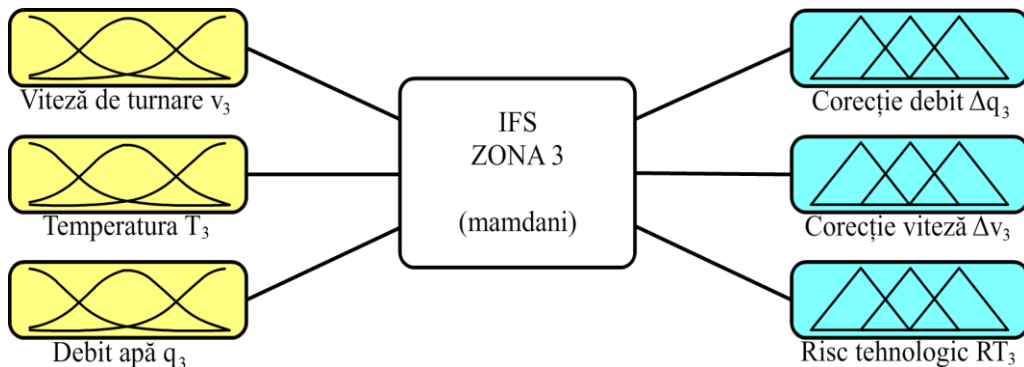


Fig. 5.21 Schema bloc a IFS ZONA 3

I Informații „mărimi intrare”

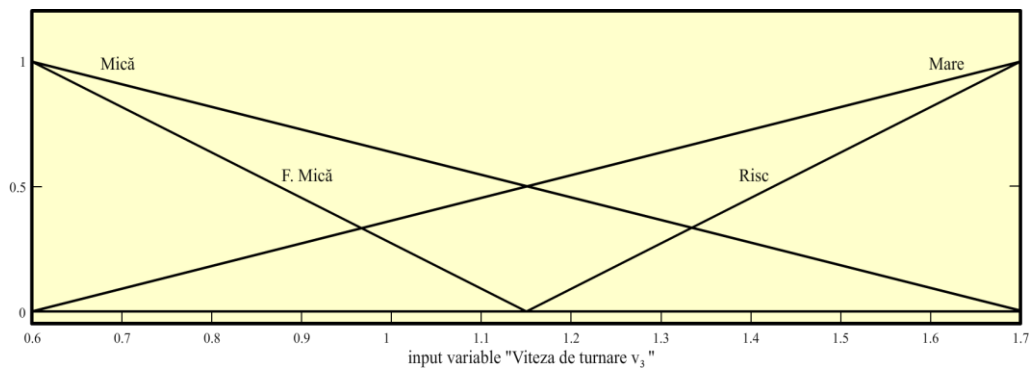
Pentru două dintre mărimile de intrare (viteză turnare v_3 și temperatura T_3) s-au ales câte patru termeni lingvistici (Mică, F.Mică, Mare, Risc), iar pentru debit apă q_3 s-au ales câte doi termeni lingvistici (Mic, Mare) și se pot observa în figurile 5.22 - 5.25. În Tabelul 5.13 se prezintă valorile reale și tendința pentru viteza de turnare v_3 .

13) Viteza de turnare v_3 (viteza de turnare, [m/min]).

Tabelul 5.13 Valorile reale și tendința pentru viteza de turnare

| Stări | Domeniul real [m/min] | Tendința |
|--------|-----------------------|----------|
| F.Mică | [0,6 - 1,15] | Scădere |
| Mică | [0,6 - 1,7] | Scădere |
| Mare | [0,6 - 1,7] | Creștere |
| Risc | [1,15 - 1,7] | Creștere |

Număr stări: 4

Fig. 5.22 Funcții de apartenență „Viteza de turnare v_3 ”

În Tabelul 5.14 se prezintă valorile reale și tendința pentru temperatura oțelului.

14) Temperatura oțelului T_3 (Diferența de temperatură a oțelului față de temperatura în lichidus, [°C]).

Tabelul 5.14 Valorile reale și tendința pentru temperatura oțelului

| Stări | Domeniul real [°C] | Tendința |
|---------|--------------------|----------|
| F. Mică | [5 - 37,5] | Scădere |
| Mică | [5 - 70] | Scădere |
| Mare | [5 - 70] | Creștere |
| Risc | [37,5 - 70] | Creștere |

Număr stări: 4

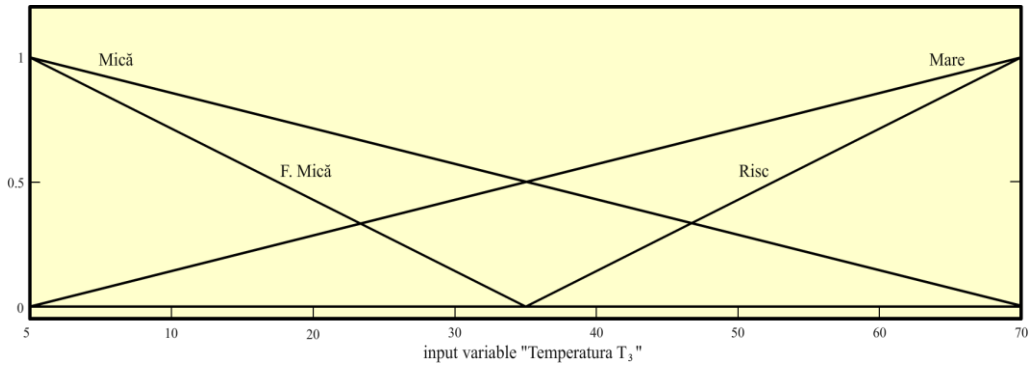


Fig. 5.23 Funcții de apartenență „Temperatura T₃”

În Tabelul 5.15 se prezintă valorile reale și tendința pentru debitul apei.
 15) Debit apă q₃ (debitul apei de răcire, [l/min]).

Tabelul 5.15 valorile reale și tendința pentru debitul apei

| Stări | Domeniul real [l/min] | Tendința |
|-------|-----------------------|----------|
| Mic | [105 ÷ 294] | Scădere |
| Mare | [105 ÷ 294] | Creștere |

Număr stări: 2

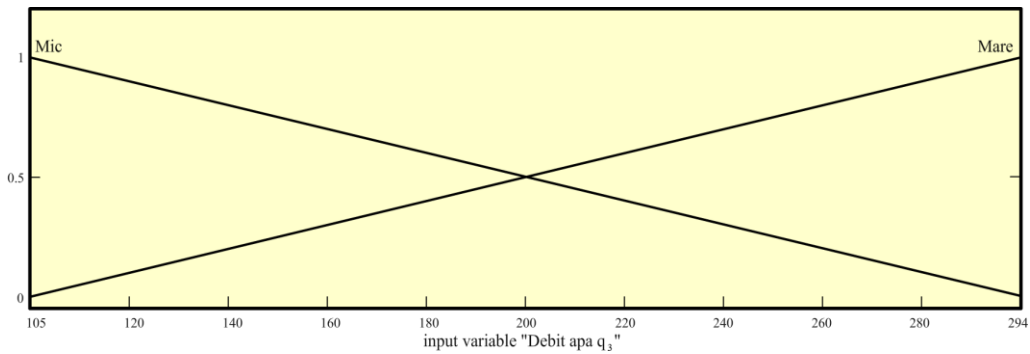


Fig. 5.24 Funcții de apartenență „Debit apă q₃”

II. Informații „mărimi ieșire”

Pentru mărirea de ieșire Risc Tehnologic RT₃ s-a ales un singur termen lingvistic (Crește), pentru Corecție Debit Δq₃ doi termeni (Scade și Crește) iar pentru Corecție Viteză Δv₃ trei termeni lingvistici (Scade, Crește și Risc). În Tabelul 5.16 se prezintă valorile reale și tendința pentru corecția debitul apei de răcire în zona de răcire secundară.

Corecție debit Δq_3 (corecția debitul apei în zona de răcire secundară, [l/min])

Tabelul 5.16 Valorile reale și tendința pentru corecția debitul apei de răcire

| Stări | Domeniul real [l/min] | Tendința |
|--------|-----------------------|----------|
| Scade | [-189 ÷ 189] | Scădere |
| Crește | [-189 ÷ 189] | Creștere |

Număr stări: 2

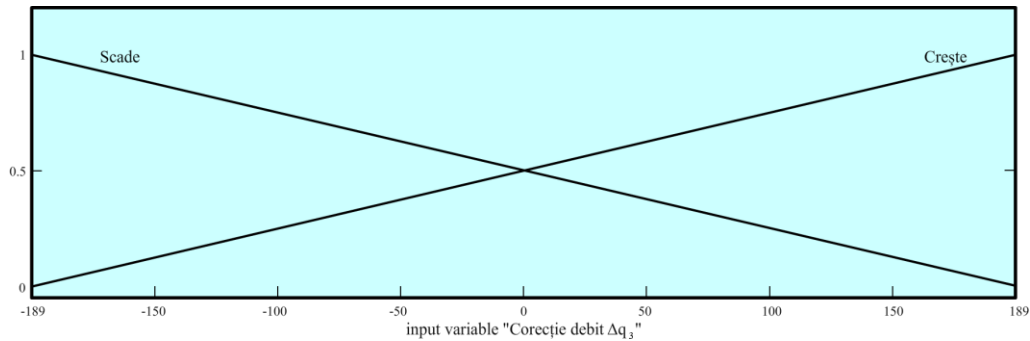


Fig. 5.25 Funcții de apartenență „Corecție debit Δq_3 ”

În Tabelul 5.17 se prezintă valorile reale și tendința pentru corecția vitezei.
16) Corecție viteză Δv_3 (corecția vitezei de turnare, [m/min]).

Tabelul 5.17 Valorile reale și tendința pentru corecția vitezei

| Stări | Domeniul real [m/min] | Tendința |
|--------|-----------------------|----------|
| Scade | [-1,1 ÷ 1,1] | Scădere |
| Crește | [-1,1 ÷ 1,1] | Creștere |
| Risc | [0 ÷ 1,1] | Creștere |

Număr stări: 3

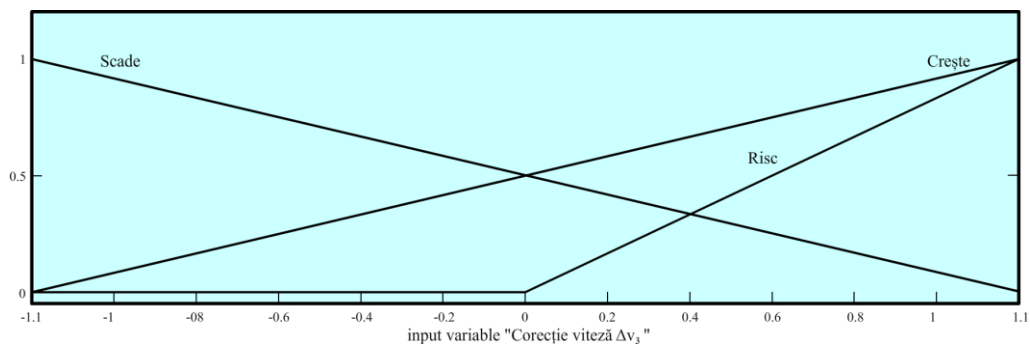


Fig. 5.26 Funcții de apartenență „Corecție viteză Δv_3 ”

Inferența utilizată este de tip Mamdani max-min iar tabela de inferență pentru reguli este prezentată în figura 5.27. Sunt surprinse valorile la un moment oarecare de timp pentru mărimile de intrare (viteză turnare=1.2, diferența de temperatura=50, debit apă=150) și valorile corecțiilor efectuate de către IFS ZONA 3 (corecție debit apă=41.8, corecție viteză turnare=-0.143, risc tehnologic=4.98).

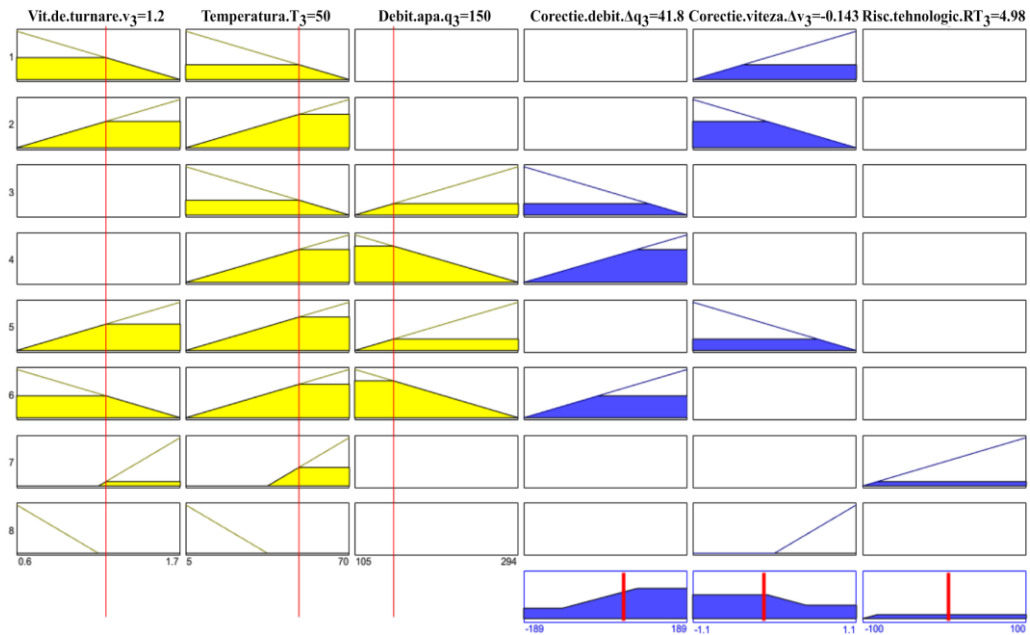


Fig. 5.27 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 3

În Tabelul 5.18 se prezintă valorile reale și tendința pentru riscul tehnologic.
 17) Risc tehnologic RT_3 [%].

Tabelul 5.18 Valorile reale și tendința pentru riscul tehnologic

| Stări | Domeniul real [%] | Tendința |
|--------|-------------------|----------|
| Crește | [0 ÷ 100] | Creștere |

Număr stări: 1

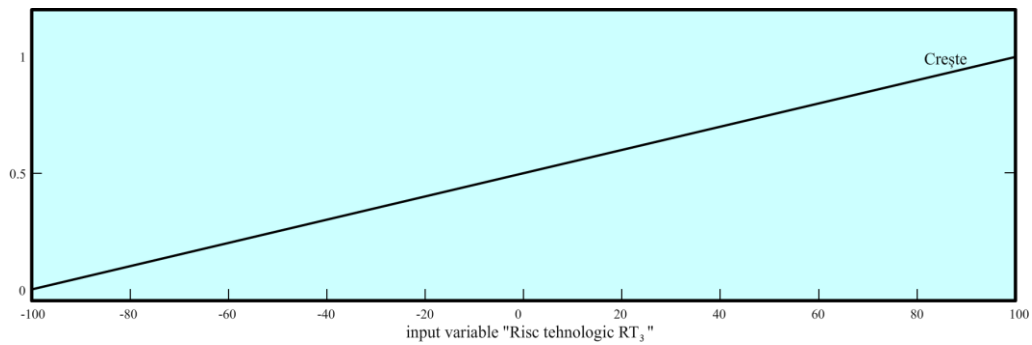


Fig. 5.28 Funcții de apartenență „Risc tehnologic RT_3 ”

5.4. Simularea funcționării sistemului de decizie Fuzzy

Pentru analiza calitativă a funcționării IFS, se propune simularea acestuia cu ajutorul mediului Matlab-Simulink. În figura 5.29 se prezintă implementarea IFS-ZONA 1 în Matlab-Simulink. Citirea temperaturii este simulată după datele obținute din proces folosind un șir de date numerice. Pentru a porni simularea trebuie

introduse mărimile vitezei de turnare și a debitului apei, programul v-a corecta aceste valori folosind o buclă prin care corecția obținută modifică datele de intrare. Timpul de funcționare al simulării este de 1000 de secunde, fiecare buclă de calcul având 3.2 secunde.

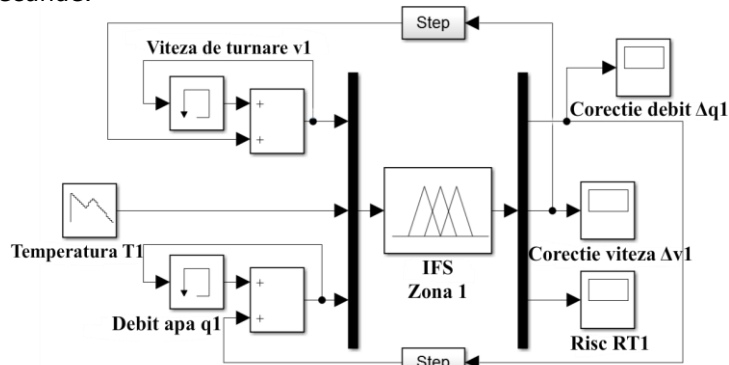


Fig. 5.29 Implementarea în Simulink a IFS Zona 1

În figura 5.30 se prezintă valorile variabilelor de intrare. Cunoscute sunt temperatura și variabilele de începere a turnării, în acest caz am ales valoarea vitezei de pornire a simulării de 1.5 m/sec și 168 l/min pentru debitul apei de răcire, am ales aceste valori cu factor de risc ridicat pentru a evidenția remedierea riscului în primele 30 de secunde ale simulării ce poate fi văzut în figura 5.31.

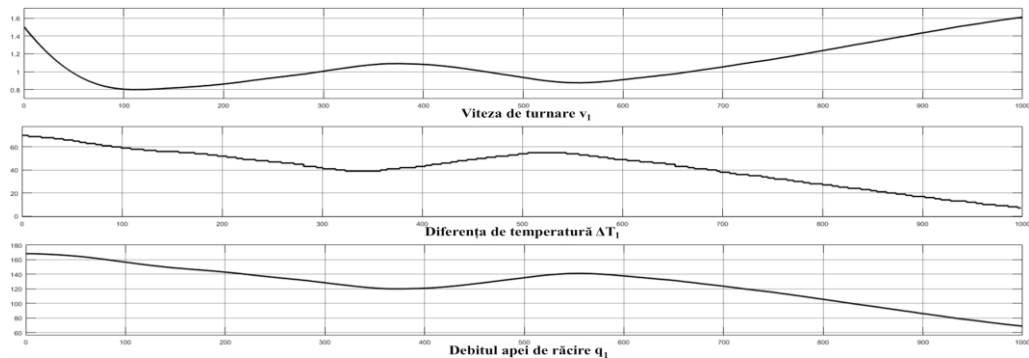


Fig. 5.30 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS Zona 1

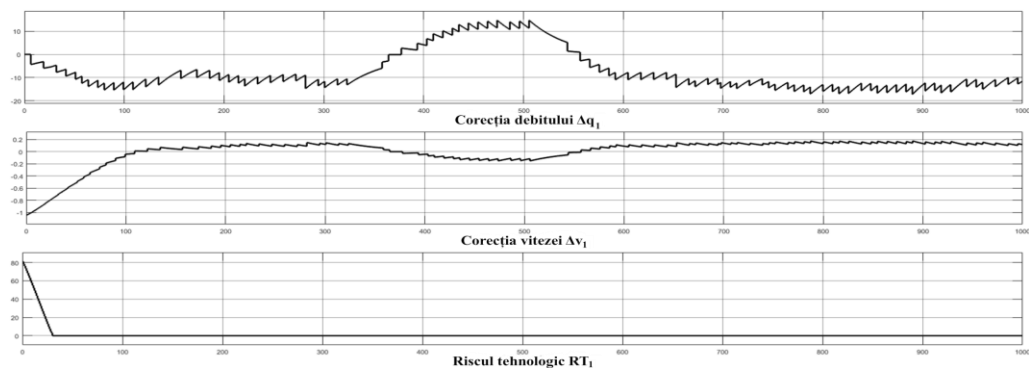


Fig. 5.31 Corecțiile realizate de către IFS Zona 1

În figura 5.32 se prezintă implementarea IFS Zona 2 în Matlab-Simulink.

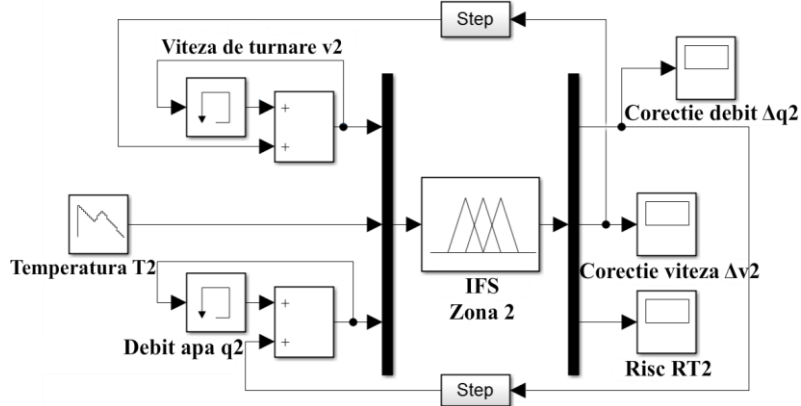


Fig. 5.32 Implementarea în Simulink a IFS Zona 2

În figura 5.33 se prezintă valorile variabilelor de intrare. Cunoscute sunt temperatura și variabilele de începere a turnării, în acest caz s-a ales valoarea de pornire a simulării pentru viteza de turnare este de 1,4 m/min și 220 l/min pentru debitul apei de răcire, s-a ales aceste valori cu factor de risc ridicat pentru a evidenția remedierea riscului în primele 25 de secunde ale simulării ce poate fi văzut în figura 5.34.

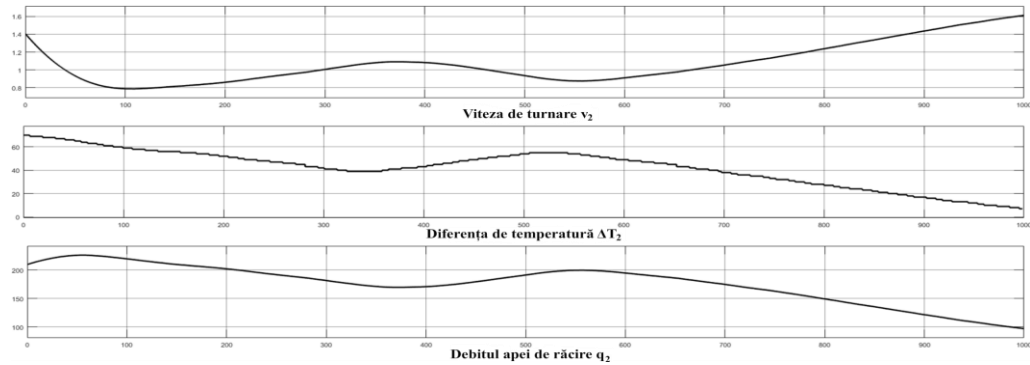


Fig. 5.33 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS Zona 2

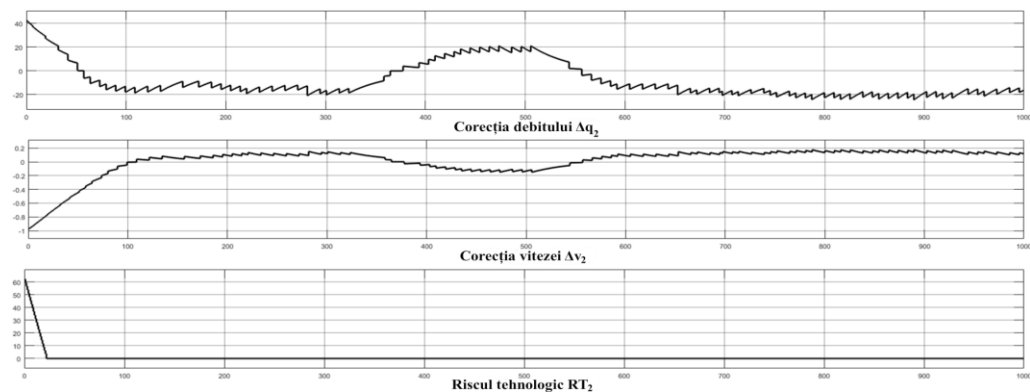


Fig. 5.34 Corecțiile realizate de către IFS Zona 2

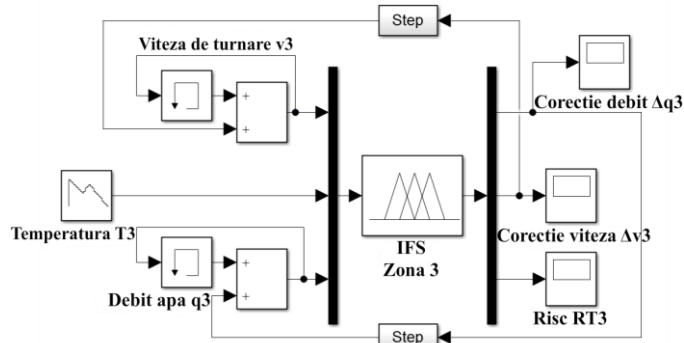


Fig. 5.35 Implementarea în Simulink a IFS Zona 3

În figura 5.35 este afișată implementarea IFS Zona 3 în Matlab-Simulink.

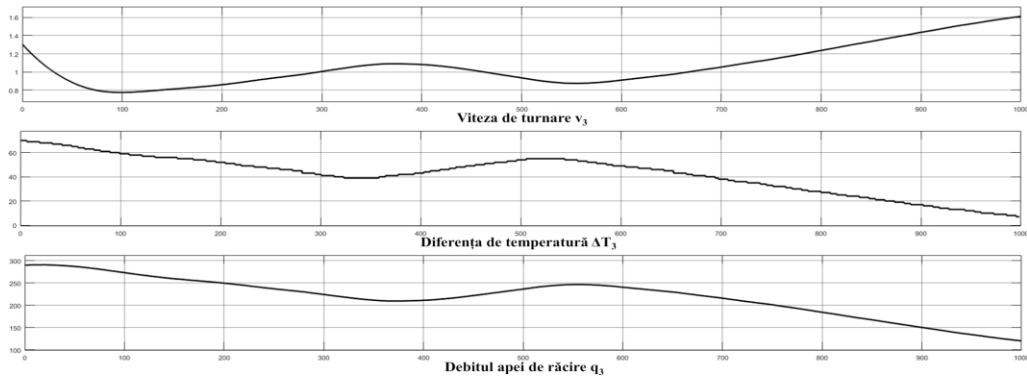


Fig. 5.36 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS Zona 3

În figura 5.36 se prezintă valorile variabilelor de intrare. Cunoscute sunt temperatura și variabilele de începere a turnării, în acest caz s-a ales valoarea de pornire a simulării pentru viteza de turnare de 1,3 m/sec și 280 l/min pentru debitul apei de răcire, s-au ales aceste valori cu factor de risc ridicat pentru a evidenția remedierea riscului în primele 20 de secunde ale simulării ce poate fi văzut în figura 5.37.

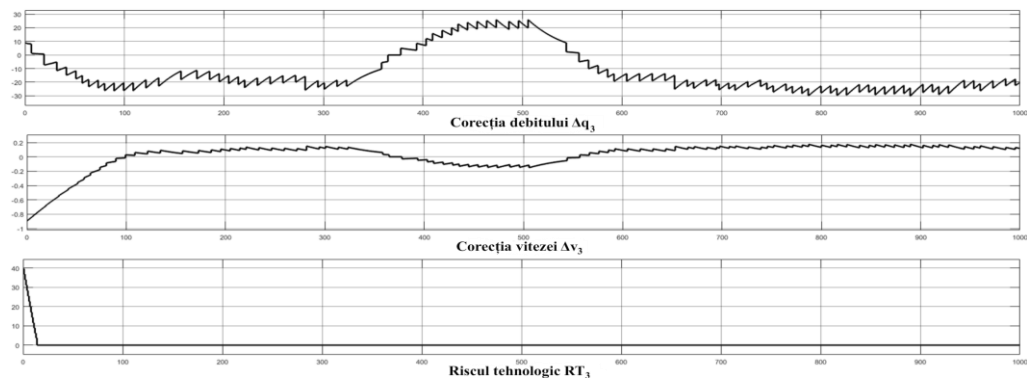


Fig. 5.37 Corecțiile realizate de către IFS Zona 3

Sistemul prezentat mai sus, cu 3 sisteme Fuzzy individuale poate fi pus în practică, dar am avea nevoie de 3 PLC-uri programabile SIEMENS, cate unul pe fiecare zonă în parte, ceea ce ar presupune costuri relativ mari, motiv pentru care se propune o soluție cu un singur sistem Fuzzy cu 5 intrări și 5 ieșiri cum se poate observa în figura 5.38.

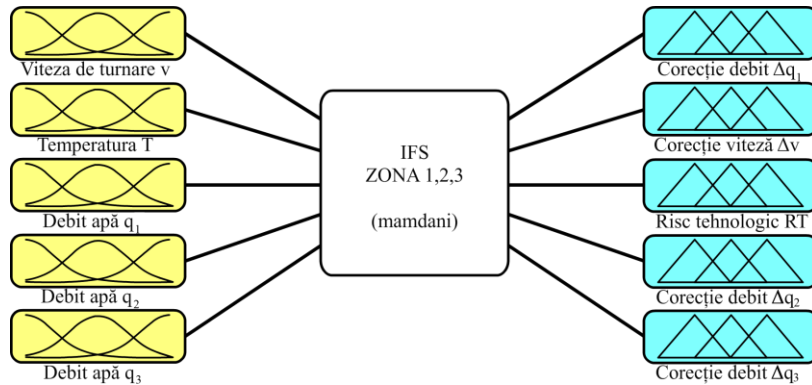


Fig. 5.38 Schema bloc IFS ZONA 1,2,3

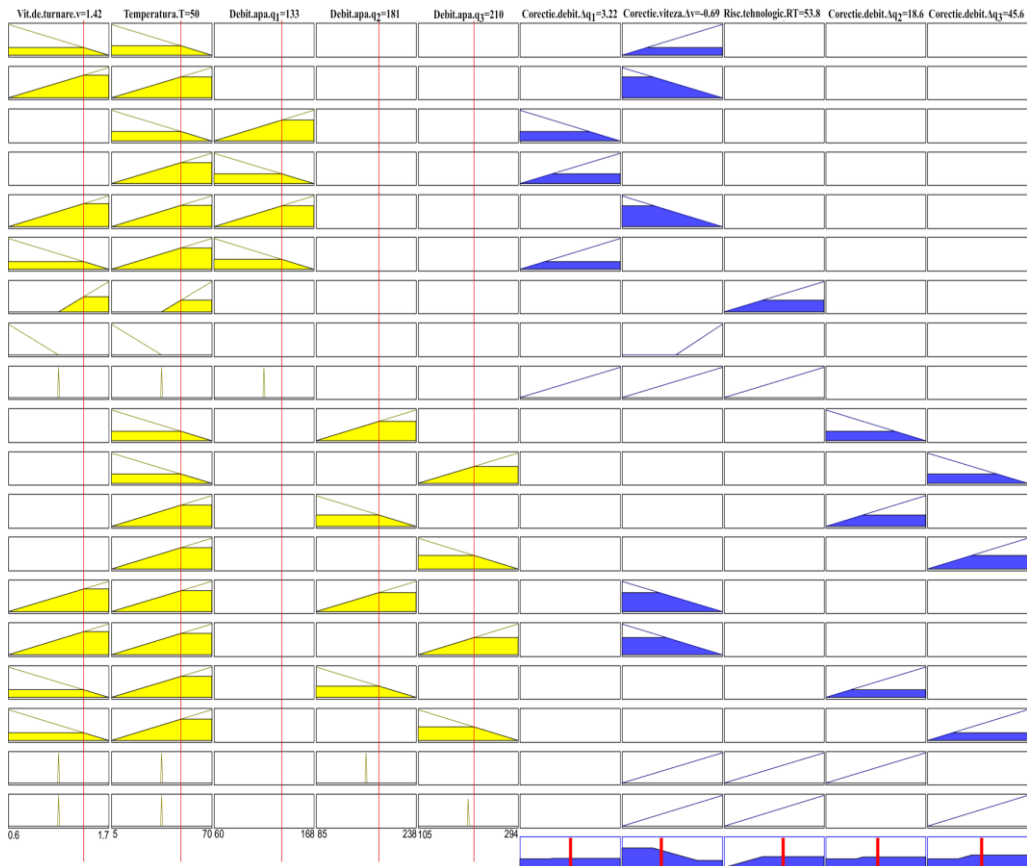


Fig. 5.39 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 1,2,3

În figura 5.39 este prezentată simularea sistemului Fuzzy de mai sus în simulink. Rezultatele fiind identice cu primele trei sisteme discutate la începutul capitolului dar sistemul poate fi creat folosind un singur PLC.

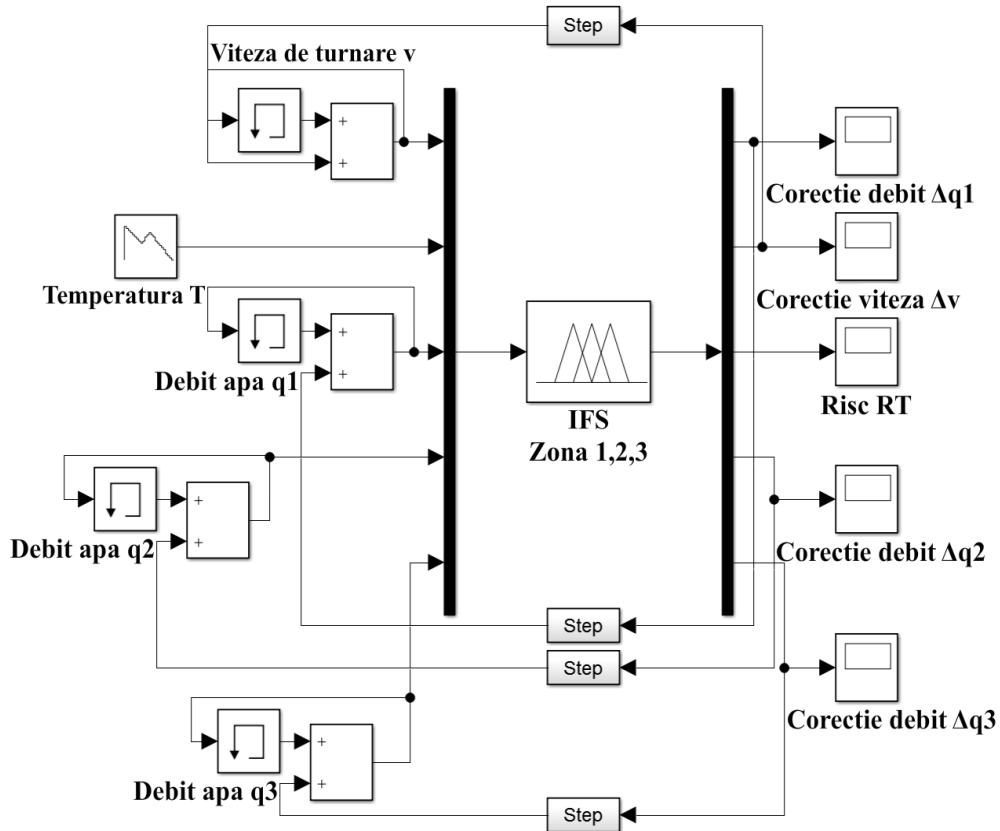


Fig. 5.40 Implementarea în Simulink a IFS ZONA 1,2,3

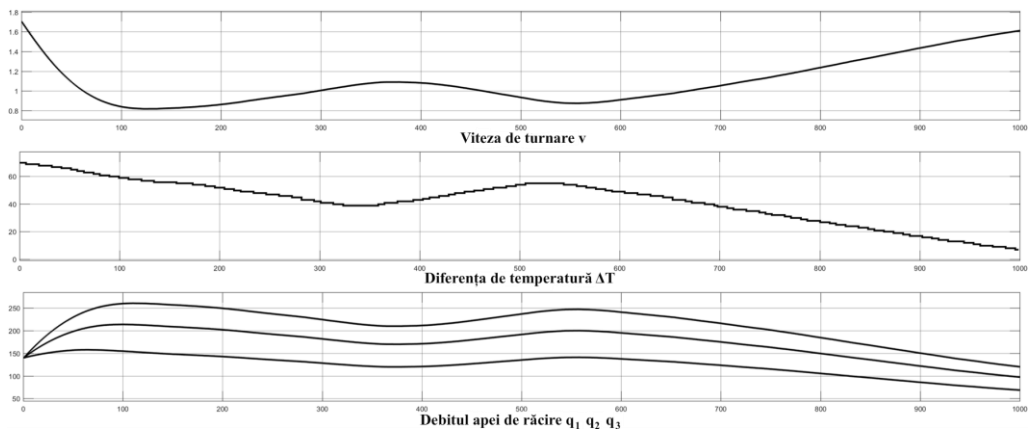


Fig. 5.41 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS ZONA 1,2,3

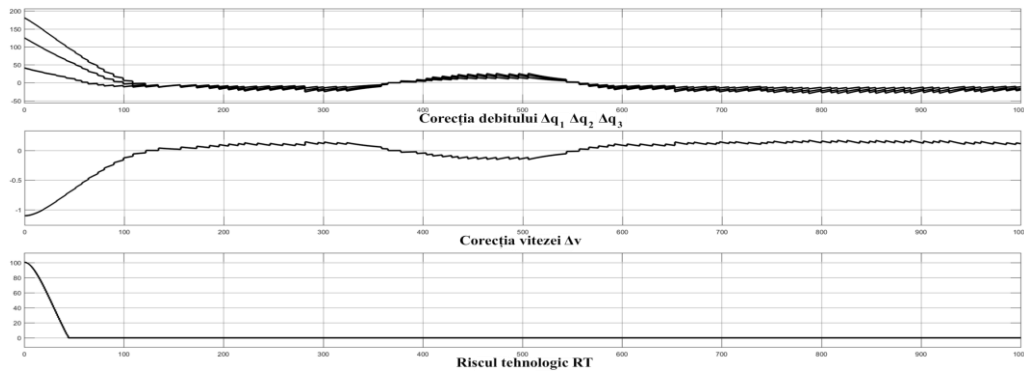


Fig. 5.42 Corecțiile realizate de către IFS ZONA 1,2,3

Sistemul poate fi optimizat în continuare, de la un număr de 5 intrări și 5 ieșiri putem folosii doar citirea temperaturii și să introducem valorile inițiale de pornire a turnării astfel încât avem nevoie doar de 3 intrări și 3 ieșiri folosind debitul total de apa ce poate fi repartizat pe cele 3 zone după formula de calcul: 24% din debitul total de apa în zona 1, 34% pentru în 2 și 42% în zona 3.

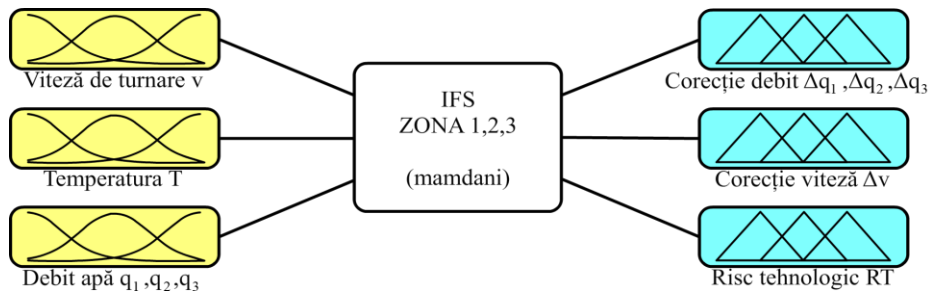


Fig. 5.43 Schema bloc IFS ZONA 1,2,3 Optimizat

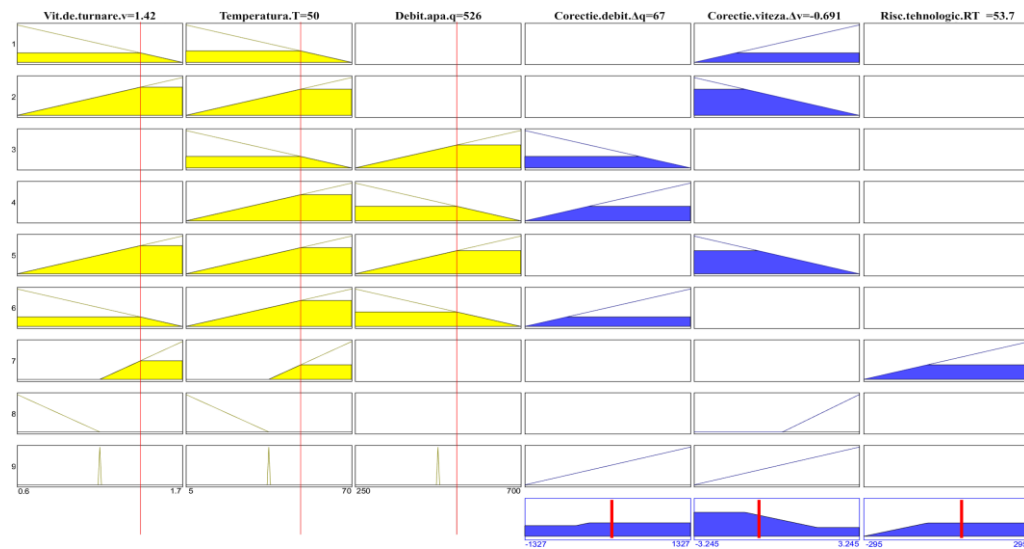


Fig. 5.44 Tabela de inferență pentru IFS ZONA 1,2,3 Optimizat

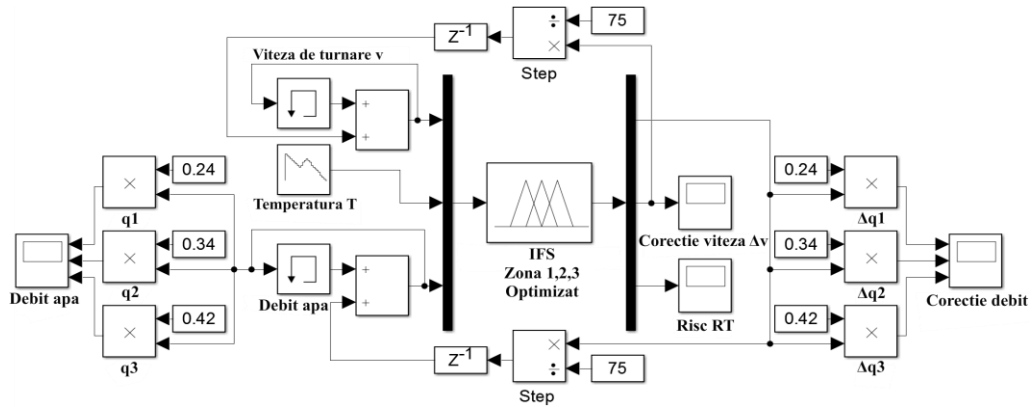


Fig. 5.45 Implementarea în Simulink a IFS ZONA 1,2,3 Optimizat

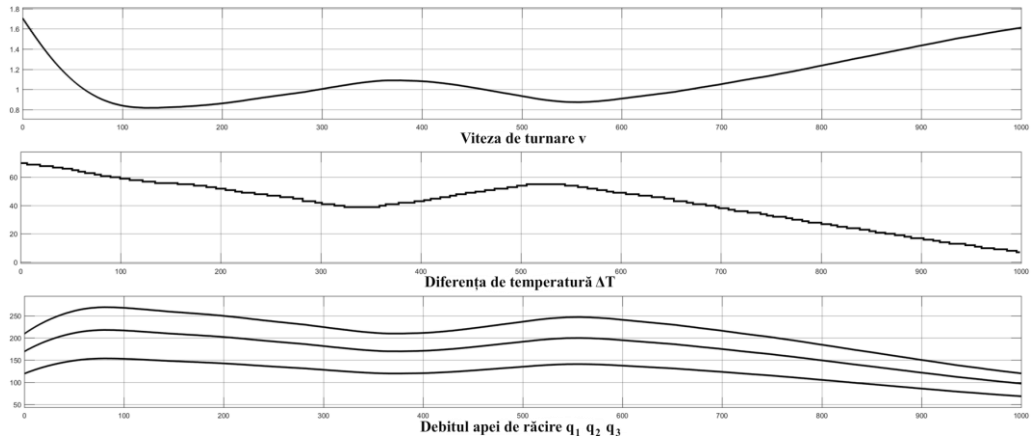


Fig. 5.46 Valorile variabilelor de intrare pentru IFS ZONA 1,2,3 Optimizat

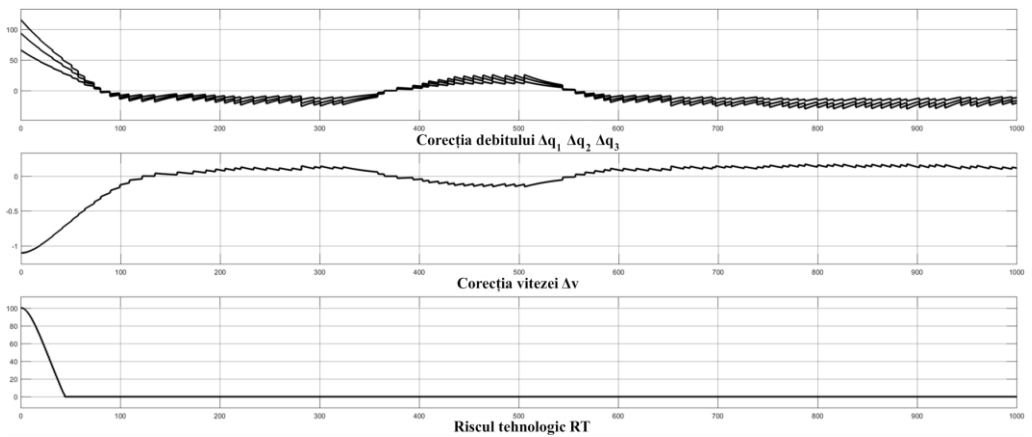


Fig. 5.47 Corecțiile realizate de către IFS ZONA 1,2,3 Optimizat

Trebuie menționat faptul că în toate cazurile prezentate mai sus riscul tehnologic a scăzut la 0 după primele secunde ale simulării și a fost menținut constant la 0 pe tot parcursul tunării. Toate cele 3 sisteme prezentate au rezultate

corecte dar în programarea PLC-ului din următorul capitol vom folosi ultimul caz, IFS ZONA 1,2,3 optimizat, datorită faptului că se folosește un număr redus de reguli și îmbunătățește timpul de răspuns al sistemului. Un alt beneficiu major fiind faptul că sistemul are nevoie doar de citirea temperaturii pentru a controla debitul apei pe toate zonele de răcire.

5.5. Sistemul de decizie Fuzzy cu un singur parametru variabil

Pe baza rezultatelor obținute din sistemele Fuzzy prezentate anterior împreună cu specialiștii de la ArcelorMittal Hunedoara S.A. s-a realizat un sistem Fuzzy simplificat la care s-a considerat ca factor principal diferența de temperatură.

În acest subcapitol s-a dezvoltat un alt tip de sistem Fuzzy (cu o singură intrare și două ieșiri) care a fost implementat și testat cu ajutorul toolbox-ului Fuzzy din Matlab în urma vizualizării graficelor rezultate și a comparării acestora cu graficele rezultate din celelalte tipuri de sisteme s-a ajuns la concluzia că soluția optimă este acest sistem Fuzzy cu o intrare și două ieșiri.

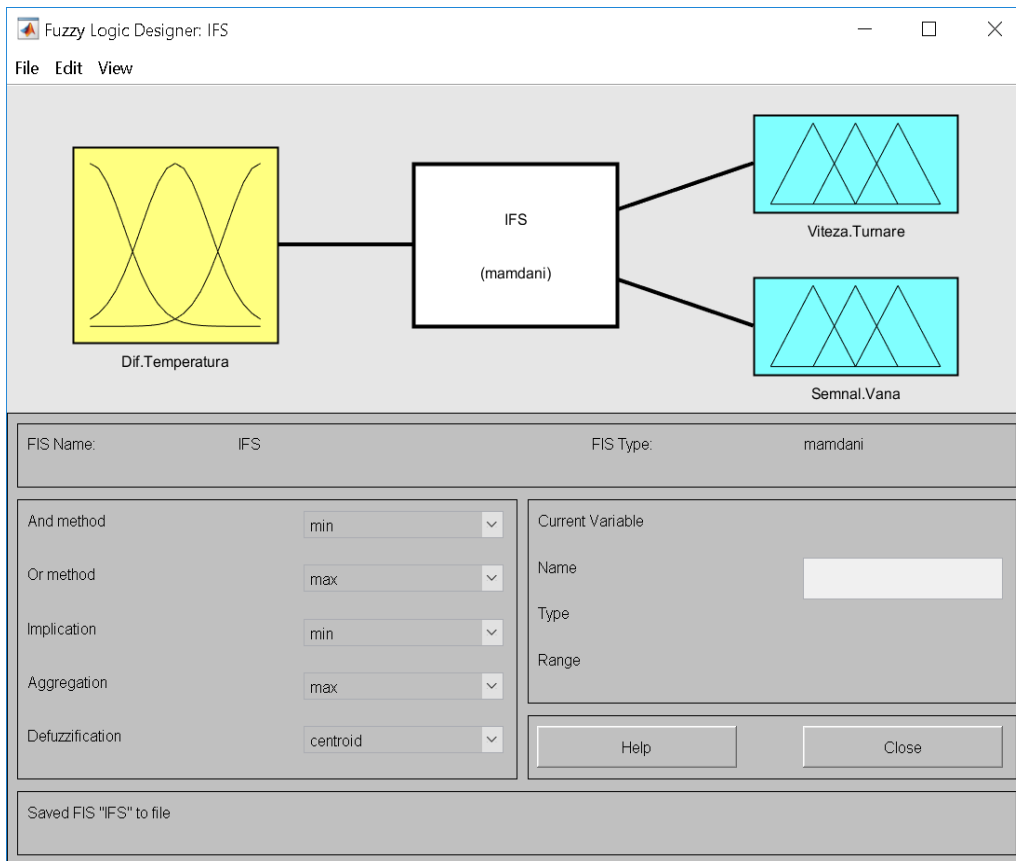


Fig. 5.48 Schema bloc IFS cu un singur parametru variabil

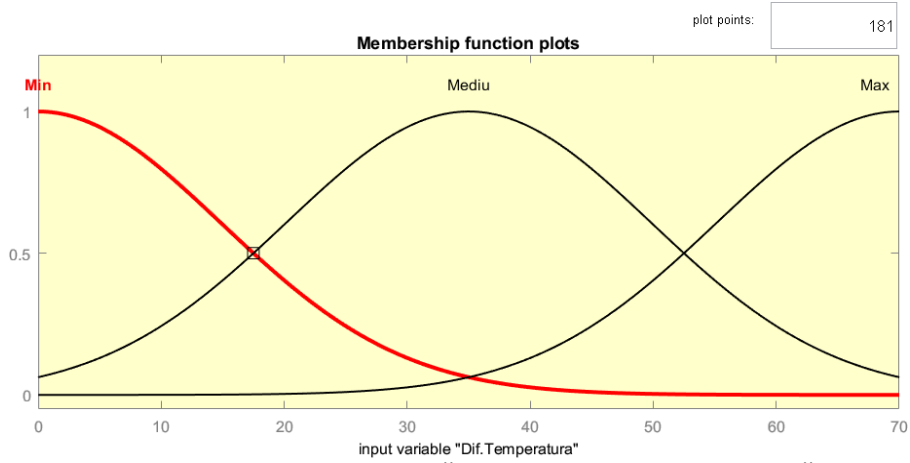


Fig. 5.49 Funcții de apartenență pentru Diferența de temperatură

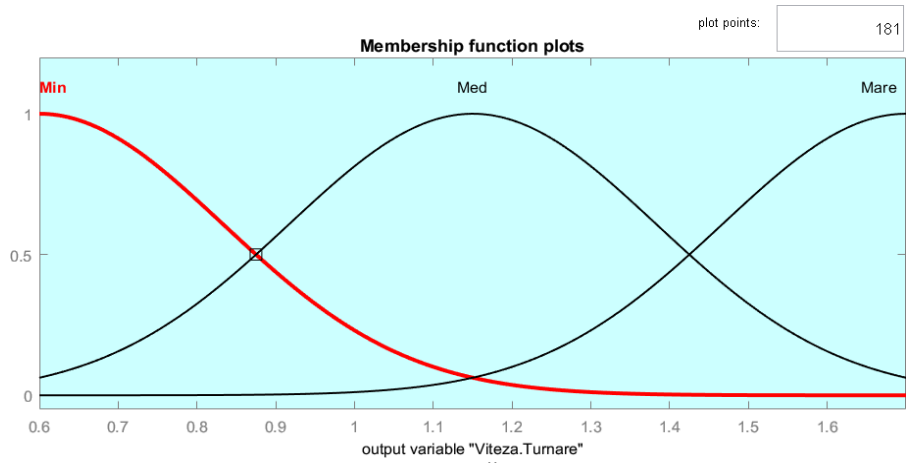


Fig. 5.50 Funcții de apartenență pentru Viteza de turnare

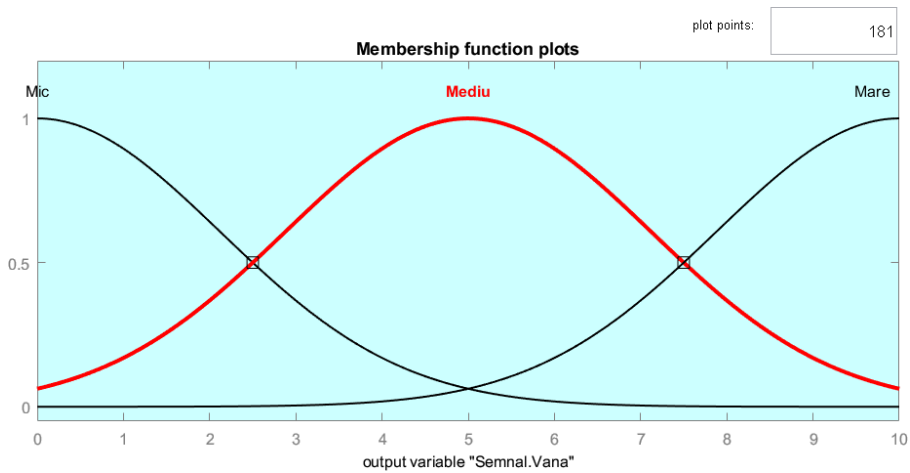


Fig. 5.51 Funcții de apartenență pentru Semnalul vanei

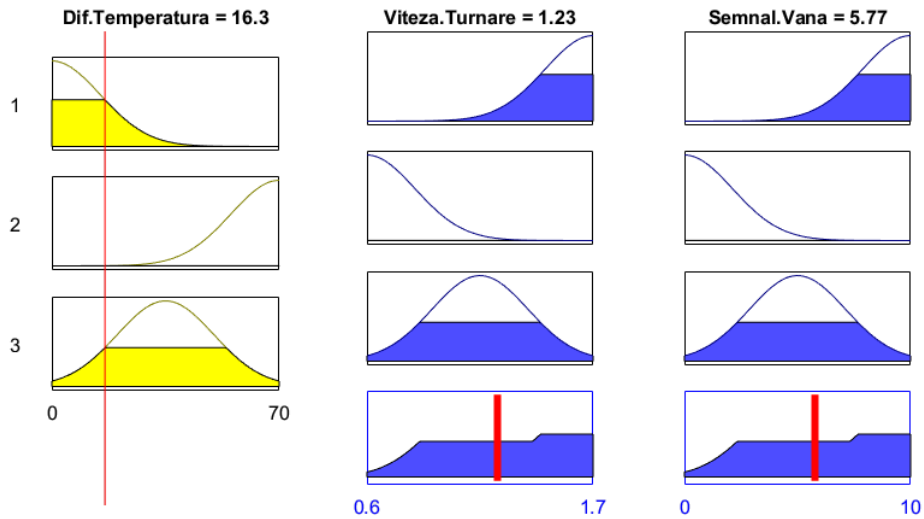


Fig. 5.52 Tabela de inferență pentru IFS cu o singură intrare

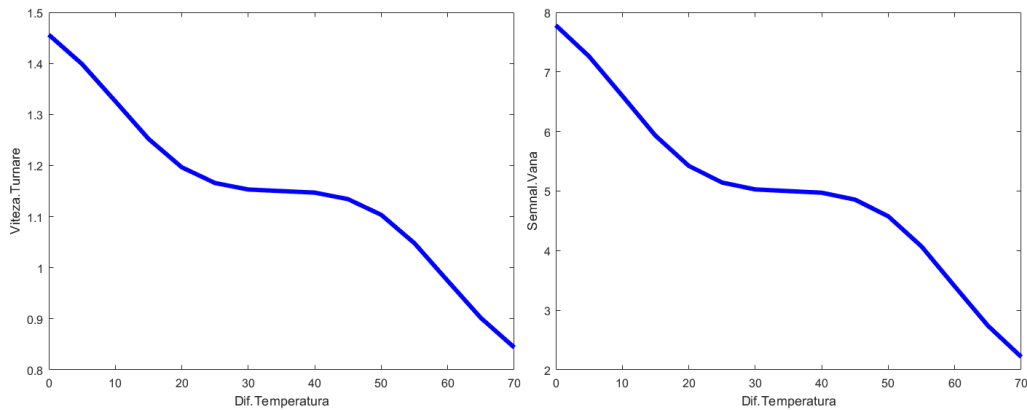


Fig. 5.53 Ajustarea vitezei de turnare și a vanei în funcție de diferența de temperatură

5.6. Concluzii

Pe baza cercetărilor efectuate și prezentate în cadrul acestui capitol se pot concluziona următoarele:

- a fost propusă o soluție Fuzzy originală pe structura existentă a sistemului de conducere a turnării continue care elimină fisurile apărute în materialul turnat în zona secundară de răcire;
- a fost concepută schema unui sistem de decizie Fuzzy, care analizând o serie de mărimi preluate din proces produce modificări ale debitului apei de răcire și ale vitezei de turnare;
- în literatura de specialitate, de pe plan național cât și de pe plan mondial, nu există o corecție inteligentă a debitului apei în răcirea secundară a oțelului, cu un reglaj în timp real și pe zone de răcire;
- întocmirea bazelor de reguli s-a făcut utilizând experiența operatorilor umani și informații culese direct din proces la instalația de turnare continuă, din cadrul ArcelorMittal Hunedoara S.A.;

- verificarea și confirmarea bazelor de reguli și a IFS proiectate a fost efectuată prin simulare în Simulink
- din analiza rezultatelor simulării se constată că, indiferent de valorile mărimilor generate la intrare, IFS-ul elaborează corecțiile necesare pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire primară, ceea ce confirmă validitatea funcționării sistemului;
- 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.

6. CONTROLUL DEBITULUI APEI CU AJUTORUL UNUI PLC ÎN RĂCIREA SECUNDARĂ A OȚELULUI

6.1. Introducere

În cadrul acestui capitol se propune o soluție pentru controlul și optimizarea debitului apei de răcire din zona de răcire secundară a turnării continue, folosind un PLC (controler logic programabil) SIEMENS S7 300. Plecând de la structura reală a unui sistem de conducere pentru o instalație modernă de turnare continuă, se propune o soluție eficientă, care permite modificarea în timp real a repartiției debitului de apă pe cele 3 zone de răcire secundară. Sistemul propus a fost testat și validat în cadrul determinărilor experimentale pe un stand de laborator precum și pe instalația de turnare continuă existentă la ArcelorMittal Hunedoara S.A..

Programele automate sunt foarte flexibile, modificările sistemului fiind ușor de implementat. Limbajul acestui concept de automatizare totală este STEP7, fiind un limbaj care este utilizat pentru a configura componentele, pentru a atribui parametrii și, nu în ultimul rând, pentru programarea acestuia.

O caracteristică a tehnologiei de astăzi este multitudinea de facilități disponibile dezvoltatorului, pentru a construi o interfață om-calculator. Astfel, avem componente care au funcții de intrare și ieșire, cum ar fi casetele de dialog.

Dacă luăm în considerare faptul că există mai multe posibilități de a face aceeași operațiune, (de exemplu, putem selecta un obiect cu ajutorul mouse-ului sau a combinațiilor de caractere și că o interfață include mai multe tehnologii în ea), concluzionăm că este destul de dificil să se descrie diversitatea interfețelor om-calculator, fără a avea un instrument dedicat utilizării. În acest sens, introducem noțiunea de interfață grafică, caracteristica dominantă a unei interfețe este determinată de tehnicile grafice, cât și de cele de interacțiune.

Drept urmare, diversitatea interfețelor este dată de modul în care sunt proiectate grafic, cât și modul în care interacționează între ele.

6.2. Standul PLC

Pentru a atinge scopul propus în cadrul acestui capitol s-a realizat un stand experimental dedicat controlului și optimizării debitului apei din zona de răcire secundară a turnării continue a oțelului.

Realizarea standului didactic a cuprins două etape și anume:

- proiectarea și realizarea fizică a standului (etapa hardware);
- programarea PLC-ului (etapa software).

6.2.1. Standul PLC – realizarea fizică – etapa hardware

Controlul și optimizarea debitului apei de răcire din zona de răcire secundară a turnării continue, sunt importante pentru buna desfășurare a procesului tehnologic, în vederea obținerii semifabricatelor de calitate.

Pentru realizarea fizică a acestui stand am avut în vedere două aspecte importante, și anume:

- a. situația reală existentă;
- b. elementele necesare realizării standului.

a. *Situația reală existentă*

Actualmente în cadrul ArcelorMittal Hunedoara S.A. debitul apei de răcire este reglat de către un operator uman, care preia informațiile referitoare la temperatura oțelului din zona secundară, furnizate de către alt operator ce măsoară acest parametru la anumite intervale de timp cu ajutorul unei sonde de temperatură. Operatorul aflat în camera de comandă are la dispoziție, în funcție de tipul de produs realizat un tabel Excel, figura 6.1, ce conține date referitoare la:

- parametrii de turnare pentru tipul de produs;
- diagrama vitezelor de turnare în funcție de temperatură;
- formula de calcul a temperaturii lichidus.

| Program racire | litri/minut | Marca de otel | | | |
|--|---------------------|-------------------------------|----------------------|---------|------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | 500 | Se foloseste la toate marcile | | | |
| 6 | | | | | |
| 7 | | | | | |
| 8 | | | | | |
| 9 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| Debit racire primara (apa pe cristalizor) | fata lata | fata ingusta | total | | |
| | 1300 litri/minut | 1100 litri/minut | 2400 litri/minut | | |
| Rpartitie zone racirea secundara | Z 1 - 40%; | Z 2 - 35%; | Z 3 - 25% | | |
| Debit minim racire secundara | Z 1 -65 litri/minut | Z 2 - 45 litri/minut | Z 3 - 70 litri/minut | | |
| Factorul de oscilatie | K - 1,3 | | | | |
| Presiuni caje la cald | caja 1 | caja 2 | caja 3 | caja 4 | |
| | 27 bari | 30 bari | 30 bari | 32 bari | |
| Viteza minima de turnare | 0,50 metri/minut | | | | |
| Viteza optima de turnare | 0,8 metri/minut | | | | |
| Observatii: | | | | | |
| Diagrama vitezelor de turnare in functie de temperatura | | | | | |
| Temperatu | < 20 | 21 - 25 | 26 - 35 | 36 - 40 | > 40 |
| Viteza | 0.95 | 0.85 | 0.75 | 0.65 | 0.55 |
| Formula de calcul al temperaturii lichidus | | | | | |
| $TL = 1535 - (88\%C + 8\%Si + 5\%Mn + 5\%Cu + 1,5\%Cr + 4\%Ni + 2\%Mo + 18\%Ti)$ | | | | | |
| Greutate specifica | 512 kg / ml | | | | |
| Prafuri de turnare (in cristalizor) | Synthesis BF 22 AT | | | | |
| Prafuri de acoperire in distribuitor | Glutin T | | | | |

Fig. 6.1 Parametrii turnării pentru tipul de produs

După cum se observă din figura 6.1 operatorul din camera de comandă, identifică pentru profilul 270x240 mm intervalul de temperatură din „diagrama vitezelor de turnare” (în situația prezentată 26-35 °C) și introduce valoarea vitezei

de 0,75 m/min în câmpul “viteza setată” (figura 6.2). În funcție de această valoare (viteza) programul comandă deschiderea sau închiderea vanei sistemului de răcire, în vederea asigurării debitului total al apei de răcire, dar și repartizarea acestuia pe cele 3 zone, respectând proporțiile prezentate în figura 6.1.

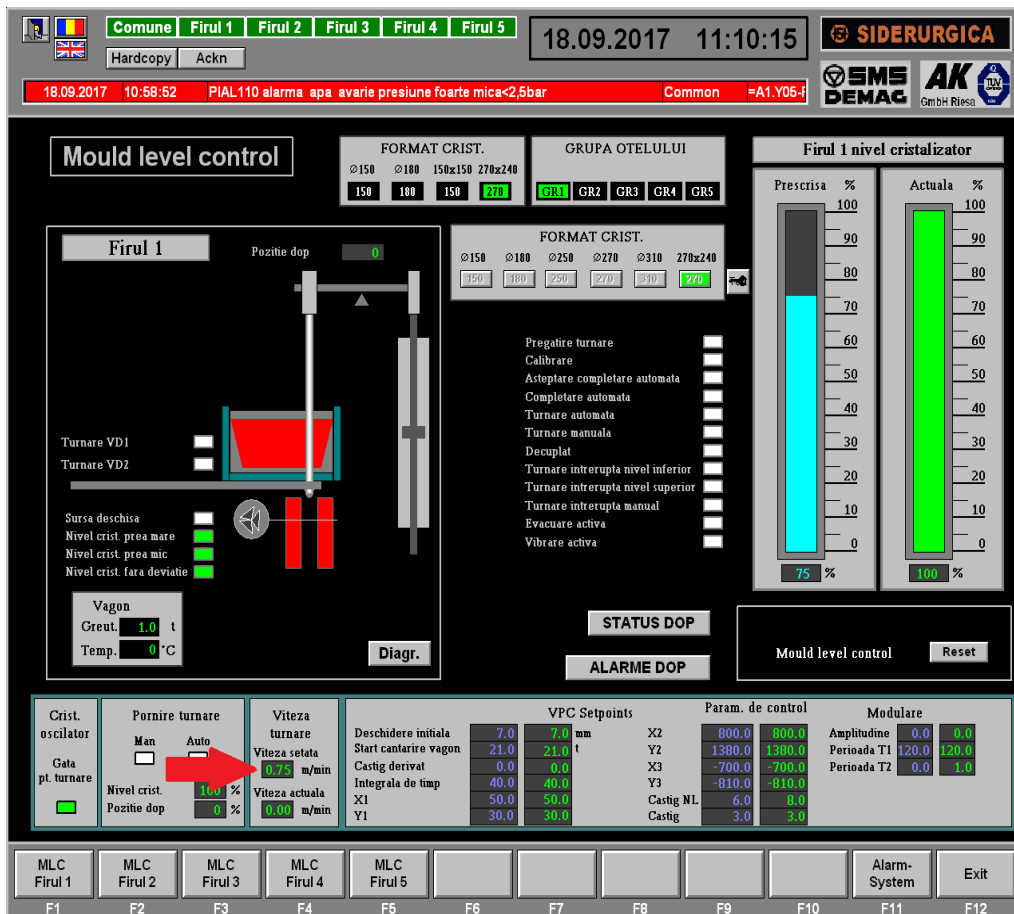


Fig. 6.2 Interfață control viteză

După un interval de timp (7-10 minute) procesul este reluat și datele reintroduse. Aceasta soluție existentă are următoarele dezavantaje:

- erori subiective introduse de factorul uman (operatorul care citește temperatura);
- intervalul mare de timp la care se fac citirile;
- „întârzierea” deschiderii vanei (diferența dintre momentul citirii temperaturii și momentul deschiderii comandate a vanei).

b. Elementele necesare realizării standului

Drept urmare pentru a elimina aceste dezavantaje, s-a proiectat un stand care simulează răcirea secundară din procesul de turnare continuă a oțelului, care are în componență următoarele elemente:

b.1 pompa de apă submersibilă Sumo 2

Sumo 2, figura 6.3, face parte din gama de pompe submersibile, având un debit maxim de 1800 l/h, presiunea dată de înălțimea maximă a coloanei de apă de 1,66 metri cu un consum electric mediu de 18 W/h.

Parametrii dimensionali ai pompei sunt:

- lungime, L=170 mm;
- lățime, l=100 mm;
- înălțime, h=100 mm.

b.2 element automat de debit

Element automat de debit este echipat cu servomotor permițând deschiderea automată a unei vane. Acest element are următorii parametrii:

- tensiune nominală (AC sau DC): 24 V, 50 Hz/60 Hz;
- semnal de intrare control: 0 (4) - 20 mA, 0 (2) -10 V;
- forță: 400 N;
- viteză (selectabilă): 7,5-15 mm/s;
- auto-calibrare;
- semnalizare LED;
- buton RESET.

Modelul ales este Danfoss AB-QM DN 10-250, figura 6.4.



Fig. 6.3 Pompă de apă submersibilă Sumo 2



Fig. 6.4 Element Danfoss AB-QM DN10-250

b.3 vană comandată electric

Asigură prin intermediul clapetei de reglare și în funcție de semnalul dat de regulatorul AB-QM DN 10-250 debitul necesar sistemului. Acest debit se află în strânsă corelație cu valorile date de către potențiometrul ce simulează variația diferenței de temperatură. Această vană, figura 6.5, este montată pe traseul conductelor flexibile din amonte, respectiv aval de pompă.

b.4 debitmetru IFM electronic SM6004

Este un contor de debit magnetic inductiv, cu afișaj electronic ce poate măsura debite cuprinse în intervalul 0,1 – 1500 l/h. Acest tip de contor, figura 6.6, este montat după vana, având la ieșire un semnal electric cuprins între 4 – 20 mA.



Fig. 6.5 Vană comandată electric



Fig. 6.6 Debitmetru IFM electronic SM6004

b.5 releu de pornire a pompei de apă

Releul Finder 55.34, figura 6.7, asigură prin intermediul PLC-ului pornirea, respectiv oprirea pompei de apă, în vederea asigurării debitului și presiunii necesare sistemului proiectat. Alimentarea acestuia se face la o tensiune de 24 V (curent continuu), semnalul la ieșire fiind dat alimentării pompei (220 V curent alternativ).

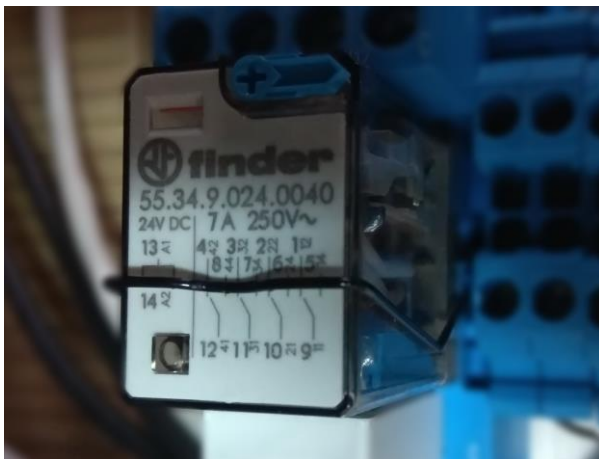


Fig. 6.7 Releu Finder 55.34



Fig. 6.8 Sursă de alimentare SDR-120-24

b.6 sursă de alimentare PLC

Este o sursă modelul MEAN WELL SDR-120-24, figura 6.8, ce asigură la ieșire o tensiune de 24 V și un curent de 5 A (curent continuu) necesare funcționării PLC-ului Siemens S7 300, alimentarea făcându-se de la rețeaua electrică (220 V curent alternativ).

b.7 PLC SIMATIC S7 300

Acest automat programabil, figura 6.9, se folosește în cazul în care procesul condus are o complexitate mai ridicată, numărul intrărilor și numărul ieșirilor automatului programabil este ridicat.

Clasa de automate programabile SIMATIC Step7 este fabricată de producătorul german SIEMENS, lider mondial pe piața produselor pentru automatizări.

Principalele activități realizate de STEP7 sunt:

- configurarea hardware-ului - adică aranjarea modulelor, atribuirea de adrese, precum și setarea proprietăților acestora;
- configurarea parametrilor de comunicare precum și a proprietăților acestora;
- scrierea de programe utilizator pentru automatul programabil într-unul dintre cele 3 moduri folosite: Ladder Logic (LAD), Function Block Diagram (FBD) sau Statement List (STL), precum și testarea online a acestora pe automat. Soluția SIMATIC pune la dispoziție și pachete software opționale care pot extinde funcționarea uneltelor standard din STEP7.

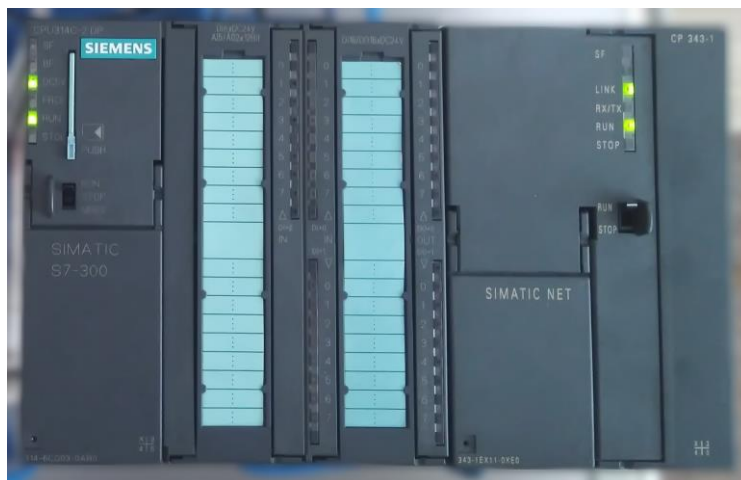


Fig. 6.9 Automat programabil SIMATIC S300

Automatul programabil SIMATIC S300 are o construcție modulară, astfel încât utilizatorul poate forma o configurație hardware dorită.

Există posibilitatea instalării sursei de alimentare pe șina centrală. Sloturile sunt numerotate astfel:

- 1 pentru sursă (chiar dacă aceasta lipsește);
- 2 pentru modulul procesorului (unitatea centrală);
- 3 modulul de interfață;
- 4 – 11 module de intrări – ieșiri.

Este prevăzut cu module pentru lucrul în mediu cu condiții ostile (temperaturi foarte ridicate sau scăzute, un nivel ridicat de vibrații).

b.8 potențiometrul de reglare a temperaturii

În cadrul sistemului proiectat, potențiometrul, figura 6.10, are rolul de a simula variația de temperatură. Acest lucru este posibil prin modificarea rezistenței

electrice în intervalul 0-600 Ohm. Etalonarea acestui potențiomtru s-a realizat prin scalarea intervalului 0-600 Ohm în 0-70 °C.

b.9 butoane pornire/oprire

Acestea, figura 6.10, permit comanda de pornire/oprire manuală a PLC-ului.



Fig. 6.10 Potențiomtru de reglare a temperaturii – butoane pornire/oprire

b.10 conducte flexibile de legătură (apă) - rezervor

Pentru buna funcționare a sistemului proiectat a trebuit calculată secțiunea conductelor flexibile de legătură, în vederea asigurării plajei de debit de apă necesar, deoarece debitul variază direct proporțional cu secțiunea. Rezervorul, figura 6.11, a fost dimensionat cu scopul de a asigura de 3 până la 5 ori volumul de apă aflat în sistem.

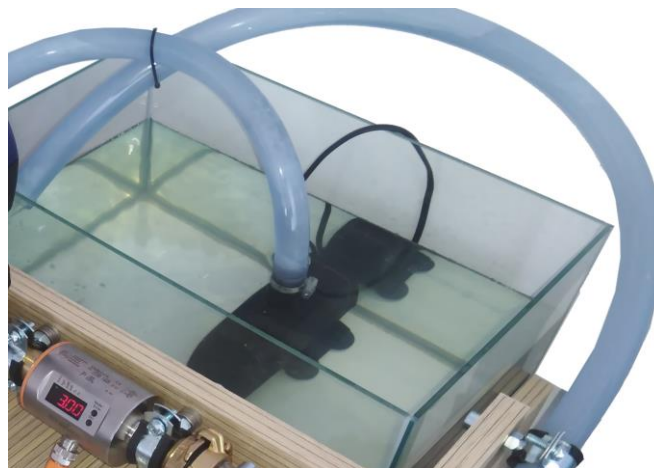


Fig. 6.11 Rezervor alimentare apă – conducte flexibile

Unitatea PC, necesară standului experimental trebuie sa aibă o minimă configurație după cum urmează:

- procesor: Intel Core 2 Duo;
- memorie RAM: 2 Gb;
- spațiu stocare Hard Drive HDD: 80 Gb;

- placa de rețea 10/100 Mb prin intermediul căreia se efectuează conexiunea directă cu PLC-ul;
- sistem de operare: Windows 7, 64-bit.

Pentru protecția întregului sistem s-a prevăzut încă din faza de proiectare o siguranță electrică marca Schneider de 10 A.

Legăturile dintre elementele descrise anterior sunt prezentate sugestiv în figurile 6.12, 6.13.



Fig. 6.12 Vederea de sus a standului experimental



Fig. 6.13 Conexiunile PLC-ului

6.2.2. Standul PLC – etapa software

În această etapă s-au urmărit 3 direcții importante în ceea ce privește optimizarea debitului de apă destinat răcirii oțelului din zona secundară a turnării continue:

- a. programarea PLC-ului, pornind de la situația reală din cadrul ArcelorMittal Hunedoara S.A.;
 - b. optimizarea sistemului prin utilizarea suplimentară a regulilor Fuzzy;
 - c. vizualizarea rezultatelor obținute prin interfața SCADA.
- a. Programarea PLC-ului – situația reală

În această etapă s-a folosit software-ul "SIMATIC Manager Step 7" care este specific PLC-ului ales și anume SIMATIC S7-300.

Datele de intrare, relațiile de calcul și corelațiile dintre diversele mărimi au fost preluate și prelucrate din baza de date a celor doi operatori umani, comanda deschiderii vanei făcându-se automat. Cu ajutorul acestui software s-a reușit eliminarea factorului uman în ceea ce privește controlul parametrilor specifici zonei de răcire secundară a turnării continue.

Realizarea efectivă a programului a constat în parcurgerea a 3 etape:

- a.1 – reprezentarea schematică a rack-ului real;
- a.2 – crearea blocurilor funcționale;
- a.3 – stabilirea funcțiilor logice și operaționale din cadrul blocurilor funcționale.

a.1 Reprezentarea schematică a rack-ului real

Înainte de începerea efectivă a programării trebuie setată configurația hardware a proiectului.

Acest lucru se face atât pentru ca mediul de programare să comunice cu succes cu echipamentele ce se programează, dar și pentru a seta anumite detalii cum ar fi: adrese, interfețe, tipuri cartele de intrări ieșiri, setarea modulelor de comunicație, setarea magistralei Profibus, setarea modulelor de extensie, a cartelelor de intrări/ieșiri și adresele lor etc.

Pentru a realiza configurația hardware trebuie urmați următorii pași, figura 6.14:

- deschiderea obiectului „Hardware” din dosarul proiectului.
- în aplicația care se deschide trebuie alese din biblioteca Siemens dispozitivele ce compun stația care se programează. Aceste componente trebuie ordonate conform dispunerii reale în rack-uri și conform conexiunilor reale. De asemenea, aceste dispozitive trebuie setate.

Obiectul „Hardware” (figura 6.14) din dosarul proiectului cuprinde un procesor SIMATIC 300 modelul „CPU 314C-2 DP”, care are intrări/ieșiri atât analogice în număr de 7, cât și digitale în număr de 40.

Avantajul acestui procesor SIMATIC S7-300 este dat de faptul că are încorporat numărul optim de intrări și ieșiri analogice necesare acestui proiect. Un dispozitiv important ce asigură comunicarea dintre PLC și PC este interfața CP 343-1 (figura 6.13, 6.14), fiind montată pe rack în partea dreaptă a procesorului SIMATIC S7-300.

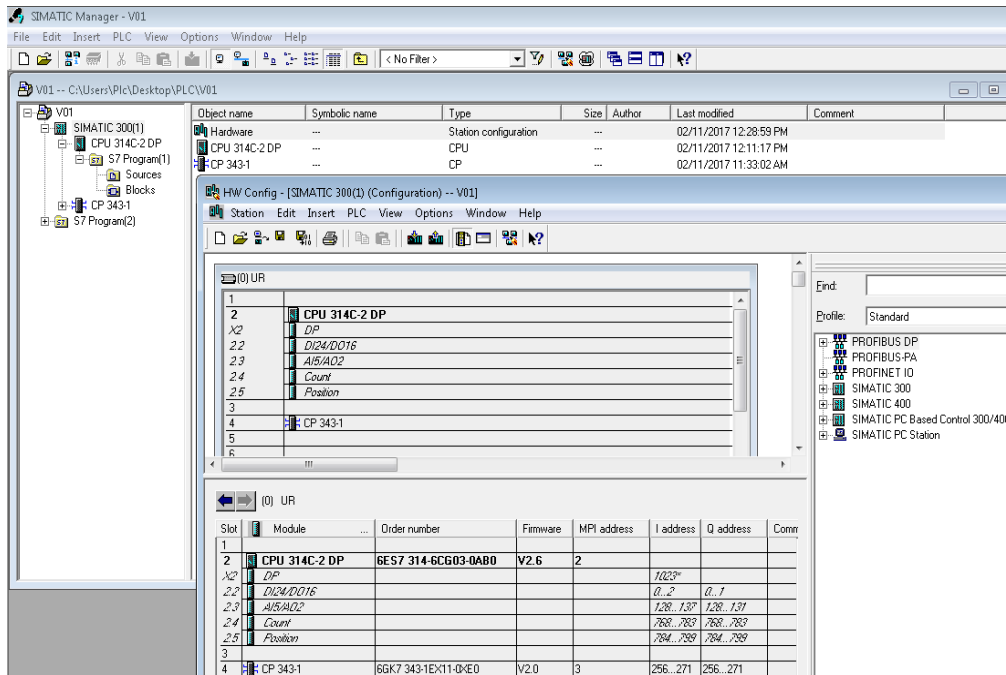


Fig. 6.14 Reprezentarea schematică a rack-ului real

a.2 Crearea blocurilor funcționale

Primul bloc funcțional se creează automat la începerea unui nou proiect cu denumirea implicită OB1. Acest prim bloc funcțional are rolul de inițializare a parametrilor (variabilelor) specifice proiectului

În cadrul blocului funcțional FC2 sunt utilizate funcții logice în limbaj FBD (Function Block Diagram) cu rolul de a calcula semnalul analog necesar comandării motorului regulatorului automat de debit Danfoss AB-QM DN10-250.

În figura 6.15 se prezintă schema logică a modului clasic de reglare a debitului de apă, prezentându-se cele 5 intrări analogice, blocul OB1 și FC2, respectiv cele două ieșiri analogice.

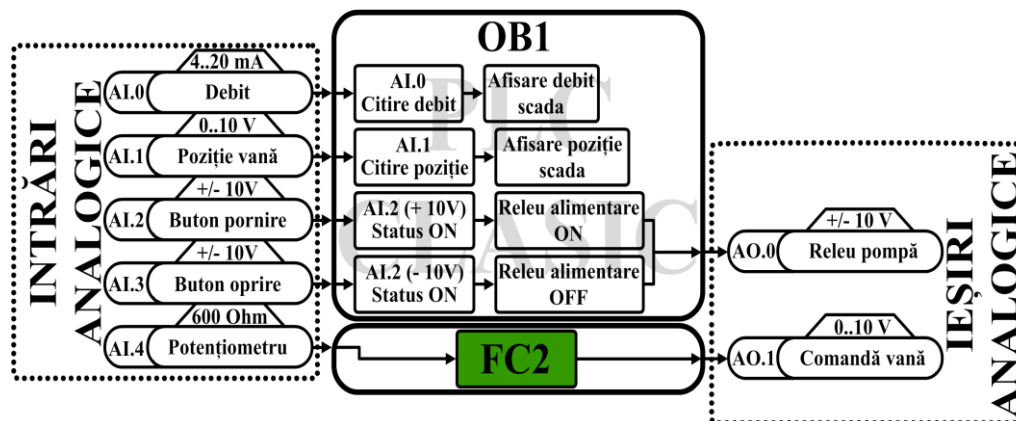


Fig. 6.15 Schema logică a modului clasic de reglare a debitului de apă

a.3 Stabilirea funcțiilor logice și operaționale din cadrul blocurilor funcționale.

Primul bloc funcțional OB1 cuprinde următoarele funcții logice și operaționale (Anexa 2):

- pornire pompa în automat;
- citire intrare analogică poziție vană;
- citire intrare debit;
- citire potențiomtru;
- afișare comanda vană;
- rulare blocul funcțional FC2.

Blocul funcțional FC2 cu algoritmul prezentat în anexe prin intermediul funcțiilor logice și operaționale realizează simularea diferenței de temperatură din procesul de turnare continuă a oțelului cu ajutorul potențiometrului și stabilirea deschiderii clapetei vanei.

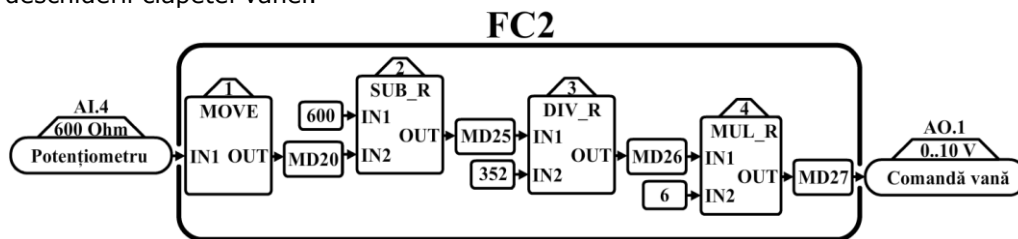


Fig. 6.16 Schema logică a blocului funcțional FC2

Principalii pași logici urmați în cadrul blocului funcțional FC2, figura 6.14, sunt:

1. Deoarece diferența de temperatură este invers proporțională cu viteza de turnare, pentru a determina viteza de turnare s-a luat semnalul electric al potențiometrului ce are plaja de la 0 – 600 Ohm și a fost relocat în variabila MD20.
2. Variabila MD25 este invers proporțională cu variabila MD20. Valoarea variabilei MD25 se obține prin diferența dintre maximul potențiometrului, de 600, și MD20. De exemplu, dacă potențiometrul indică valoarea de 2 Ohmi, $MD25 = 600 - 2 = 598$ (Anexa 4).
3. Variabila MD26 ce reprezintă viteza de turnare, s-a determinat prin împărțirea variabilei MD25 cu constanta reală 352, deoarece maximul vitezei de turnare este de 1.7 m/min. Astfel: $600 / 352 = 1,7$
4. Variabila MD27 asigură controlul clapetei vanei, implicit debitul apei de răcire pentru zona secundară din turnarea continuă a oțelului.
5. Semnalul necesar controlului vanei este cuprins între 0-10V (direct proporțională cu viteza de turnare) astfel că variabila MD27 a fost obținută prin înmulțirea MD26 cu constanta reală 6. Astfel $1.7 \times 6 = 10$

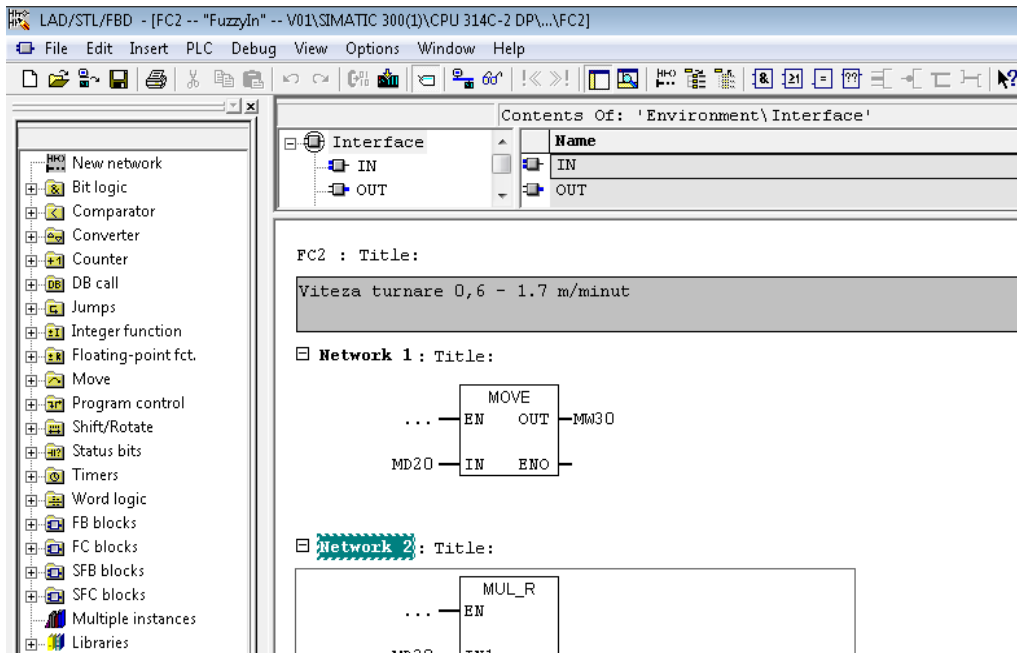


Fig. 6.17 Blocul funcțional FC2

În figura 6.17 este ilustrat modul de programare a unei variabile din cadrul blocului funcțional FC2.

b. Optimizarea sistemului prin utilizarea suplimentară a regulilor Fuzzy

Programul prezentat anterior a fost creat cu scopul de a simula situația actuală de reglare a debitului apei de răcire, înlocuind factorul uman. Pentru optimizarea sistemului s-a propus utilizarea suplimentară a unor reguli Fuzzy (Anexa 1), cu scopul corelării în timp real a celor 3 parametri, temperatură – viteză – debit, figura 6.18.

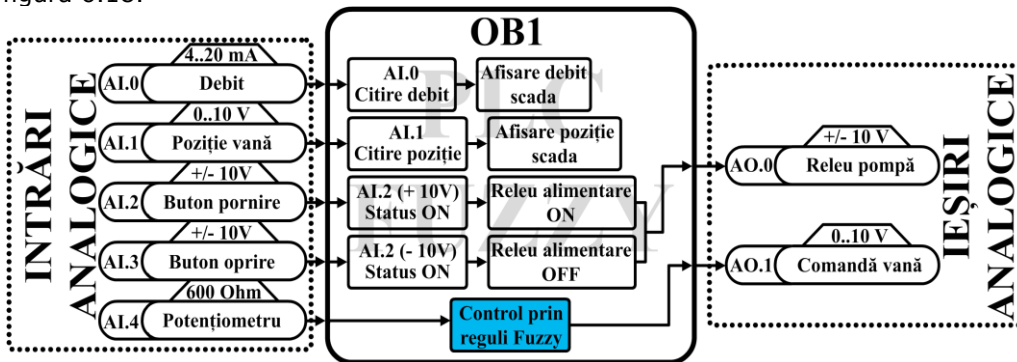


Fig. 6.18 Logica Fuzzy

Pentru aceasta s-a folosit software-ul FuzzyControl++ V5.0, în figura 6.19 se prezintă mărimea de intrare (diferența de temperatura) și mărimile de ieșire (viteza de turnare, respectiv debitul).

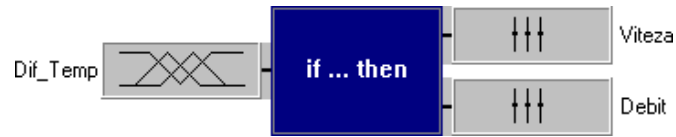


Fig. 6.19 Intrări / Ieșiri Fuzzy

În figura 6.20, respectând sensul fizic al procesului tehnologic de obținere a oțelului turnat continuu, s-au impus următoarele reguli ce corelează în timp real parametrii procesului.

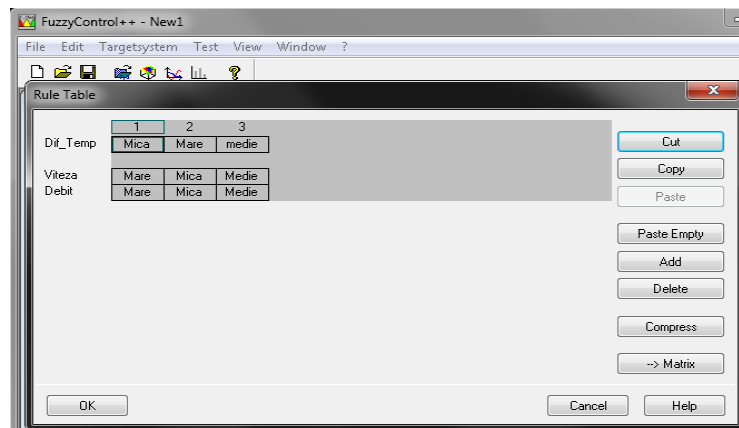


Fig. 6.20 Reguli Fuzzy

Conexiunea programului realizat cu PLC-ul se face direct din aplicația FuzzyControl++, figura 6.21. Din acest moment PLC-ul utilizează suplimentar regulile Fuzzy impuse, optimizând sistemul de reglare a debitului.

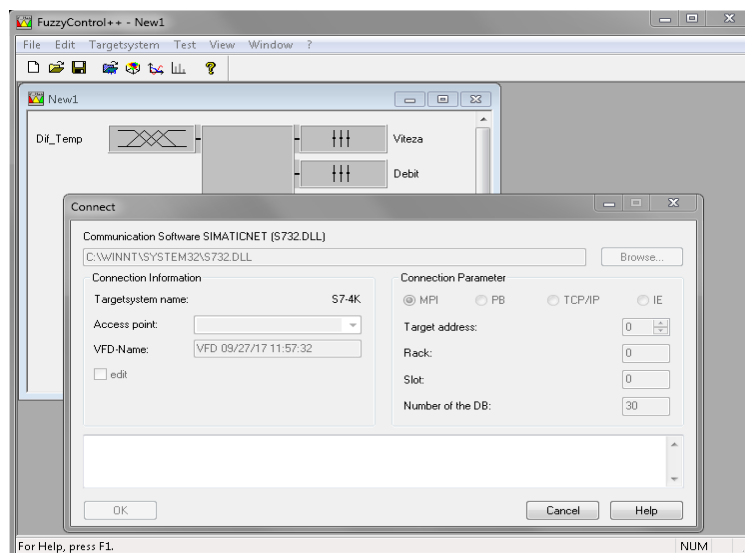


Fig. 6.21 Conexiune PLC

c. Vizualizarea rezultatelor obținute prin interfața SCADA

Interfața SCADA creată cu ajutorul software-ului WinCC este compusă din 4 ferestre, figura 6.22 prezintă interfața de comandă a sistemului PLC, este primul ecran de întâmpinare ce afișează componentele sistemului de bază, în partea inferioară a interfeței, utilizatorul are posibilitatea de a alege profilul turnat (ϕ 180, ϕ 200, ϕ 250). Pentru ca aplicația WinCC să comunice cu mașina programabilă și cu alte elemente ale sistemului automatizat (servere, baze de date, sisteme de automatizare și SCADA auxiliar), trebuie să fie instalate anumite drivere și configurate unele protocoale. Comunicarea dintre serverul SCADA-WinCC și PLC se bazează pe baza Ethernet TCP / IP utilizând placa de rețea.

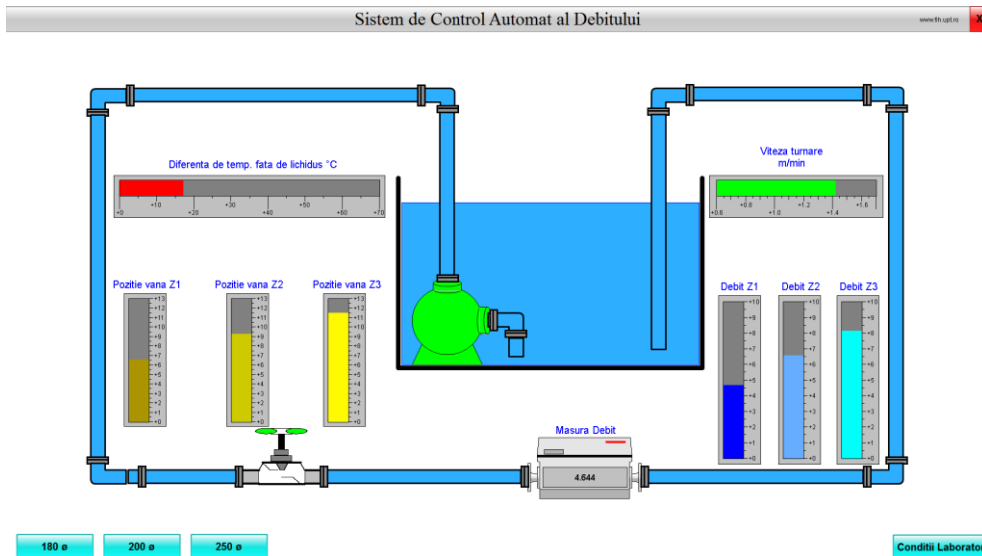


Fig. 6.22 Interfața principală SCADA

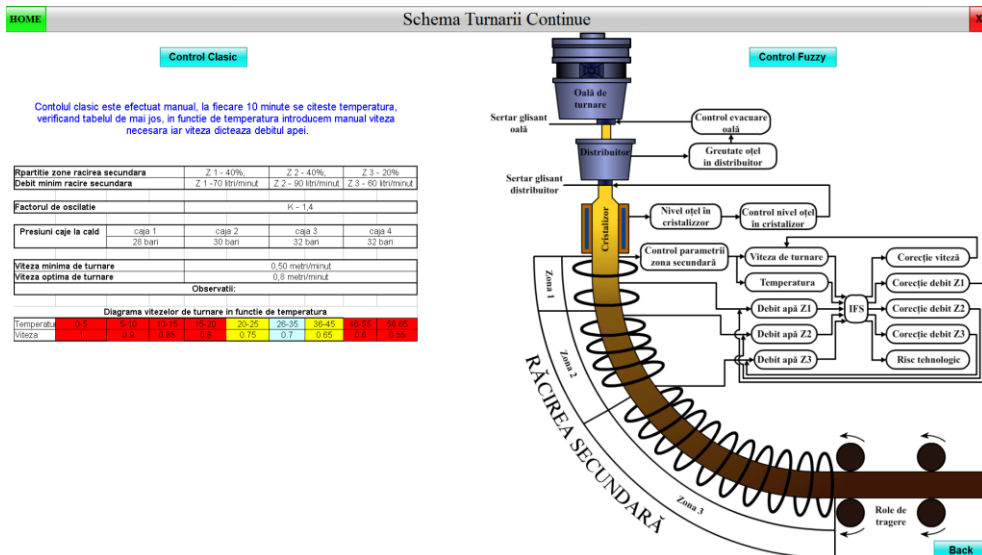


Fig. 6.23 Interfața SCADA – controlul clasic / controlul Fuzzy

În figura 6.23 utilizatorul are posibilitatea de a alege spre vizualizare graficele cu principalii parametri atât prin metoda clasică cât și prin metoda îmbunătățită cu reguli Fuzzy. Astfel dacă alege controlul clasic utilizatorul poate observa graficele prezentate în figura 6.24. Prin alegerea controlului Fuzzy pe ecran apar graficele din figura 6.25. Ambele ferestre cuprind 4 grafice care prezintă variația în timp a următorilor parametri:

- diferenței de temperatură față de lichidus;
- vitezei de turnare;
- poziției vanei pe toate zonele de răcire;
- valorii debitului din cele 3 zone.

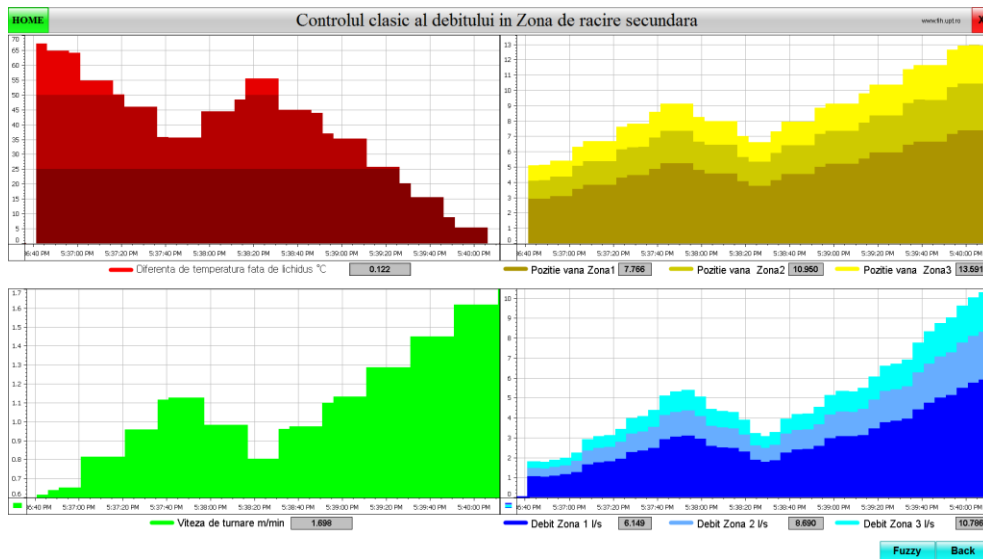


Fig. 6.24 Interfața SCADA vizualizare grafice metoda clasică

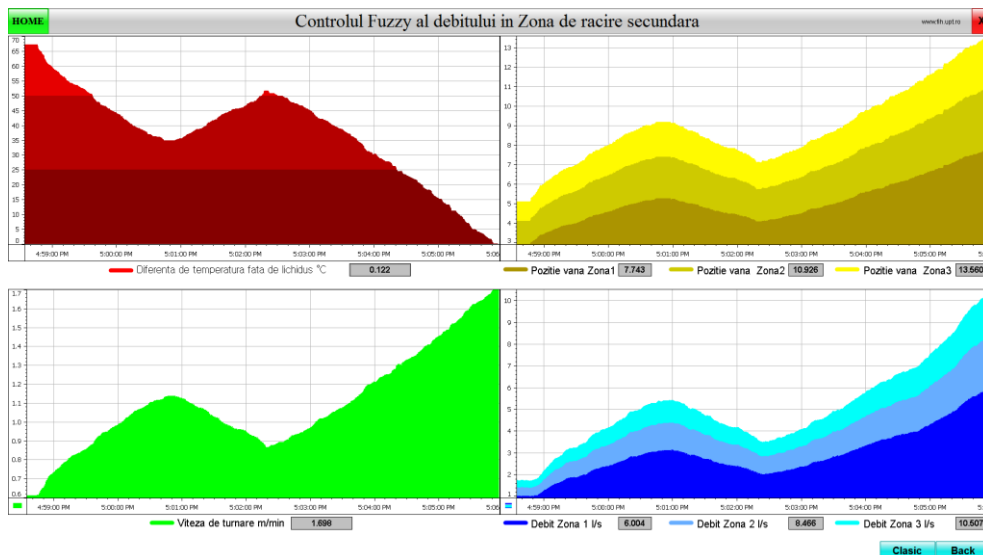


Fig. 6.25 Interfața SCADA vizualizare grafice metoda Fuzzy

Având în vedere rezultatele obținute următorul pas a fost de a verifica funcționalitatea sistemului în procesul de turnare continuă. În vederea obținerii valorilor de temperatură s-au efectuat măsurători experimentale asupra procesului de turnare continuă din cadrul ArcelorMittal Hunedoara S.A.. Instalația de Turnare Continuă din cadrul Secției „Turnare Continuă” din cadrul ArcelorMittal Hunedoara S.A. este concepută și realizată de firma Manesman și cuprinde cinci fire pentru turnat țagle pentru țevi cu diametrul ϕ 180 mm, ϕ 200 mm, ϕ 250 mm, ϕ 270 mm, ϕ 310mm sau blumuri pentru relaminare cu dimensiunile de 240x270 mm, 310x280 mm.

6.3. Cercetări – metodologie și rezultate obținute

6.3.1. Metodologia de cercetare

În vederea realizării determinărilor experimentale s-a efectuat un program de măsurători, care are ca scop determinarea valorilor de temperatură în vederea corelării acesteia cu parametrii turnării. 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;
- montarea și calibrarea senzorilor de temperatură;
- efectuarea determinărilor experimentale și prelucrarea rezultatelor obținute.

În prima etapă de pregătire a măsurătorilor, alegerea aparatelor și a senzorilor de temperatură, atât din practica curentă dar, și din literatura de specialitate s-au identificat mai multe metode practice de determinare a temperaturii:

- măsurarea directă a temperaturii din distribuitor cu ajutorul lancei cu termocuplu (situația actuală);
- măsurarea indirectă a temperaturii din distribuitor prin intermediul unei camere video cu infraroșu;
- măsurarea directă, continuă a temperaturii din distribuitor, utilizând un termocuplu izolat ceramic (cu o durată de viață de 24 de șarje).

Aceste metode au o serie de avantaje și dezavantaje, prima metodă are costuri reduse dar ca și dezavantaje, nu măsoară continuu temperatura din distribuitor (interval de aproximativ 10 minute), inducând erori subiective datorită factorului uman (operator).

Cea de-a doua metodă anulează dezavantajele primei metode dar din practică s-a demonstrat faptul că datorită prafurilor de izolare termică citirea cu ajutorul acestor camere video cu infraroșu este eronată (considerabil mai mică față de cea reală).

Ultima metodă de măsurare directă luată în calcul are avantajul măsurării continue a temperaturii din distribuitor, elimină factorul uman, dar are costuri relativ ridicate.

Datorită scopului propus s-a optat pentru ultima metodă analizată, costurile putând fi amortizate prin optimizarea răcirii a zonei secundare din turnarea continuă a oțelului și implicit creșterea calității semifabricatului.

Schematic montarea acestui termocuplu izolat ceramic se prezintă în figura 6.26.

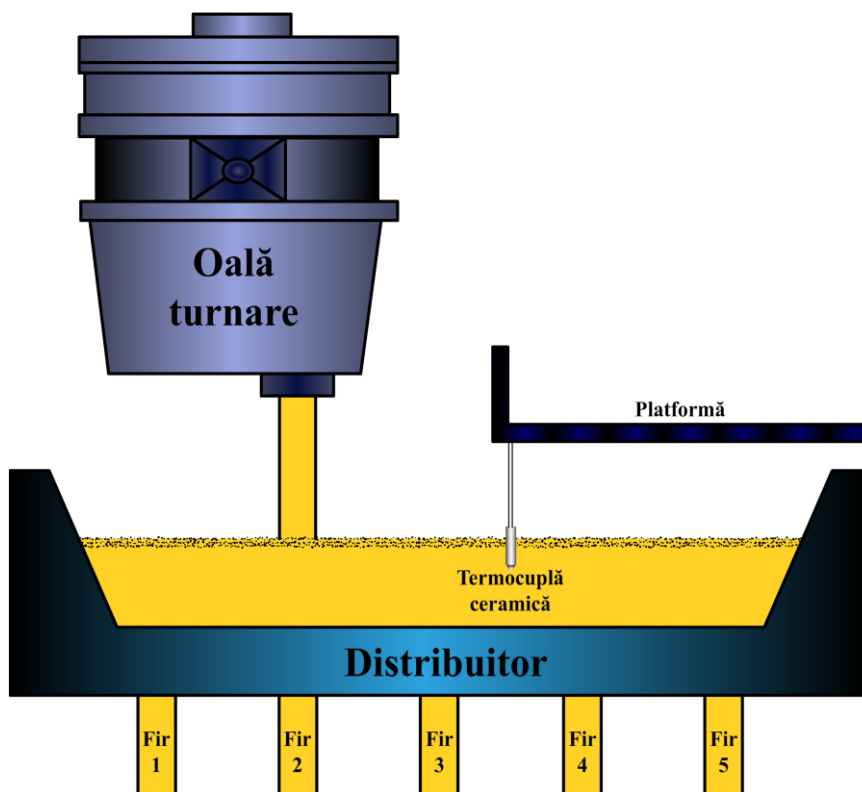


Fig. 6.26 Poziția termocuplului ceramic în distribuitor

După cum se observă din figura 6.26 acest termocuplu s-a poziționat în baia de oțel a distribuitorului, între firele 3 și 4, ancorarea acestuia făcându-se de platforma de vizitare (datorită densității mai mici a sistemului "termocuplu izolat ceramic" față de densitatea oțelului lichid, acesta plutește).

Senzorul utilizat este termocuplu de tip S, (90% Pt / 10% Rh-Pt), principiul de funcționare fiind prezentat sugestiv în figura 6.27.

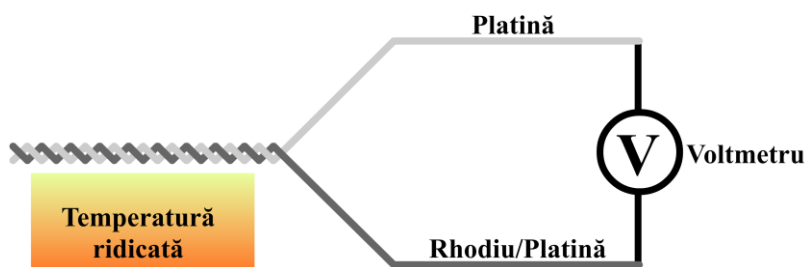


Fig. 6.27 Termocuplu utilizat în cadrul experimentărilor

Legătura dintre senzor și PLC se realizează astfel:

- semnalul în mV este transmis către aparatul Multi-lab Herareus prin intermediul unui cablu de compensație, cablu ce are aceleași caracteristici din punct de vedere electric, dar costuri reduse;
- aparatul Multi-lab Herareus face conversia semnalului transmis de termocuplu (0 – 10 mV) în semnal compatibil cu PLC-ul (4 – 20 mA).

6.3.2. Rezultate experimentale - interpretare

După montarea termocuplului și preluarea semnalului compatibil cu PLC-ul s-au realizat experimentările pentru 3 profile diferite de semifabricat, și anume ϕ 180 mm, ϕ 200 mm, ϕ 250 mm, dar aceeași marcă 20MN10, compoziția chimică se regăsește în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1 Compoziția chimică pentru mărcile 20MN10

| Sarja | Marca | Norma | C | Mn | Si | S | P | Cr | Ni | Cu | Mo | | |
|-------|--------|-------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|------|----------|------------|
| 60790 | 20MN10 | | 0,21 | 1,01 | 0,21 | 0,004 | 0,010 | 0,07 | 0,10 | 0,20 | 0,02 | | |
| 60790 | 20MN10 | F. AVIZARE NR. 30 | 0,20 | 1,00 | 0,20 | 0,004 | 0,009 | 0,07 | 0,10 | 0,19 | 0,02 | | |
| 60790 | 20MN10 | | 0,20 | 0,97 | 0,19 | 0,032 | 0,009 | 0,07 | 0,10 | 0,20 | 0,02 | | |
| 60790 | 20MN10 | | 0,13 | 0,74 | 0,14 | 0,078 | 0,008 | 0,07 | 0,10 | 0,20 | 0,02 | | |
| 60790 | 20MN10 | | 0,07 | 0,09 | 0,01 | 0,078 | 0,005 | 0,06 | 0,10 | 0,19 | 0,02 | | |
| Ti | V | B | As | Al | Sn | Alsol | Ca | N | Sb | Cu+8Sn | CE | J-factor | T_lichidus |
| 0,00 | 0,005 | 0,0003 | 0,008 | 0,029 | 0,011 | 0,027 | 0,0015 | 0,0097 | 0,0042 | 0,290 | 0,42 | 258,26 | 1508 |
| 0,00 | 0,004 | 0,0004 | 0,008 | 0,034 | 0,011 | 0,033 | 0,0036 | 0,0073 | 0,0040 | 0,280 | 0,40 | 243,84 | 1509 |
| 0,00 | 0,005 | 0,0002 | 0,008 | 0,016 | 0,011 | 0,015 | 0,0006 | 0,0103 | 0,0040 | 0,290 | 0,40 | 228,87 | 1510 |
| 0,00 | 0,004 | 0,0002 | 0,008 | 0,002 | 0,011 | 0,001 | 0,0001 | 0,0077 | 0,0040 | 0,290 | 0,29 | 167,02 | 1517 |
| 0,00 | 0,002 | 0,0002 | 0,007 | 0,613 | 0,011 | 0,581 | 0,0001 | 0,0053 | 0,0048 | 0,280 | 0,12 | 16,10 | 1527 |

Pe un PLC identic cu cel folosit în condiții de laborator și existent în Secția „Turnare Continuă” din cadrul ArcelorMittal Hunedoara S.A., s-a transferat programul complet creat (metoda clasică / Fuzzy).

În prima fază PLC-ul a avut doar rolul de a înregistra, stoca și prelucra datele, în vederea validării bunei funcționări a acestuia, fără a avea posibilitatea de a regla debitul (conexiunea cu vanele fiind anulată), răcirea efectuându-se prin metoda clasică. Datele înregistrate și stocate se regăsesc în Anexele 6-12.

După validarea bunei funcționări PLC-ul a fost legat în sistem (realizând conexiunea cu vanele), apoi s-au realizat 3 seturi de turnări utilizând softul realizat.

Astfel pentru ϕ 250 mm, ca urmare a înregistrării și prelucrării datelor am obținut următoarele grafice, atât pentru metoda clasică cât și pentru metoda Fuzzy:

- diferența de temperatură față de lichidus (figura 6.28);
- viteza de turnare (figura 6.29);
- poziția vanei pe toate zonele de răcire (figura 6.30);
- valoarea debitului pe cele 3 zone (figura 6.31).

După cum se observă valoarea maximă a diferenței de temperatură este de 67 °C, ce se încadrează în intervalul 0-70 °C impus de procesul tehnologic, răcirea efectuându-se după parametrii prezentați în figura 6.31.

Similar s-au efectuat experimentări pentru ϕ 200 mm (figurile 6.32, 6.33, 6.34, 6.35), respectiv pentru ϕ 180 mm (figurile 6.36, 6.37, 6.38, 6.39).

În cazul ϕ 200 mm diferența de temperatură maximă a fost de 60 °C, iar pentru ϕ 180 mm, diferența de temperatură maximă a fost de 50 °C.

Din punct de vedere calitativ graficele diferă (metoda clasică – metoda Fuzzy) prin faptul că în cazul metodei clasice graficele sunt prezentate sub forma unei funcții discrete (treaptă), iar în cazul metodei Fuzzy graficele sunt continue.

Atât prin metoda clasică, cât și prin metoda Fuzzy alura graficelor este în concordanță cu situația reală, observându-se faptul că după un anumit interval de timp în care "variația de temperatură" scade, urmează o creștere a acesteia ca urmare a faptului că temperatura din centrul oalei de turnare a oțelului este mai mare, "variația de temperatură" atingând un nou maxim, urmând logic până la sfârșitul turnării o scădere a acesteia.

Metoda Fuzzy, prin intervale mici de timp (250 ms) permite optimizarea în timp real a debitului de apă necesar răcirii oțelului din zona secundară a turnării împărțită în 3 zone.

După cum se observă din graficele debitelor pe cele 3 zone (figura 6.31, 6.35, 6.39) acestea respectă proporționalitatea tehnologică (exemplu pentru ϕ 180 mm debitul total este repartizat pe cele 3 zone astfel: zona 1 – 40%, zona 2 – 40%, zona 3 – 20%), dar și valoarea debitului minim pentru răcirea secundară (pentru același exemplu: zona 1 – 80 l/min, zona 2 – 80 l/min și zona 3 – 60 l/min).

Debitele sunt în corelație cu viteza de turnare dar și cu tipul profilului, astfel după cum se observă din figurile (6.29, 6.33, 6.37) pentru ϕ 200 mm și ϕ 250 mm atât proporționalitatea tehnologică a acestora, dar și valoarea debitului minim pentru răcirea secundară diferă.

Pentru ϕ 200 mm se identifică clar 3 debite diferite datorită proporționalității tehnologice diferite comparativ cu ϕ 180 mm (zona 1 – 33%, zona 2 – 40%, zona 3 – 27%).

Deși proporționalitatea tehnologică a debitului necesar răcirii profilului ϕ 250 mm este identică pe cele 3 zone ale răcirii secundare cu cea a profilului ϕ 180 mm, graficele diferă datorită valorii debitului minim necesar (zona 1 – 60 l/min, zona 2 – 85 l/min și zona 3 – 105 l/min).

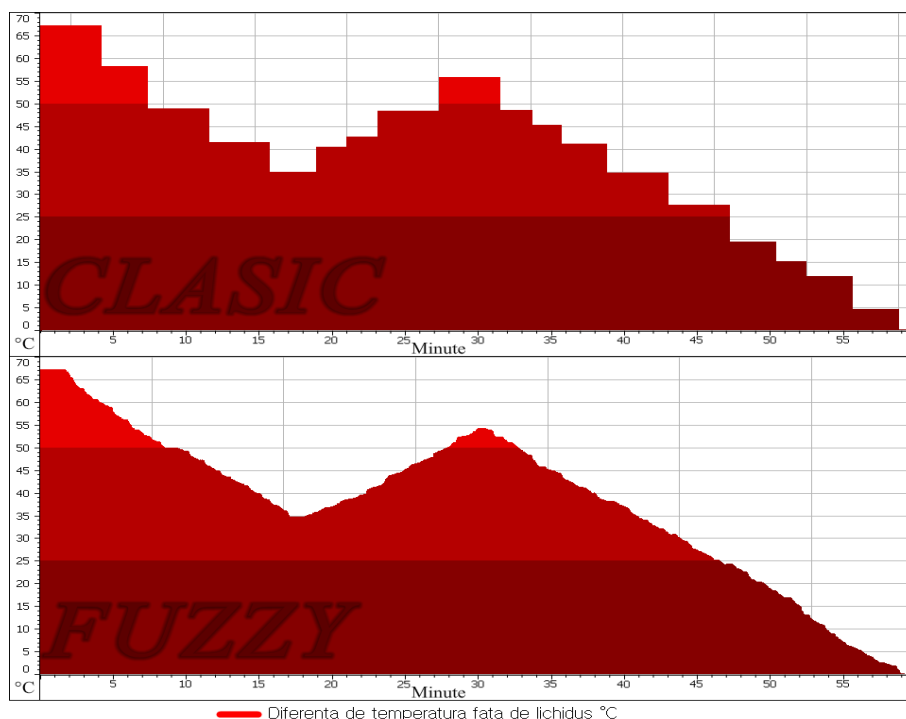


Fig. 6.28 Diferența de temperatură - ϕ 180 mm (Anexa 7,10)

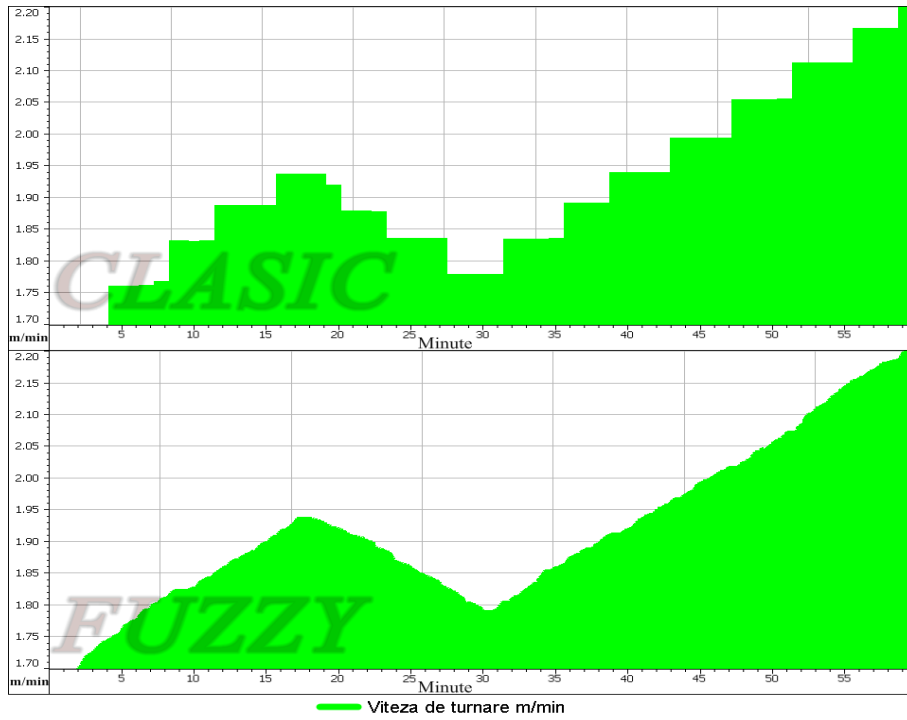


Fig. 6.29 Viteza de turnare - ϕ 180 mm (Anexa 7,10)

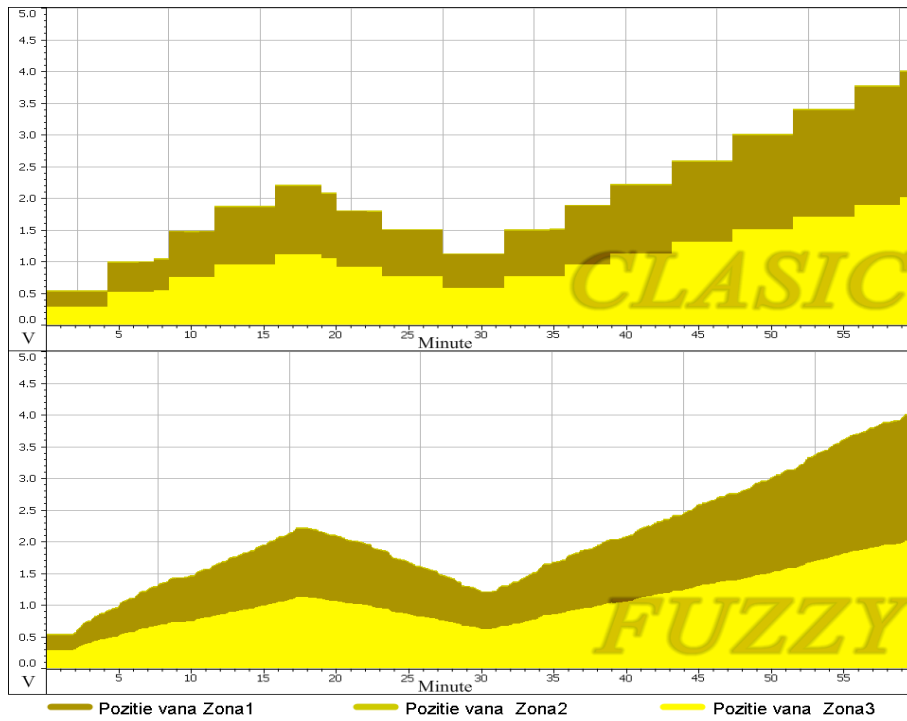


Fig. 6.30 Comanda clapetei - ϕ 180 mm (Anexa 7,10)

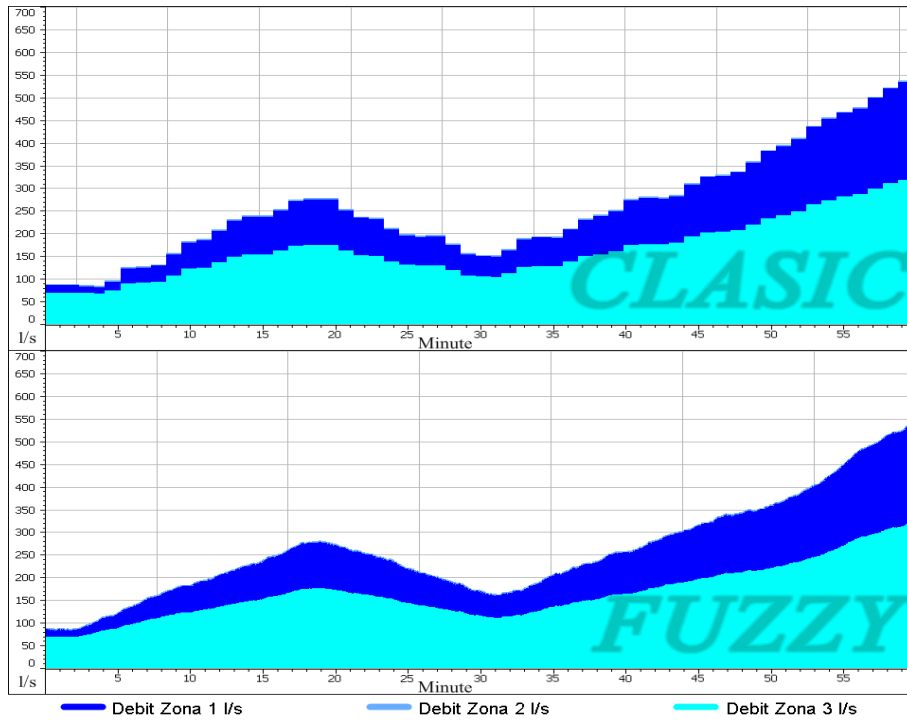


Fig. 6.31 Debitul apei - ϕ 180 mm (Anexa 7,10)

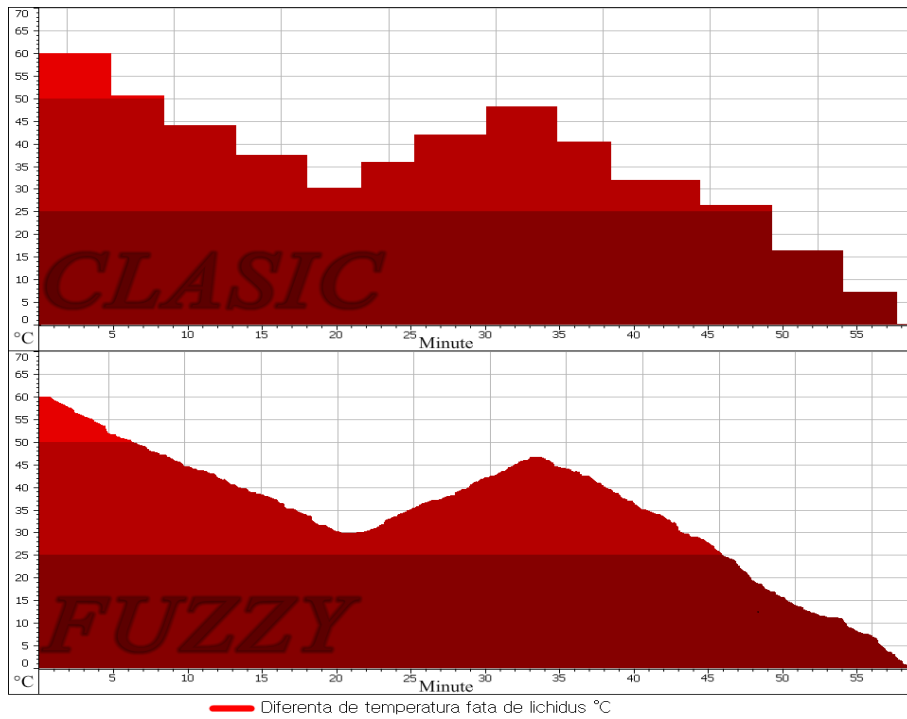


Fig. 6.32 Diferența de temperatură - ϕ 200 mm (Anexa 8,11)

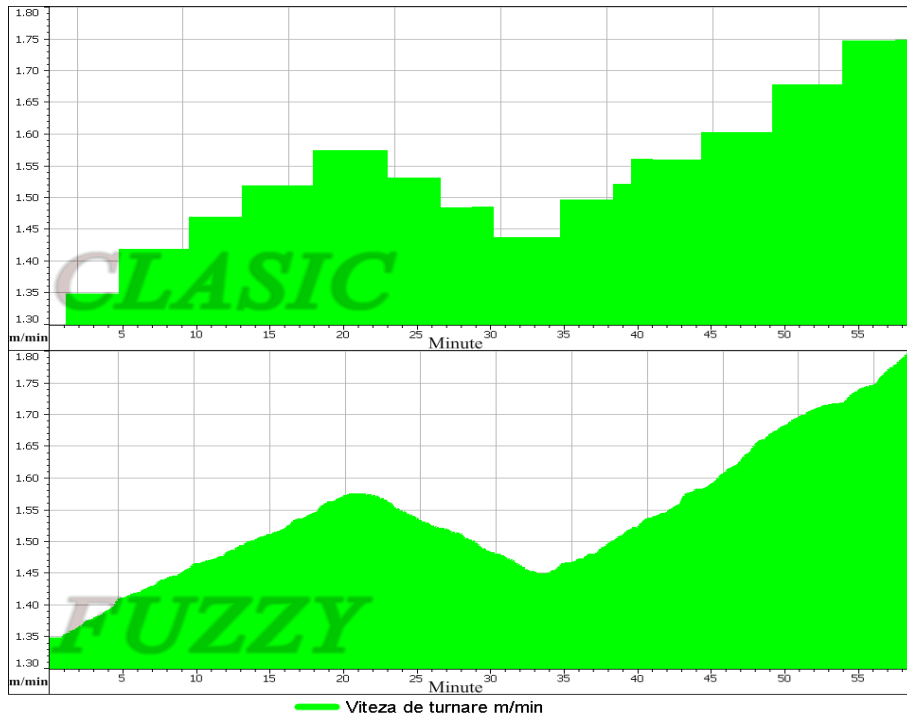


Fig. 6.33 Viteza de turnare - ϕ 200 mm (Anexa 8,11)

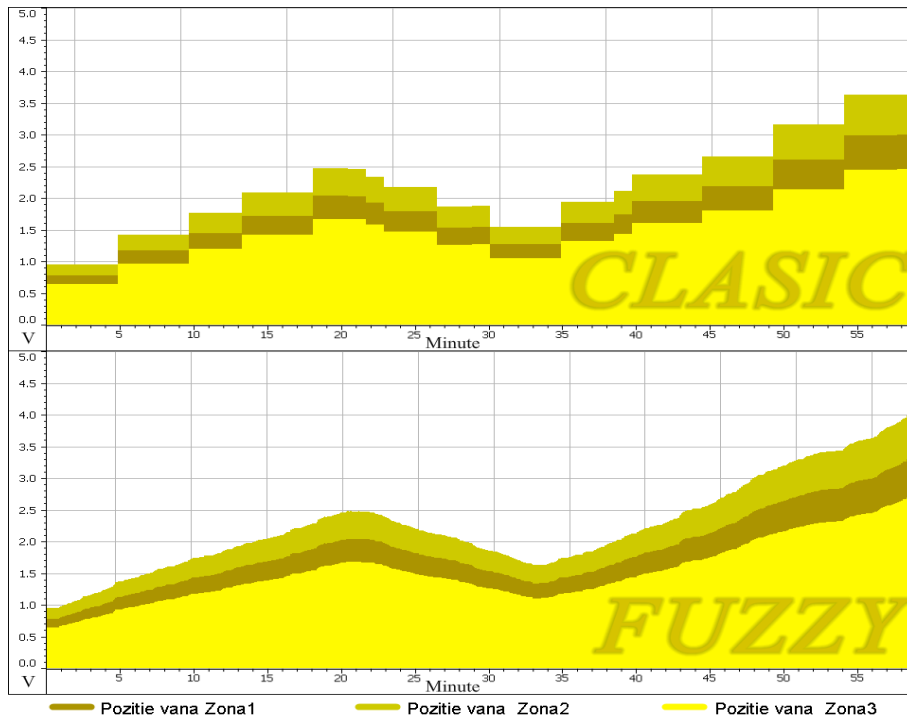


Fig. 6.34 Comanda clapetei - ϕ 200 mm (Anexa 8,11)

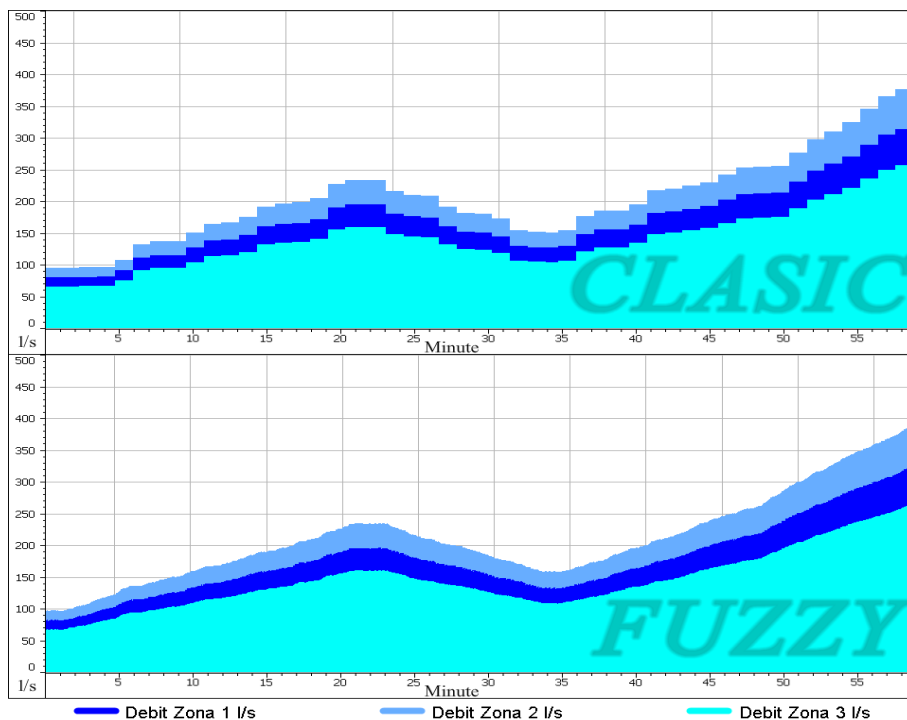


Fig. 6.35 Debitul apei - ϕ 200 mm (Anexa 8,11)

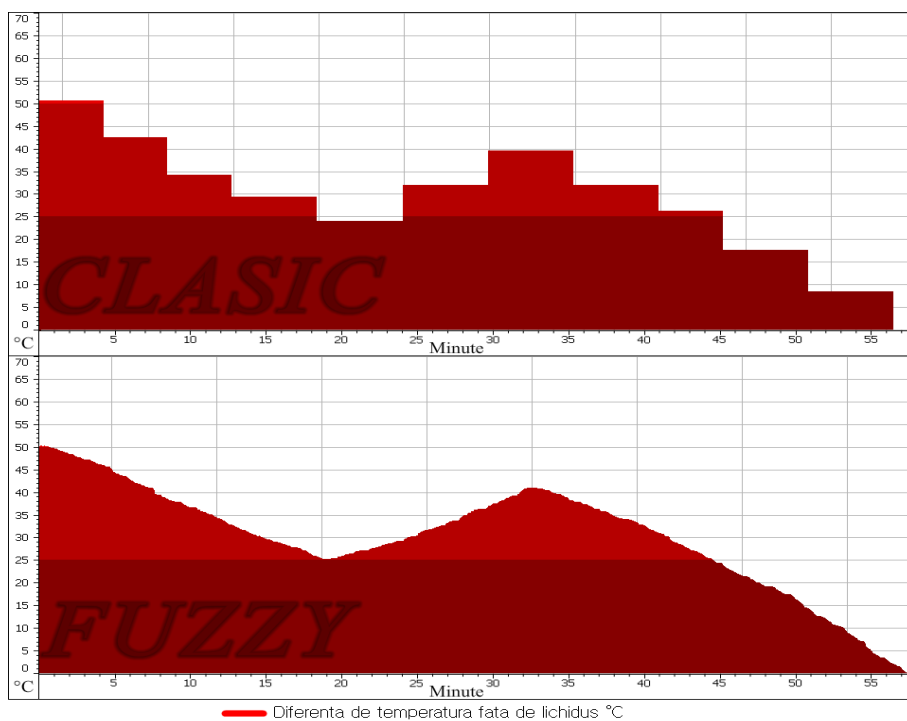


Fig. 6.36 Diferența de temperatură - ϕ 250 mm (Anexa 9,12)

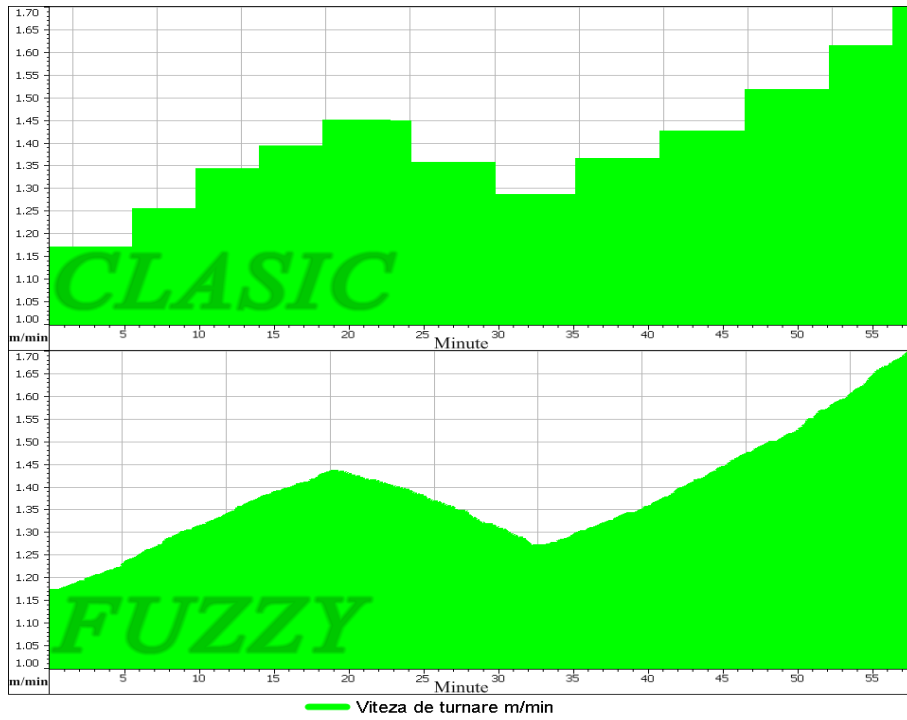


Fig. 6.37 Viteza de turnare - ϕ 250 mm (Anexa 9,12)

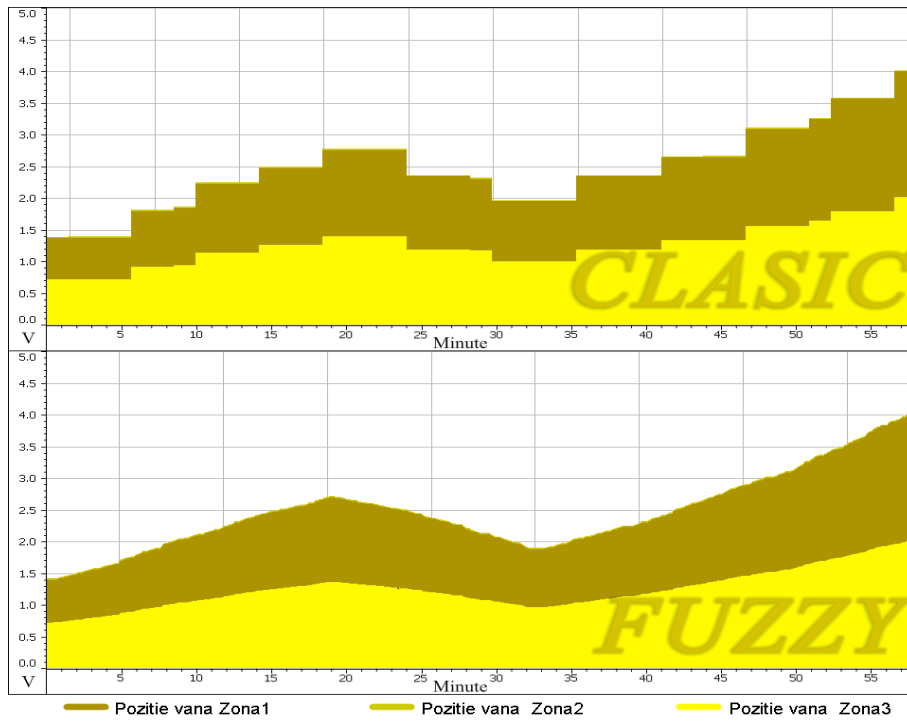


Fig. 6.38 Comanda clapetei - ϕ 250 mm (Anexa 9,12)

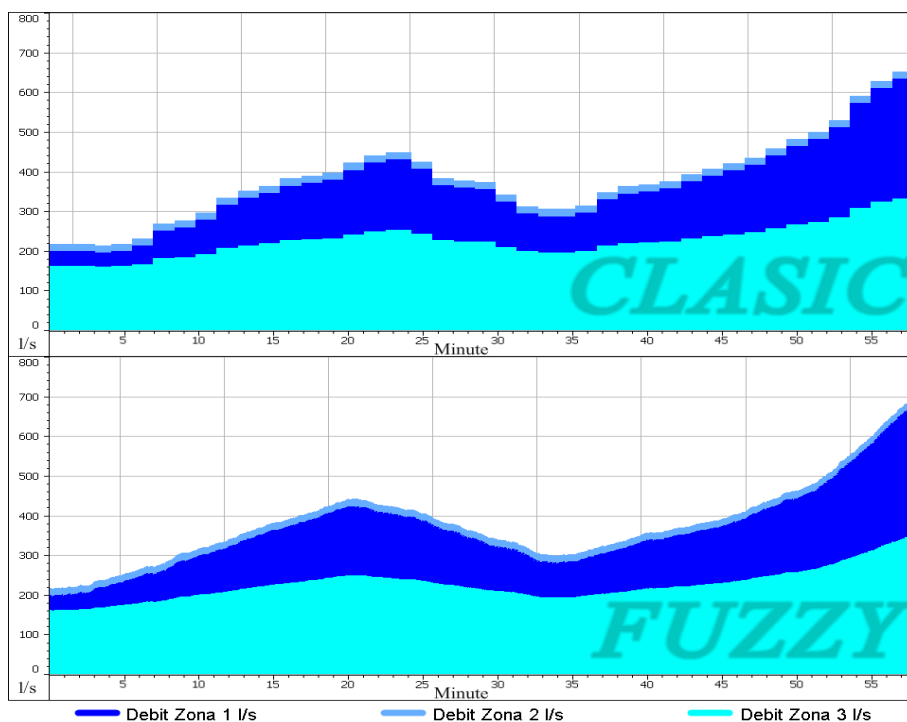


Fig. 6.39 Debitul apei - ϕ 250 mm (Anexa 9,12)

6.4. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-au avut în vedere trei mari direcții:

- proiectarea și realizarea unui stand experimental de laborator în vederea simulării controlului debitului pe toate cele trei zone de răcire secundară la turnarea continuă a oțelului;
- programarea și implementarea PLC-ului de comandă a clapetei vanei în vederea reglării debitului în condiții reale;
- etapele și metodologia de cercetare în vederea îmbunătățirii calității semifabricatelor cu secțiune circulară turnate continuu prin controlul în timp real a debitului apei de răcire.

În prima parte s-a proiectat standul didactic experimental plecându-se de la situația reală existentă în cadrul ArcelorMittal Hunedoara S.A., realizarea acestuia efectuându-se cu elemente hardware compatibile cu PLC-ul. Acest stand are în componența sa o serie de elemente ce pot permite prin stabilirea legăturilor dintre acestea o similitudine în ceea ce privește comanda și reglarea debitului de răcire a oțelului pe toate cele trei zone.

Programarea PLC-ului s-a realizat în două moduri:

1. Primul mod de programare considerat "clasic", a luat în calcul doar elemente punctuale din situația existentă. Măsurarea temperaturii efectuându-se la intervale definite de timp, programul calculând automat poziția clapetei vanei.

2. Pentru eliminarea dezavantajelor identificate pentru primul mod de programare s-a introdus logica Fuzzy care permite calcularea continuă a poziției clapetei vanei.

PLC-ul fiind de tipul SIMATIC S7 300, pentru programarea "clasică" s-a utilizat software-ul STEP7, iar pentru programarea în timp real s-a folosit aplicația FuzzyCotrol++.

În ajutorul utilizatorului s-a proiectat o interfață prietenoasă de comandă Scada, folosind aplicația WinCC.

În condiții de laborator s-au validat funcționalitatea standului didactic experimental, dar și logica programării prin cele două metode.

Pentru testarea dar și implementarea sistemului proiectat și realizat, cu acordul conducerii ArcelorMittal Hunedoara S.A., acesta a fost transferat în unul dintre PLC-urile SIMATIC S7 300 (Anexa 13) existente din cadrul secției de turnare continuă. Față de aparatura de laborator, pentru condițiile concrete de exploatare a instalației de turnare continuă, a fost înlocuit potențiometrul cu senzorul de temperatură de tip S. Practic s-au efectuat trei experimente, pentru trei secțiuni de semifabricat diferite ϕ 180 mm, ϕ 200 mm, ϕ 250 mm, atât prin metoda clasică cât și prin metoda cu reguli Fuzzy. Rezultate obținute fiind în concordanță cu cele obținute în condițiile de laborator.

În urma experimentărilor s-a dovedit faptul că soluția Fuzzy propusă este eficientă și mult superioară soluției actuale de control a debitului, putându-se implementa relativ ușor pe orice instalație de turnare continuă nefiind necesare modificări importante din punct de vedere Hardware ale instalației existente.

PARTEA a III-a

**CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE.
DISEMINAREA REZULTATELOR.**

7. CONCLUZII FINALE RECAPITULATIVE CONTRIBUȚII ORIGINALE DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR

7.1 Concluzii finale recapitulative

Din studiul literaturii de specialitate și în urma rezultatelor obținute în cadrul cercetărilor efectuate privind Conducerea procesului de turnare continuă a oțelului cu ajutorul sistemului inteligent Fuzzy, se pot formula următoarele concluzii finale:

1) Restructurarea economică care a avut loc în România după 1989, a condus la dezafectarea celor 4 oțelării Siemens - Martin, ultima O.S.M.II Hunedoara în iunie 1999 și ca urmare în aceste noi condiții au rămas ca agregate de bază pentru elaborarea oțelului, convertizoarele cu oxigen la ArcelorMittal Galați și cuptoarele electrice cu arc la ArcelorMittal Hunedoara;

2) În oțelăriile electrice care au rămas funcționale după restructurarea economică, au fost instalate cuptoare electrice cu arc moderne tip EBT (Excentric Bottom Tapping), echipate cu transformatoare de mare și foarte mare putere;

3) Echiparea acestor oțelării cu instalații de turnare continuă și de procesare a oțelului în oala de turnare (LF și VD) asigură condiții optime pentru turnarea secvențială și ca urmare acestea pot fi considerate oțelării moderne;

4) Durata șarjei la cuptoarele electrice cu arc tip EBT este cuprinsă între 45 – 75 min (foarte apropiată de cea la convertizoarele cu oxigen), fiind foarte mult influențată de calitatea încărcăturii și gradul de pregătire a acesteia, precum și de calificarea personalului ;

5) Productivitatea în medie 100 t/h, fiind influențată de durata șarjei, gradul de pregătire a încărcăturii și foarte mult de conținutul de fier a acesteia;

6) Durata procesării în asemenea instalații LF este cuprinsă între 42 – 80 minute, fiind influențată și de structura secvenței de turnare, respectiv de sincronizarea procesului de elaborare și turnare;

7) Se tinde spre creșterea cantității de oțel turnat într-o secvență (respectiv a numărului de oale turnate);

8) Instalațiile moderne de turnare asigură turnarea unei game variate de semifabricate de diferite secțiuni poligonale, circulare și produse plate;

9) Tendința actuală este de a se turna semifabricate cu secțiune cât mai apropiată de cea finală;

10) Referitor la calitatea încărcăturii metalice în ultimii 8-10 ani se constată o creștere a sortimentului de încărcătură de tip scoarțe (de proveniență internă sau externă) cu conținut de fier în limite largi, ceea ce are influență mare asupra consumurilor specifice (metal, energie, materiale refractare etc.

11) Sistemul Fuzzy, spre deosebire de un regulator clasic, nu tratează informația printr-o relație matematică bine definită (algoritm de reglare), ci utilizează inferențe cu mai multe reguli, bazându-se pe variabile lingvistice;

12) Primele aplicații ale logicii Fuzzy în sistemele de reglare au apărut în 1975 iar din 1985 japonezii au început să o utilizeze în procesele industriale pentru rezolvarea problemelor de conducere;

13) În Europa, cercetările în aplicarea logicii Fuzzy în reglare au debutat mai târziu, de exemplu, pentru Germania anul demarării unor cercetări sistematice se consideră 1991;

14) Sistemele de reglare Fuzzy pot fi considerate de dată recentă și ca urmare cu cât se efectuează mai multe cercetări pot fi furnizate noi informații tehnice în acest domeniu.

15) Din analiza corelațiilor simple și multiple, stabilite între grosimea crustei (parametru dependent), lungimea cristalizorului și viteza de tragere (parametrii independenți) iese foarte bine în evidență interacțiunea tehnologică dintre acești parametri;

16) Creșterea lungimii cristalizorului conduce la creșterea grosimii crustei solidificate, în schimb creșterea vitezei de tragere la scăderea acesteia (ca urmare a reducerii cantității specifice de căldura evacuată);

17) Corelațiile obținute pot fi utilizate în practica curentă și în mod deosebit în cercetare, ba mai mult se consideră că pot fi îmbunătățite și extinse.

18) Calitatea suprafeței semifabricatelor turnate continuu este influențată de caracteristicile zgurii de lubrifiere, mai precis de vâscozitate și tensiunea superficială;

19) Corelațiile stabilite între vâscozitatea zgurii și tensiunea superficială a acesteia, considerați parametri dependenți, parametrii de influență reprezentați prin temperatură și compoziția zgurii sunt reprezentative, atât din punct de vedere matematic, cât și tehnologic;

20) Pe baza corelațiilor obținute, se pot stabili limitele de variație pentru temperatura de topire și cele privind compoziția chimică pentru zgura de lubrifiere, astfel încât să se obțină pentru vâscozitate și tensiunea superficială valori în limitele tehnologice;

21) Între parametrii de răcire a semifabricatelor din zona secundară a instalației de turnare continuă și viteza de turnare a oțelului, au fost stabilite corelații tehnologice reprezentative, exprimate analitic și grafic;

22) Pe baza reprezentărilor grafice, în funcție de temperatura de turnare a oțelului și debitul apei de răcire se poate alege viteza de turnare prescrisă;

23) Aplicarea propusă o soluție Fuzzy originală pe structura existentă a sistemului de conducere a turnării continue, poate conduce la eliminarea fisurii apărute în semifabricatul turnat în zona secundară de răcire;

24) În vederea eliminării fisurilor, a fost concepută schema unui sistem Fuzzy care analizând o serie de mărimi preluate din proces, produce modificări ale debitului apei de răcire și ale vitezei de turnare;

25) În literatura de specialitate, de pe plan național cât și de pe plan mondial, nu există o corecție inteligentă (IFS) a debitului apei în răcirea secundară a oțelului, cu un reglaj în timp real și pe zone de răcire;

26) Întocmirea bazelor de reguli s-a făcut utilizând experiența operatorilor umani și informații culese direct din proces la instalația de turnare continuă, din cadrul Societății Comerciale ArcelorMittal Hunedoara S.A.;

27) Verificarea și confirmarea bazei de reguli și a Intelligent Fuzzy Sistem (IFS) proiectat, a fost efectuată prin simulare în Simulink

28) Din analiza rezultatelor simulării rezultă că, indiferent de valorile mărimilor generate la intrare, IFS-ul elaborează corecțiile necesare pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire secundară, ceea ce confirmă validitatea funcționării sistemului;

29) 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.

30) Sistemul proiectat poate fi adaptat pentru răcirea secundară la toate tipodimensiunile de semifabricate turnate continuu.

7.2 Contribuții originale

Pe baza studiului literaturii de specialitate privitor la tematica tezei de doctorat, a experimentărilor în fază de laborator și industriale, a analizei matematice și tehnologice a rezultatelor obținute, rezultă următoarele contribuții originale:

1. Elaborarea planului de cercetare și experimentări privind îmbunătățirea procesului de turnare continuă a oțelului;
2. Realizarea unei sinteze tehnologice privind:
 - fluxul tehnologic de elaborare și turnare a oțelului în cuptoare electrice cu arc de mare putere tip EBT de capacitate 100 t, tratate în afara cuptorului, respectiv în oala de turnare, LF și VD, și turnate continuu sub formă de blumuri, țagle și bare pe o instalație cu 5 fire;
 - o sinteză foarte bine documentată, referitoare la utilizarea în industrie/siderurgie a sistemului inteligent Fuzzy, considerat de dată recentă și ca urmare cu cât se efectuează mai multe cercetări pot fi furnizate noi informații tehnice în acest domeniu;
3. Obținerea unor corelații tehnologice simple și multiple între vascozitatea și tensiunea superficială a zgurelor de lubrifiere (în sistemul cristalizor - oțel lichid) prin utilizarea programelor de calcul EXCEL și MATLAB: corelațiile simple obținute în programul EXCEL sunt reprezentate prin funcții polinomiale de gradul 1, 2, 3 și exponențiale, iar corelațiile duble și triple obținute în programul Matlab prin funcții polinomiale de gradul 2;
4. Stabilirea domeniilor optime de variație a parametrilor tehnologici, pe baza analizei din punct de vedere tehnologic a corelațiilor obținute și anume:
 - vâscozitatea zgurii în limitele $\eta = 0,4-1,4 \text{ Ns/m}^2$, ceea ce conduce la limitele de variație ale variabilelor independente: $\text{CaO/SiO}_2 = 0.7 - 1.14$; $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}) = 5.85 - 14.9\%$ și $T = 1200 - 1500 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - limitele de variație a compoziției chimice zgurii care asigură vâscozitatea corespund și pentru tensiunea superficială, mai precis asigură pentru această caracteristică valori de 400 - 500 mJ/m²;
- 5) Utilizarea programelor de calcul EXCEL și MATLAB pentru prelucrarea unor date obținute în cadrul experimentărilor și obținerea unor corelații tehnologice simple și multiple (duble și triple), reprezentative atât din punct de vedere matematic, cât și tehnologic;
- 6) Corelațiilor obținute, cele simple, exprimate prin funcții polinomiale de gradul 1; 2; 3 și exponențiale, și cele multiple prin funcții polinomiale de gradul 2; 5 și sub formă combinată, sunt prezentate atât sub formă analitică cât și grafică;
- 7) Analiza corelațiilor din punct de vedere tehnologic și stabilirea domeniilor optime de variație a parametrilor tehnologici;
- 8) Determinarea unor corelații tehnologice între parametrii de răcire din zona secundară a instalației de turnare continuă și viteza de turnare continuă a oțelului se pot stabili corelații tehnologice reprezentative, exprimate analitic și grafic;
- 9) Stabilirea pe baza reprezentărilor grafice, a valorilor pentru temperatura de turnare a oțelului și debitul apei de răcire astfel încât să se obțină viteza de turnare prescrisă;
- 10) Conceperea unei soluții Fuzzy originale pe structura existentă a sistemului actual de conducere a turnării continue, prin care se elimină avansat apariția fisurilor în zona secundară de răcire (în materialul turnat);
- 11) Conceperea schemei pentru un sistem de decizie Fuzzy, care pe baza analizei unor parametri, mai precis a valorilor acestora (preluate din proces), produce modificări ale debitului apei de răcire și ale vitezei de turnare;

12) Elaborarea bazelor de reguli, prin colaborarea cu operatorii umani și a informațiilor culese direct din proces, respectiv de la instalația de turnare continuă, din cadrul ArcelorMittal S.A. Hunedoara.

13) Verificarea și confirmarea bazelor de reguli și a IFS proiectate prin simulare în Simulink, constatând că, indiferent de valorile mărimilor generate la intrare, IFS-ul elaborează corecțiile necesare pentru viteza de turnare și debitul apei de răcire secundară, ceea ce confirmă validitatea funcționării sistemului;

14) Proiectarea și realizarea unui stand experimental de laborator, în vederea simulării controlului debitului pe toate cele trei zone de răcire secundară la turnarea continuă a oțelului;

15) Programarea și implementarea PLC-ului de comandă a clapetei vanei, în vederea reglării debitului de apă în condiții reale;

16) Stabilirea etapelor și metodologia de cercetare, în vederea îmbunătățirii calității procesului de turnare continuă a oțelului, sub formă de semifabricate cu secțiune circulară, prin controlul în timp real a debitului apei de răcire.

17) Realizarea programării PLC-ului în două variante:

a) prima varianta de programare considerată "clasică", a luat în calcul doar elemente punctuale din situația existentă, măsurarea temperaturii efectuându-se la intervale definite de timp, programul calculând automat poziția clapetei vanei.

b) pentru eliminarea dezavantajelor identificate în cazul primei variante de programare, s-a introdus logica Fuzzy care permite calcularea continuă a poziției clapetei vanei.

18) Transferul cu acordul conducerii ArcelorMittal Hunedoara S.A. a sistemului proiectat și realizat, în unul dintre PLC-urile SIMATIC S7 300 existente din cadrul secției de turnare continuă.

19) Efectuarea practică a trei experimente, pentru trei secțiuni de semifabricat diferite □ 180 mm, □ 200 mm, □ 250 mm, atât prin metoda clasică cât și prin metoda cu reguli Fuzzy, rezultatele obținute fiind în concordanță cu cele obținute în condițiile de laborator.

20) Scoaterea în evidență a faptului că soluția Fuzzy propusă este eficientă și mult superioară soluției actuale de control a debitului apei de răcire, putându-se implementa relativ ușor pe orice instalație de turnare continuă nefiind necesare modificări importante din punct de vedere Hardware ale instalației existente.

7.3 Direcții de continuare a cercetărilor

Având în vedere rezultatele obținute în cadrul elaborării tezei de doctorat, se consideră că prezintă interes continuarea cercetărilor în următoarele direcții:

1) Experimentarea în continuare a sistemului Fuzzy proiectat, la Oțelăria Electrică nr. 2 – ArcelorMittal Hunedoara S.A. și compararea/verificarea rezultatelor obținute utilizând corelațiile Excel și Matlab;

2) Extinderea sistemului proiectat și la turnarea continuă a sleburilor și a bramelor;

3) Proiectarea unui sistem Fuzzy (IFS) pentru conducerea proceselor de elaborare a oțelului pe fluxul cuptoarele electrice cu arc EBT și Metalurgia în Oală (LF și VD).

DISEMINAREA REZULTATELOR

1. C. A. Gheorghiu, T. Hepuț and E. Popa, "The optimisation of the viscosity of lubricating slags used in the continuous casting of steel", ICNAAM 2015, Rhodes, Grece, September 2015, (AIP Conf. Proc. 1738, 080004 (2016)), (WOS:000380803300089).
2. C. A. Gheorghiu, E. Ardelean and T. Hepuț , "The influence of chemical composition of the slags on the surface tension used in the continuous casting of steel", ICNAAM 2015, Rhodes, Grece, September 2015 (AIP Conf. Proc. 1738, 080005 (2016)), (WOS:000380803300090).
3. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, C. P. Chioncel, "New solutions to control water flow in the secondary cooling", 17th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI) Budapest, pp 363-368, HUNGARY, 2016, (WOS:000399130100064).
4. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, C. P. Chioncel, "The influence of cooling parameters on the speed of continuous steel casting", ICAS2017, Romania, International Conference on Applied Sciences, In curs de publicare si indexare ISI.
5. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, C. P. Chioncel, "Cooling water flow control realized with systems based on Fuzzy mechanism", ICAS2017, Romania, International Conference on Applied Sciences, In curs de publicare si indexare ISI.
6. C. A. Gheorghiu, "Study on the influence of continuous casting parameters on the quality of semi-finished products", ACTA TEHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering, Tome VIII [2015] Fascicule 1, pp 101-104, Hunedoara, Romania, January 2015, ISSN: 2067 – 3809, (indexed EBSCO/Google Scholars).
7. C. A. Gheorghiu, "Refining steel in an induction ladle furnace", Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara 13.3 (Aug 2015): 197-200, (indexed EBSCO/Google Scholars).
8. C. A. Gheorghiu and T. Hepuț "Research concerning the influence of the cooling parameters on the speed of the casting in continuous casting of steel, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, pp 123-128, 2016 (indexed EBSCO/Google Scholars).
9. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, "Cooling water flow control with PLC" Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, International Journal of Engineering, Tome XV August 2017 – Fascicule 3, pp 155-158 ISSN: 1584-2665, (indexed EBSCO/Google Scholars).
10. D. I. Trif, C. A. Gheorghiu, V. Alexa and S. Rațiu "Virtual application used to simulate the functionality of engine control unit", MECHEDU 2015, pp 66-69, Subotica, Serbia, May 2015, ISBN 978-86-918815-0-4, (Google Scholars).
11. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, R. Rob, „Fuzzy control strategy for secondary cooling of continuous steel casting”, Innovative Ideas in Science 2016 IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 200 (2017) 012046 doi:10.1088/1757-899X/200/1/012046, (Scopus).
12. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, C. P. Chioncel, „Control system of water flow and casting speed in continuous steel casting”, Innovative Ideas in Science 2016 IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 200 (2017) 012047 doi:10.1088/1757-899X/200/1/012047, (Scopus).
13. V. Alexa, I. Kiss and C. A. Gheorghiu "The educational practices and e-learning courses in performing the laboratory works specifics to the hydraulics and

pneumatics applications”, *Analecta Technica Szegedinensia* Issue 3, pp 10-16, Szeged, Hungary, 2013, ISSN 1788-6392.

14. C. A. Gheorghiu and T. Hepuț “Studiu privind parametrii de influență a turnării continue asupra calității semifabricatelor”, pp 1-6, HD-44-STUD, Hunedoara, Romania, May 2014, *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, (annals.fih.upt.ro).

15. C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, “Controlul debitului apei de racire realizat cu ajutorul unui automat programabil PLC”, HD-47-STUD Hunedoara, Romania, 2017, (fih.upt.ro).

BIBLIOGRAFIE

1. E. Ardelean, „Turnarea semifabricatelor de oțel”, Ed. Mirton Timișoara, 2004.
2. E. Ardelean, T. Hepuț, M. Ardelean, „Turnarea continuă a oțelului”, Ed. Politehnica Timișoara, 2001.
3. E. Ardelean, T. Hepuț, M. Ardelean, A. Josan, „Mathematical solidification model of continuous casting steel product”, International Symposium Young people and multidisciplinary research Romania –Serbia & Montenegro – Hungary, Timișoara, 2004.
4. E. Ardelean, A. Socalici, T. Hepuț, M. Ardelean, „Research regarding the temperature influence on continuous casting process”, Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timișoara, 2005.
5. N. Oargă, T. Hepuț, E. Ardelean, E. Popa, „Studiu privind defectele interne a semifabricatelor turnate continuu”, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Tomul III, Fascicola 1, 2001.
6. N. Oargă, T. Hepuț, E. Ardelean, E. Popa, „Studiu privind defectele de suprafață a semifabricatelor turnate continuu”, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Tomul III, Fascicola 1, 2001.
7. T. Hepuț, E. Ardelean, A. Socalici, E. Popa, „Experimentări și rezultate cu privire la lubrifierea la interfața cristalizor – semifabricat turnat continuu”, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Tomul III, Fascicola 1, 2001.
8. E. Ardelean, „Teză de doctorat”, Universitatea Politehnica Timișoara, 2004.
9. E. Popa, „Teză de doctorat”, Universitatea politehnica Timișoara, 2009.
10. F. Drăgoi, „Teză de doctorat”, Universitatea Politehnica Timișoara, 2012.
11. E. Ardelean, T. Hepuț, M. Ardelean, „Turnarea continua a oțelului”, Editura Politehnica Timișoara, 2001.
12. E. Ardelean, M. Ardelean, A. Socalici, T. Hepuț, “Simulation of continuous cast steel product solidification”, Revista de Metalurgia 43 (3), pg.181-187, 2007, Spain.
13. E. Ardelean, T. Hepuț, M. Ardelean, A. Socalici, C. Abrudean, „Optimizarea proceselor la turnarea continua a oțelului”, Editura CERMI, Iași 2007.
14. A. Lăscuțoni, „Cercetări privind modelarea matematică a agregatelor termice la oțel lichid la nivel oala de turnare –distribuitor –cristalizor”, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, 2015.
15. I. Dragomir, „Teoria proceselor siderurgice”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1962.
16. Popa, „Cercetari privind influența proceselor fizico-chimice-metalurgice ce au loc la interfețele cristalizor-zgură-oțel lichid”, Ed. Politehnica Timișoara, 2009.
17. A. Socalici, „Cercetări și experimentări privind îmbunătățirea structurii semifabricatelor turnate continuu”, Proiect de cercetare de excelență pentru tinerii cercetători, director proiect, CEEX 2005 beneficiar UEFISCSU, Nr. 3196/13.10.2005.
18. W. G. Recktenwal, “Finite - Difference Approximations to the Heat Equation”, Mechanical Engineering Department Portland State University, USA, January 21, 2004.
19. E. Ardelean, T. Hepuț, M. Ardelean, „Procese industriale”, Editura Politehnica Timișoara, 2012.
20. I. Dragomir, „Steel processes theory”, Bucuresti: Didactică și Pedagogică, 1985.

21. B. G. Thomas, „Modeling of the continuous casting of steel-past,present and future”, 59th Electric Furnance Conference, Phoenix, AZ,2001.
22. I. Lagrat, A. El Ougli, I. Boumhidi, „Optimal Adaptive Fuzzy Control for a Class of Unknown Nonlinear Systems”, WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL, Issue 2, Volume 3, February 2008, ISSN: 1991-8763, pp.89-98.
23. C. C. Lee, „Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller”, IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics 20(2): 404-435, 1990.
24. I. V. Romulus, „Turnarea continuă a semifabricatelor rotunde: noțiuni teoretice minimale și notițe din experiență proprie”, Editura„Neutrino”,2013.
25. A. Nicolae, A. Ioana, C. Predescu, I. F. Sandu, M. Sohaciu, G. G. Calea, „Conducerea optimă a cuptoarelor cu arc electric”, Ed. Fair Partners, Bucuresti, 2002.
26. I. Borza, G. Popoiu, A. Ciocan, „Tehnologia elaborării fontei”, Vol. I, 1984, Institutul Politehnic Traian Vuia, Institutul de Subingineri Hunedoara .
27. G. Nica, A. Socalici, E. Ardelean, T. Hepuț, „Tehnologii pentru îmbunătățirea calității oțelului”, Ed. Mirton, Timișoara, 2003.
28. F. Drăgoi, „Cercetări privind reducerea conținutului de gaze din oțelurile elaborate și tratate pe fluxul tehnologic E.B.T. – LF”, teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, 2012.
29. V. Geantă, „Procese și tehnologii de obținere a oțelurilor de înaltă puritate prin tratare în afara cuptorului”, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica București, 1998.
30. M. Schuster, „Perfecționări în tehnica turnării continue cu implicații privind calitatea semifabricatelor, reducerea consumului de metal și creșterea productivității instalațiilor”, Gazeta Tehnico Științifică, ICEM, nr.3/1980.
31. I. Butnariu, V. Geantă, „Turnarea continuă a semifabricatelor de oțel”, Editura Tehnică, București, 2000.
32. 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.
33. T. O'conner, J. Dantzig, „Modeling the Thin Slab Continuous Casting Mold”, Metallurgical and Materials Transaction 25B(4): 443-457, 1994.
34. 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, pg.296-303, Bucuresti -2006.
35. A. Lăscuțoni, „Cercetări privind modelarea matematică a regimului termic al oțelului lichid la nivelul oală de turnare- distribuitor-cristalizor”, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara 2014.
36. E. Ardelean, T. Hepuț, M. Ardelean, A. Socalici, C. Abrudean, „Optimizarea proceselor la turnarea continuă a oțelului”, Editura CERMI, Iași 2007.
37. V.A. Efimov, “Casting and crystallizing of steel”, Ed. Technical, Bucuresti, 1986.
38. Ș. Preitl, R. Precup, „Introducere în conducerea Fuzzy a proceselor”, Editura Tehnică, București, 1997.
39. C. Voloșencu, „Reglare Fuzzy și neuronală”, Editura Eurobit, Timisoara, 1997.
40. F. Angela, L. Marcel, „Quality control în die casting with neural networks”, Proceedings of 1 st International Symposium on Neuro-Fuzzy Systems, pp 1-7, 1996.

41. S. Anghel, C. Cuntan, „Conducerea Fuzzy a procesului de răcire secundară la turnarea continuă”, Sesiunea de comunicări științifice, Hunedoara 2001.
42. S. Anghel, N. Rusu, C. Cuntan, „Sistem expert pentru conducerea procesului de turnare continuă, bazat pe logica Fuzzy”, Sesiunea de comunicări științifice, Petroșani 2001.
43. B. K. Base, „Expert Sistem, Fuzzy Logic and Neuronal Network Applications”, Proc. of the IEEE Nr. 8/1994.
44. A. K. Bhattacharya, „Recognition of fault signature patterns using Fuzzy logic for prevention of breackdowns în steel continuous casting process” Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp-318-324, 2005.
45. S. Bouhouche, M. Lahreche, A. Moussaoui and J. Bast, „Quality Monitoring Using Principal Component Analysis and Fuzzy Logic. Application în Continuous Casting Process”, American Journal of Applied Science (AJAS), 4(9), ISSN: 1546-9239, 2007, pp.637-644.
46. E. Cocs, „The Fuzzy Systems Handbook”, Amazon, 2002.
47. G. O. Tirian, „Contribuții la identificarea și conducerea proceselor metalurgice” Teză destinată obținerii titlului științific de doctor inginer, Hunedoara 2011.
48. G. Godena, M. Colnaric, „Exception handling for PLC-based process control software”, Microprocessors and Microsystems, Vol. 24, pp. 407-414, 2000.
49. G. Abbel, W. R .L. Moonen, „New developments in continuous casting in Europa”, Proceedings of 3th European Conference in Continuous Casting Madrid 1998.
50. J. Zhenping, J. Yang, „Online dynamic control of secondary cooling for the continuous casting process”, Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS), 2010 3rd International Conference, China, 2010.
51. R. Krob, T. Suddoth, P. Van Gemert, „The Design and implementation of a PLC continuous casting control system”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1993, Conference Record Of The 1993 IEEE.
52. 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.
53. G. O. Tirian, I. Filip, C. Chioncel, „Intelligent system for continuous steel casting based on water flow control in the secondary cooling stage”, MATEC Web of Conference, Barcelona, Spain, 2017.
54. J. Stetina, L. Klimes, T. Mauder, „New challenges in modelling and secondary cooling control of continuous steel casting”, MATEC&2nd ESTEAD2o15, Dusseldorf, Germany, pg.1-8, (2015).
55. 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.
56. K. J. Aström, T. Hägglund, „PID Controllers – Theory, Design and Tuning”, Instrument Society of América, Research Triangle Park, North Carolina 27709, USA, 1995
57. C. A. Gheorghiu, T. Hepuț and E. Popa, „The optimisation of the viscosity of lubricating slags used in the continuous casting of steel”, ICNAAM 2015, Rhodes, Grece, September 2015, (AIP Conf. Proc. 1738, 080004 (2016)), (WOS:000380803300089).
58. C. A. Gheorghiu, E. Ardelean and T. Hepuț , „The influence of chemical composition of the slags on the surface tension used in the continuous casting of steel”, ICNAAM 2015, Rhodes, Grece, September 2015 (AIP Conf. Proc. 1738, 080005 (2016)), (WOS:000380803300090).

59. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, C. P. Chioncel, "New solutions to control water flow in the secondary cooling", 17th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI) Budapest, pp 363-368, HUNGARY, 2016, (WOS:000399130100064).
60. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, C. P. Chioncel, "The influence of cooling parameters on the speed of continuous steel casting", ICAS2017, Romania, International Conference on Applied Sciences, In curs de publicare si indexare ISI.
61. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, C. P. Chioncel, "Cooling water flow control realized with systems based on Fuzzy mechanism", ICAS2017, Romania, International Conference on Applied Sciences, In curs de publicare si indexare ISI.
62. C. A. Gheorghiu, "Study on the influence of continuous casting parameters on the quality of semi-finished products", ACTA TEHNICA CORVINIENSIS – Bulletin of Engineering, Tome VIII [2015] Fascicule 1, pp 101-104, Hunedoara, Romania, January 2015, ISSN: 2067 – 3809, (indexed EBSCO/Google Scholars).
63. C. A. Gheorghiu, "Refining steel in an induction ladle furnace", Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara 13.3 (Aug 2015): 197-200, (indexed EBSCO/Google Scholars).
64. C. A. Gheorghiu and T. Hepuț "Research concerning the influence of the cooling parameters on the speed of the casting in continuous casting of steel, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, pp 123-128, 2016 (indexed EBSCO/Google Scholars).
65. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, "Cooling water flow control with PLC" Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, International Journal of Engineering, Tome XV August 2017 – Fascicule 3, pp 155-158 ISSN: 1584-2665, (indexed EBSCO/Google Scholars).
66. D. I. Trif, C. A. Gheorghiu, V. Alexa and S. Rațiu "Virtual application used to simulate the functionality of engine control unit", MECHEDU 2015, pp 66-69, Subotica, Serbia, May 2015, ISBN 978-86-918815-0-4, (Google Scholars).
67. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, R. Rob, „Fuzzy control strategy for secondary cooling of continuous steel casting”, Innovative Ideas in Science 2016 IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 200 (2017) 012046 doi:10.1088/1757-899X/200/1/012046, (Scopus).
68. G. O. Tirian, C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, C. P. Chioncel, „Control system of water flow and casting speed in continuous steel casting”, Innovative Ideas in Science 2016 IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 200 (2017) 012047 doi:10.1088/1757-899X/200/1/012047, (Scopus).
69. V. Alexa, I. Kiss and C. A. Gheorghiu "The educational practices and e-learning courses in performing the laboratory works specifics to the hydraulics and pneumatics applications", Analecta Technica Szegedinensia Issue 3, pp 10-16, Szeged, Hungary, 2013, ISSN 1788-6392.
70. C. A. Gheorghiu and T. Hepuț "Studiu privind parametrii de influență a turnării continue asupra calității semifabricatelor", pp 1-6, HD-44-STUD, Hunedoara, Romania, May 2014, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, (annals.fih.upt.ro).
71. C. A. Gheorghiu, T. Hepuț, "Controlul debitului apei de racire realizat cu ajutorul unui automat programabil PLC", HD-47-STUD Hunedoara, Romania, 2017, (fih.upt.ro).

ANEXE

Anexa 1**Codul PLC pentru controlul Fuzzy**

PROJECT

VAR Viteza

```
TYPE float
MIN 0.600
MAX 1.700
```

MEMBER Scade

```
POINTS 0.600,1.0 0.600,1.0 1.150,0.0
END
```

MEMBER Mica

```
POINTS 0.600,1.0 0.600,1.0 1.700,0.0
END
```

MEMBER mf5

```
POINTS 1.140,0.0 1.150,1.0 1.150,1.0 1.160,0.0
END
```

MEMBER Mare

```
POINTS 0.600,0.0 1.700,1.0 1.700,1.0
END
```

MEMBER Risc

```
POINTS 1.150,0.0 1.700,1.0 1.700,1.0
END
```

END

VAR Temp

```
TYPE float
MIN 5.00
MAX 70.00
```

MEMBER Mica

```
POINTS 5.00,1.0 5.00,1.0 70.00,0.0
END
```

MEMBER Rece

```
POINTS 5.00,1.0 5.00,1.0 37.50,0.0
END
```

MEMBER mf5

```
POINTS 37.00,0.0 37.50,1.0 37.50,1.0 38.00,0.0
END
```

MEMBER Mare

```
POINTS 5.00,0.0 70.00,1.0 70.00,1.0
```

```
END

MEMBER Risc
POINTS 37.50,0.0 70.00,1.0 70.00,1.0
END
END

VAR Debit
TYPE float
MIN 250.0
MAX 700.0

MEMBER Mic
POINTS 250.0,1.0 250.0,1.0 700.0,0.0
END

MEMBER mf3
POINTS 470.0,0.0 475.0,1.0 475.0,1.0 480.0,0.0
END

MEMBER Mare
POINTS 250.0,0.0 700.0,1.0 700.0,1.0
END
END

VAR Cdebit
TYPE float
MIN -327.0
MAX 327.0
IMPL0 0.000000e+000

MEMBER scade
POINTS -327.0
END

MEMBER mf3
POINTS 0.0
END

MEMBER creste
POINTS 327.0
END
END

VAR Cviteza
TYPE float
MIN -3.240
MAX 3.240
IMPL0 0.000000e+000

MEMBER scade
```

```
    POINTS -3.200
  END
```

```
  MEMBER mf4
    POINTS 0.000
  END
```

```
  MEMBER mf3
    POINTS 1.750
  END
```

```
  MEMBER creste
    POINTS 3.240
  END
END
```

```
VAR Risc
  TYPE float
  MIN 0.0
  MAX 100.0
  IMPL0 0.000000e+000
```

```
  MEMBER mf2
    POINTS 50.0
  END
```

```
  MEMBER creste
    POINTS 100.0
  END
END
```

```
FUZZY ProFuzzy
  RULE Regel_01
    IF (Viteza IS Mica) AND (Temp IS Mica) THEN
      Cviteza = creste
    END
```

```
  RULE Regel_02
    IF (Viteza IS Mare) AND (Temp IS Mare) THEN
      Cviteza = scade
    END
```

```
  RULE Regel_03
    IF (Temp IS Mica) AND (Debit IS Mare) THEN
      Cdebit = scade
    END
```

```
  RULE Regel_04
    IF (Temp IS Mare) AND (Debit IS Mic) THEN
      Cdebit = creste
    END
```

```
RULE Regel_05
  IF (Viteza IS Mare) AND (Temp IS Mare) AND
    (Debit IS Mare) THEN
    Cviteza = scade
  END
RULE Regel_06
  IF (Viteza IS Mica) AND (Temp IS Mare) AND
    (Debit IS Mic) THEN
    Cdebit = creste
  END
RULE Regel_07
  IF (Viteza IS Risc) AND (Temp IS Risc) THEN
    Risc = creste
  END
RULE Regel_08
  IF (Viteza IS Scade) AND (Temp IS Rece) THEN
    Cviteza = mf3
  END
RULE Regel_09
  IF (Viteza IS mf5) AND (Temp IS mf5) AND
    (Debit IS mf3) THEN
    Cdebit = creste
    Cviteza = creste
  END
END
CONNECT
  FROM Viteza
  TO ProFuzzy
END
CONNECT
  FROM Temp
  TO ProFuzzy
END
CONNECT
  FROM Debit
  TO ProFuzzy
END
CONNECT
  FROM ProFuzzy
  TO Cdebit
END
CONNECT
  FROM ProFuzzy
  TO Cviteza
END
CONNECT
  FROM ProFuzzy
  TO Risc
END
END
```

Anexa 2 Programul OB1 în Step 7

OB1 : "Main Program Sweep (Cycle)"

Comment:

```

Network 1: 0 - Manual; 1 - Automat

//citire/formare mod de lucru
A      "xAutomat"          I2.0
=      "Automat"          M0.1          -- 0 - Manual; 1 - Automat
NOT
=      "Parametrii".PID.Manual_ON      DB1.DBX0.0      -- PID: 0 - Automat, 1 - Manual

//formare semnal colorare
ON     "Automat"          M0.1          -- 0 - Manual; 1 - Automat
O(
A      "Sistem_ON"       M0.0          -- 0 - Sistem OFF; 1 - Sistem ON
A      "Automat"         M0.1          -- 0 - Manual; 1 - Automat
)
=      "Colorat"         M0.2          -- Colorare

//pornire pompa in automat
A      "Sistem_ON"       M0.0          -- 0 - Sistem OFF; 1 - Sistem ON
A      "Automat"         M0.1          -- 0 - Manual; 1 - Automat
=      "Cmd_Pompa"      Q0.0

//citire intrare analogica pozitie valva
CALL  "Analog_Read"      FC100
in_iInput := "PIW2"      PIW130
in_rValMax :=1.000000e+001
in_rValMin :=0.000000e+000
in_xBipolar:=FALSE
out_rValMas:="Parametrii".MV_Pozitie_Valva      DB1.DBD22      -- MV pozitie valva

//citire intrare debit
CALL  "Analog_Read"      FC100
in_iInput := "PIW1"      PIW128
in_rValMax :=2.500000e+001
in_rValMin :=0.000000e+000
in_xBipolar:=FALSE
out_rValMas:="Parametrii".MV_Debit      DB1.DBD30      -- Debit masurat

//citire potentiometru
CALL  "Analog_Read"      FC100
in_iInput := "PIW3"      PIW132
in_rValMax :=7.000000e+001
in_rValMin :=0.000000e+000
in_xBipolar:=FALSE
out_rValMas:="Parametrii".SP_Poz_Vana_Manual      DB1.DBD34      -- Debit prescrist

//selectie tip regulator
CALL  "Validare_PID"      FC1
Regulator_P := "Parametrii".PID.Regulator_P      DB1.DBX0.1      -- Regulator P selectat din HMI
Regulator_PI := "Parametrii".PID.Regulator_PI      DB1.DBX0.2      -- Regulator PI selectat din HMI
Regulator_PID:= "Parametrii".PID.Regulator_PID      DB1.DBX0.3      -- Regulator PID selectat din HMI
Valid_P      := "Parametrii".PID.P_Valid      DB1.DBX0.4      -- Validare caracteristica proportionala
Valid_Ti     := "Parametrii".PID.I_Valid      DB1.DBX0.5      -- Validare regulator PI
Valid_Td     := "Parametrii".PID.D_Valid      DB1.DBX0.6      -- Validare regulator PID

//regulator
// CALL "CONT_C" , "PID"
// COM_RST :=
// MAN_ON := "Parametrii".PID.Manual_ON
// PVPER_ON:=
// P_SEL := "Parametrii".PID.P_Valid

// I_SEL := "Parametrii".PID.I_Valid
// INT_HOLD:=
// I_ITL_ON:=
// D_SEL := "Parametrii".PID.D_Valid
// CYCLE :=
// SP_INT :=
// PV_IN := "Parametrii".SP_Debit
// PV_PER :=

// MAN :=
// GAIN :=
// TI :=
// TD :=

```

```

//      TM_LAG :=
//      DEADE_W :=
//      LMN_HLM :=
//      LMN_LLM :=
//      PV_FAC :=
//      PV_OFF :=
//      LMN_FAC :=
//      LMN_OFF :=
//      I_ITLVAL:=
//      DISV :=
//      LMN :=
//      LMN_PER :=
//      QLMN_HLM:=
//      QLMN_LLM:=
//      LMN_P :=
//      LMN_I :=
//      LMN_D :=
//      PV := "Parametrii".SP_Pozitie_Valva
//      ER :=

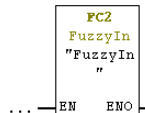
//Afisare comanda vana
//daca e in automat
      AN "Automat"          MO.1      -- 0 - Manual; 1 - Automat
      JC n100

//afiseaza l
      L "Parametrii".SP_Pozitie_Valva      DB1.DBD18      -- SP pozitie valva
      T "SP_Vana"                          MD200
      JU n101
n100: L "Parametrii".SP_Poz_Vana_Manual    DB1.DBD34      -- Debit prescrist
      T "SP_Vana"                          MD200
n101: NOP 0

//comanda vana in mod automat
      CALL "Analog_OUT"                    FC101
      in_rValOut := "Parametrii".SP_Pozitie_Valva      DB1.DBD18      -- SP pozitie valva
      in_rValMax :=1.000000e+001
      in_rValMin :=0.000000e+000
      in_xBipolar :=FALSE
      out_iCanalOut:="PQM1"                PQM128

```

□ Network 2 : Title:



Anexa 3

Variabilele folosite în Step 7

| | | | | |
|-------|--------------------|------|---------------|---------------------------|
| +18.0 | SP_Pozitie_Valva | REAL | 0.000000e+000 | SP pozitie valva |
| +22.0 | MV_Pozitie_Valva | REAL | 0.000000e+000 | MV pozitie valva |
| +26.0 | SP_Debit | REAL | 0.000000e+000 | Set point-ul pentru debit |
| +30.0 | MV_Debit | REAL | 0.000000e+000 | Debit masurat |
| +34.0 | SP_Poz_Vana_Manual | REAL | 0.000000e+000 | Debit prescrist |
| +38.0 | Scriere_vana | REAL | 0.000000e+000 | Scriere Vana |
| +42.0 | Zona2 | REAL | 0.000000e+000 | Debit Zona 2 |
| +46.0 | Zona3 | REAL | 0.000000e+000 | Debit Zona 3 |
| +50.0 | Vana22 | REAL | 0.000000e+000 | Vana zona 2 |
| +54.0 | Vana23 | REAL | 0.000000e+000 | Vana zona 3 |
| +58.0 | Viteza_turnare | REAL | 0.000000e+000 | Viteza turnare |
| +62.0 | Dif_temperatura | REAL | 0.000000e+000 | Diferenta de temperatura |
| +66.0 | Viteza180 | REAL | 0.000000e+000 | Viteza de turnare 180 |
| +70.0 | Viteza200 | REAL | 0.000000e+000 | Viteza de turnare 200 |
| +74.0 | Viteza250 | REAL | 0.000000e+000 | Viteza de turnare 250 |
| +78.0 | Vana180Z1 | REAL | 0.000000e+000 | Comanda vana 180 |
| +82.0 | Vana180Z2 | REAL | 0.000000e+000 | Comanda vana 200 |
| +86.0 | Vana180Z3 | REAL | 0.000000e+000 | Comanda vana 250 |

| | | | | |
|--------|------------|------------|---------------|-------------------------|
| +90.0 | Debit180Z1 | REAL | 0.000000e+000 | Debit zona 1 180 |
| +94.0 | Debit180Z2 | REAL | 0.000000e+000 | Debit zona 2 180 |
| +98.0 | Debit180Z3 | REAL | 0.000000e+000 | Debit zona 3 180 |
| +102.0 | Vana200Z1 | REAL | 0.000000e+000 | Comanda Vaza Zona 1 200 |
| +106.0 | Vana200Z2 | REAL | 0.000000e+000 | Comanda Vaza Zona 2 200 |
| +110.0 | Vana200Z3 | REAL | 0.000000e+000 | Comanda Vaza Zona 3 200 |
| +114.0 | Debit200Z1 | REAL | 0.000000e+000 | Debit zona 1 200 |
| +118.0 | Debit200Z2 | REAL | 0.000000e+000 | Debit zona 2 200 |
| +122.0 | Debit200Z3 | REAL | 0.000000e+000 | Debit zona 3 200 |
| +126.0 | Debit250Z1 | REAL | 0.000000e+000 | Debit zona 1 250 |
| +130.0 | Debit250Z2 | REAL | 0.000000e+000 | Debit zona 2 250 |
| +134.0 | Debit250Z3 | REAL | 0.000000e+000 | Debit zona 3 250 |
| =138.0 | | END_STRUCT | | |

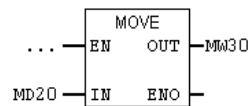
Anexa 4

Programul FC2 în Step 7

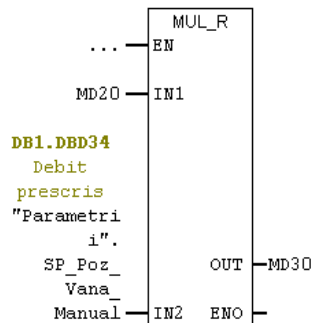
FC2 : Title:

Viteza turnare 0,6 - 1.7 m/minut

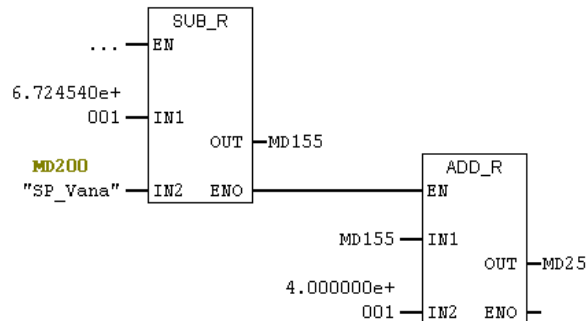
Network 1: Title:



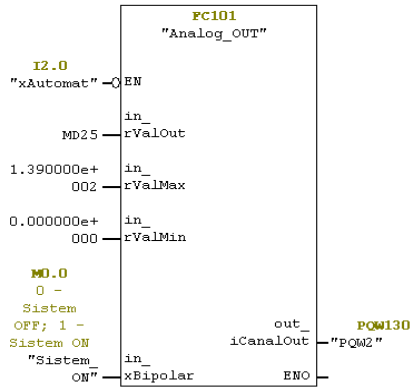
Network 2: Title:



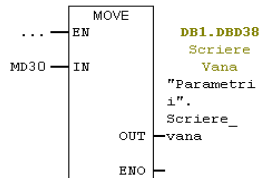
Network 3: Title:



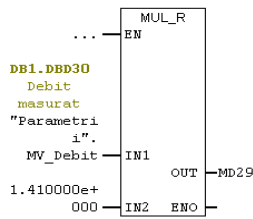
Network 4 : Title:



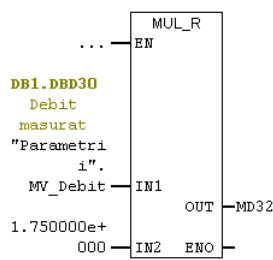
Network 5 : Title:



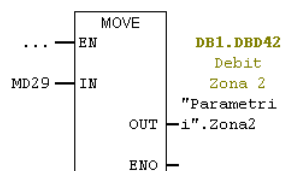
Network 6 : Title:



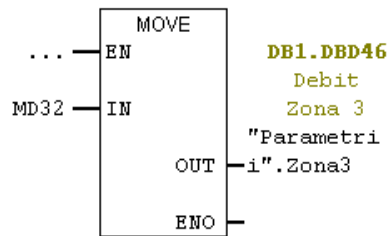
Network 7 : Title:



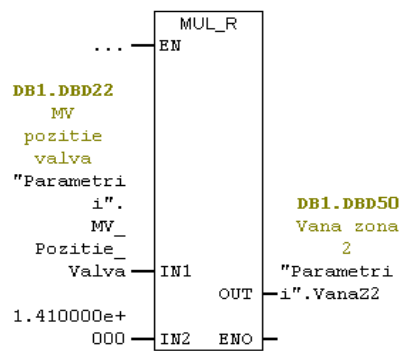
Network 8 : Title:



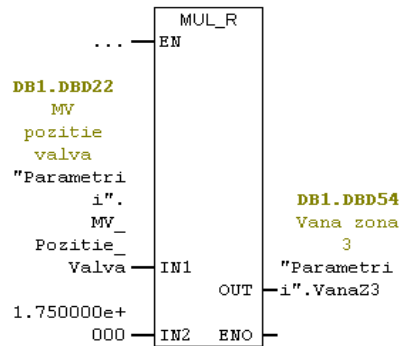
Network 9 : Title:



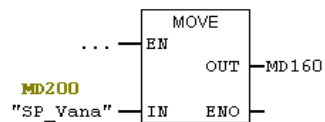
Network 10 : Title:



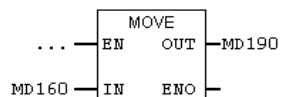
Network 11 : Title:



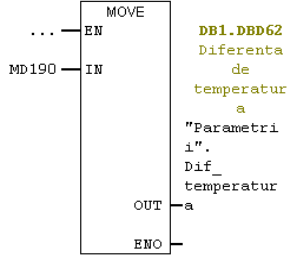
Network 12 : Title:



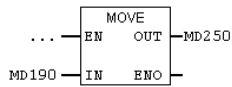
Network 13 : Title:



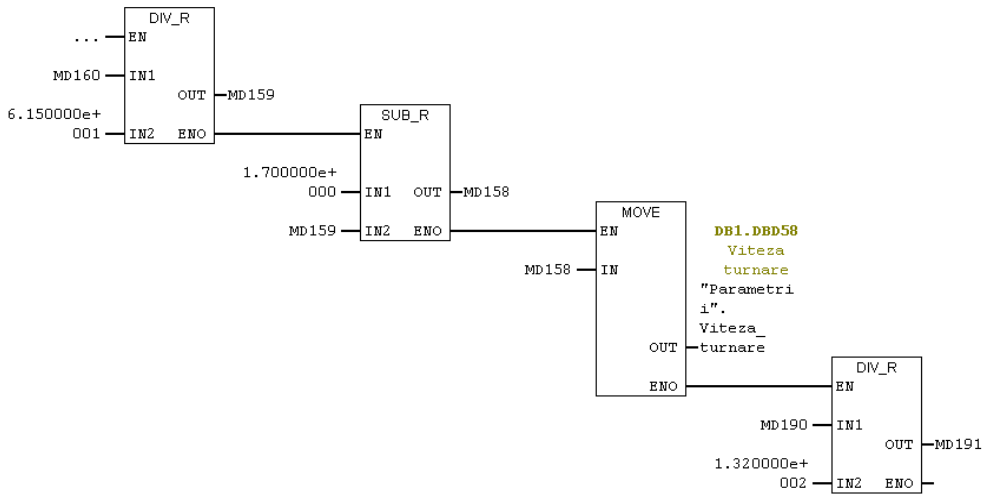
Network 14 : Title:



Network 15 : Title:

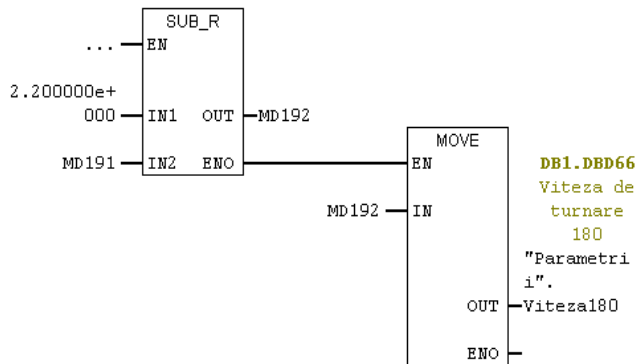


Network 16 : Title:



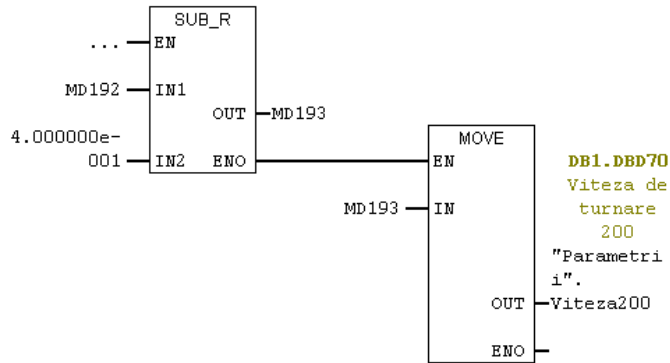
Network 17 : Title:

Viteza turnare 180 1.7-2.2 m/min



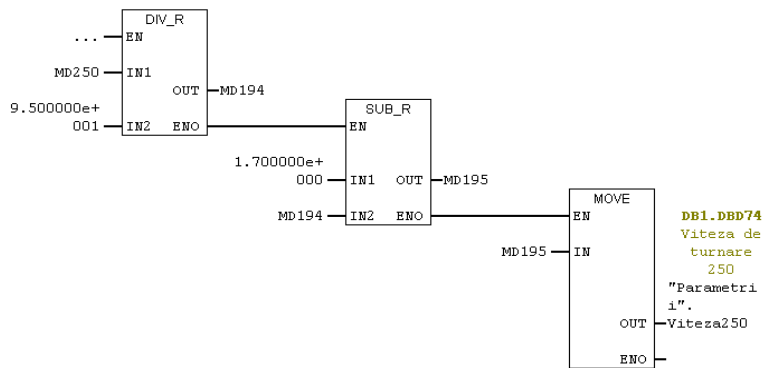
Network 18 : Title:

Viteza turnare 200 1.3-1.8 m/min



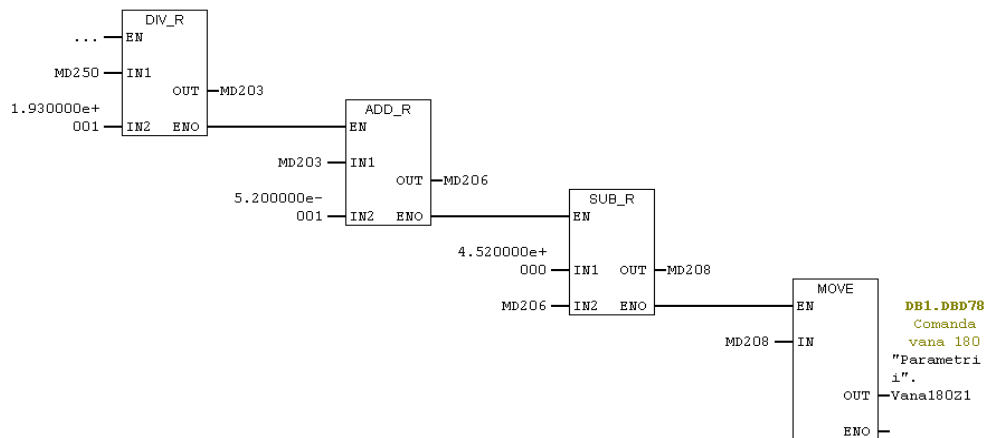
Network 19 : Title:

Viteza turnare 250 1-1.7 m/min

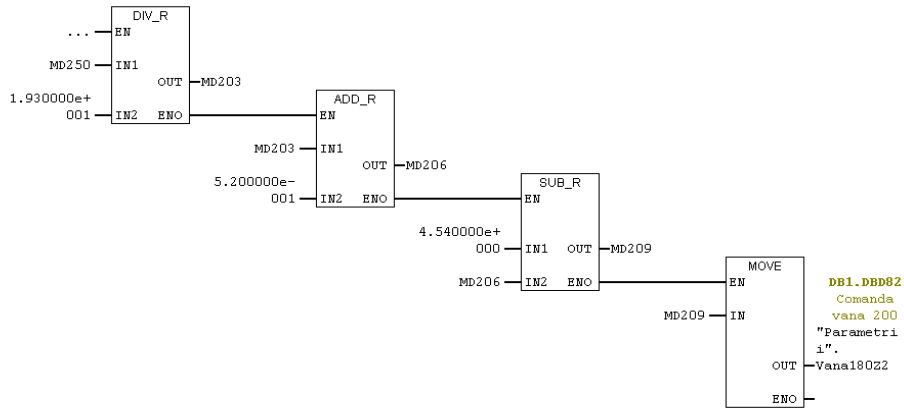


Network 20 : Title:

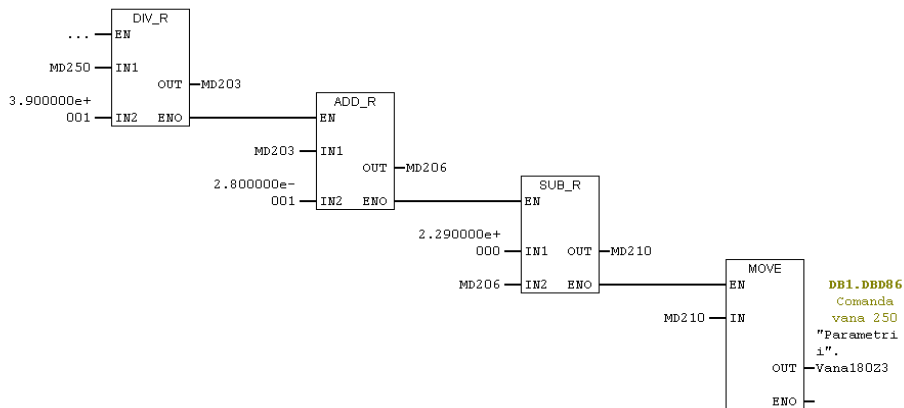
Pozitie vana 180



Network 21 : Title:

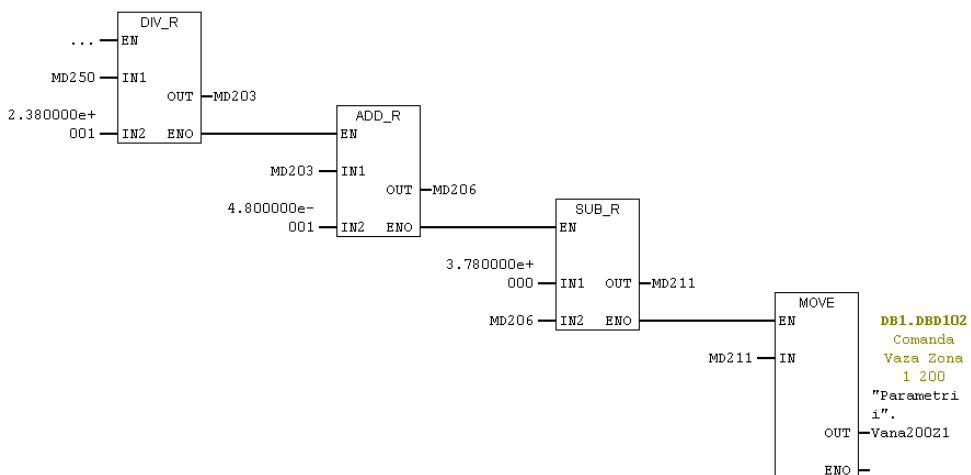


Network 22 : Title:

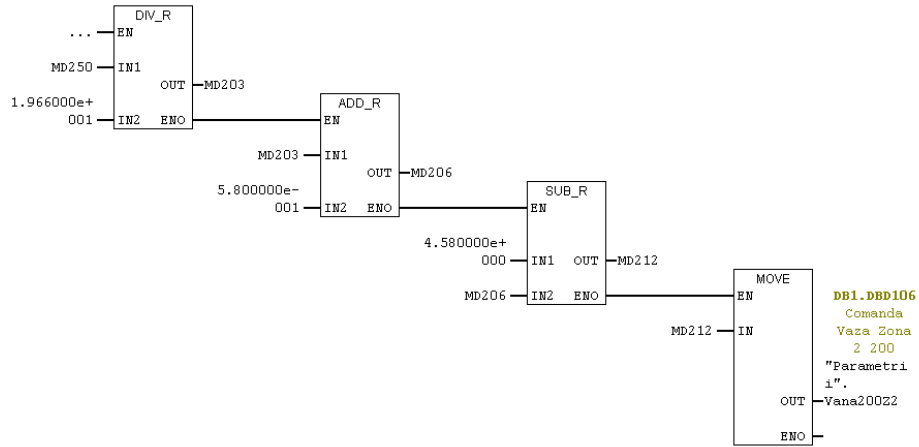


Network 23 : Title:

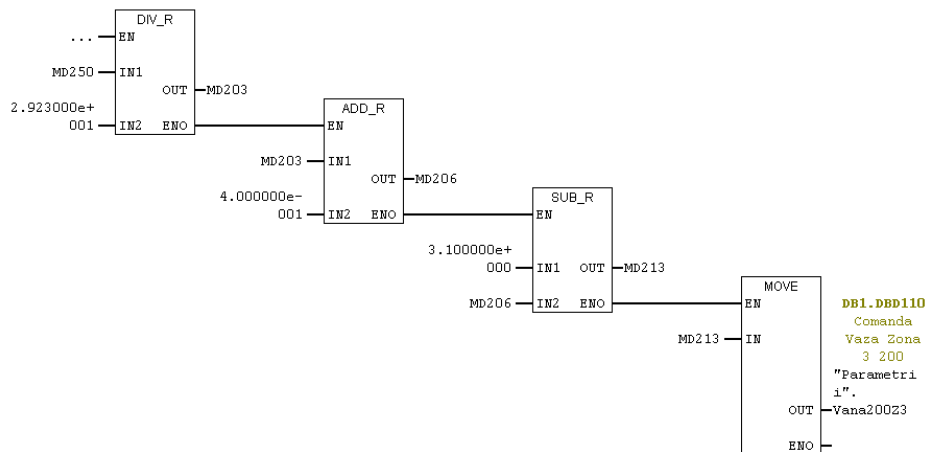
Pozitie vana 250



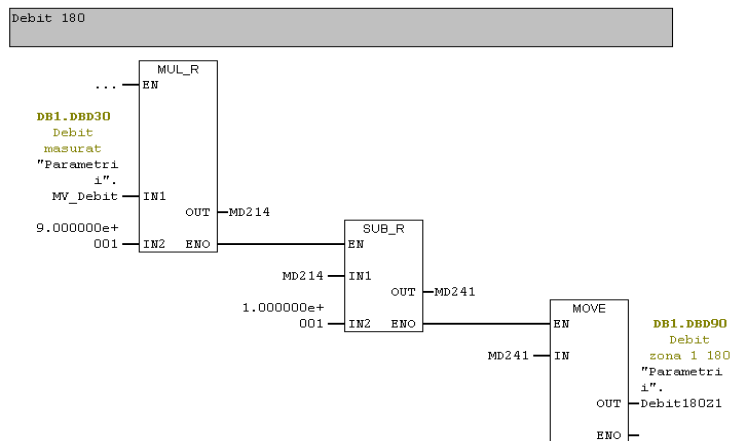
Network 24 : Title:



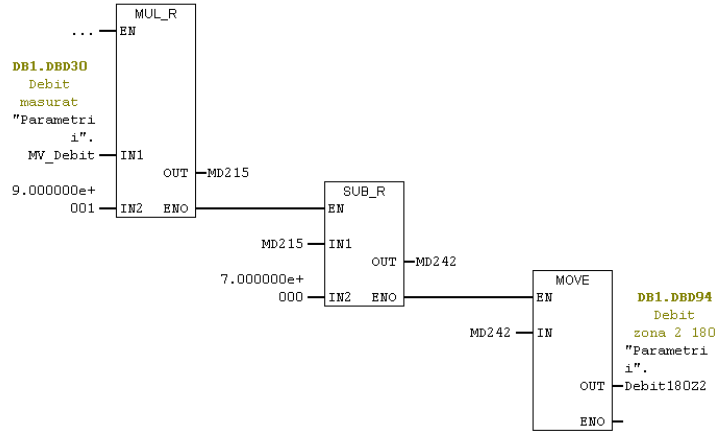
Network 25 : Title:



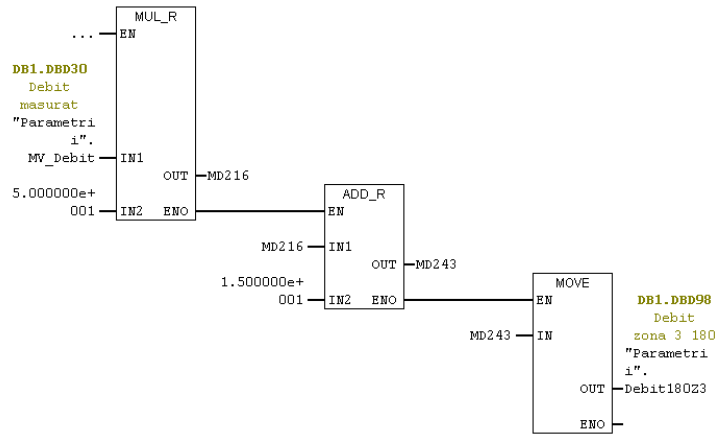
Network 26 : Title:



□ Network 27: Title:

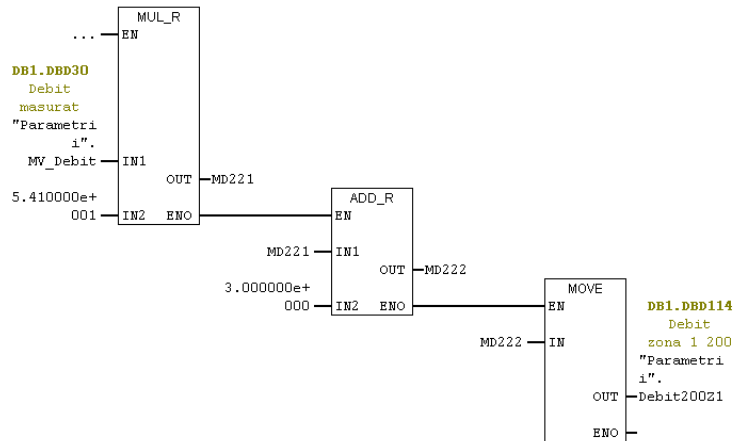


□ Network 28: Title:

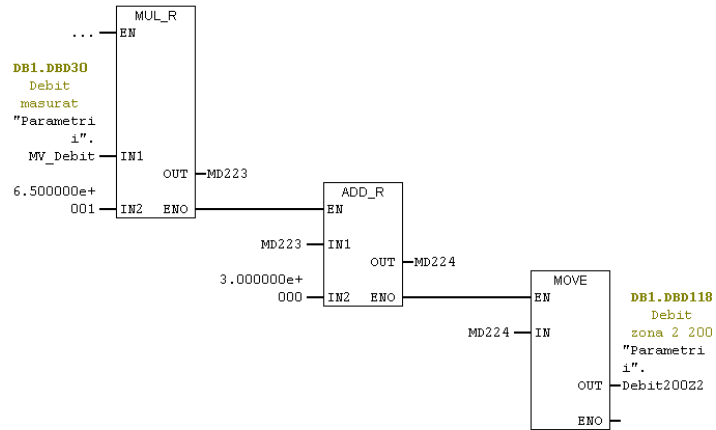


□ Network 29: Title:

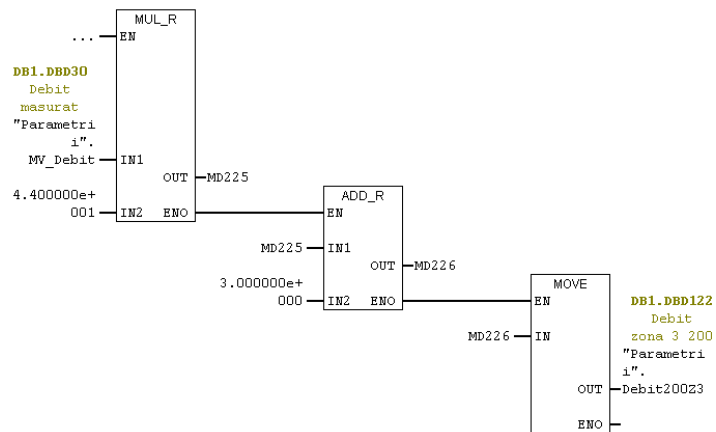
Debit 200



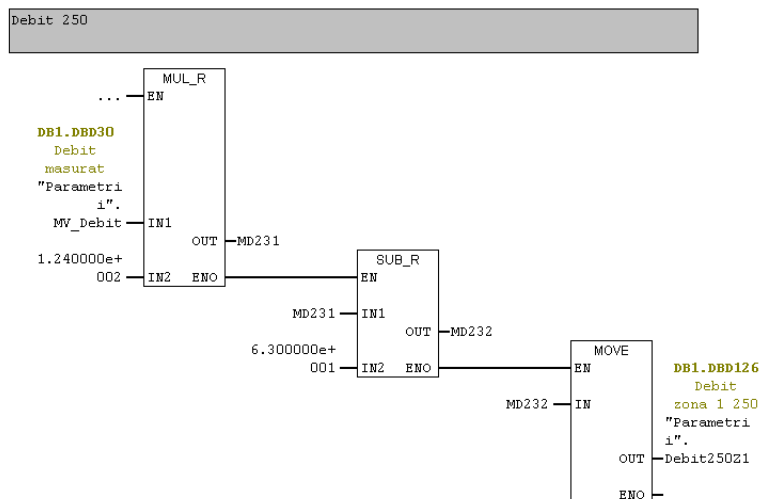
Network 30 : Title:

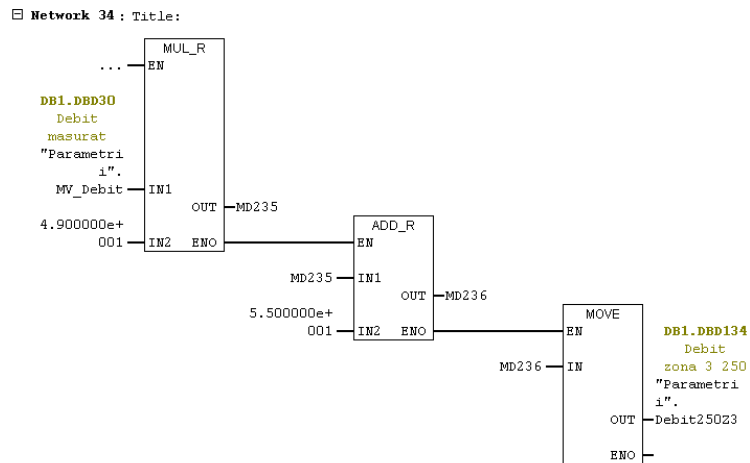
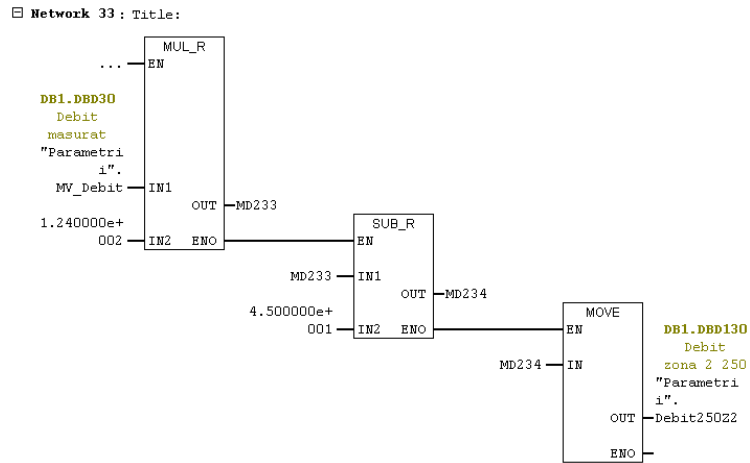


Network 31 : Title:



Network 32 : Title:





Anexa 5

Variabilele folosite în WinCC

| Name | Data type | Length | Format adaptation | Connection | Group | Address |
|------|----------------|---------------------------------------|-------------------|--------------|---------------|-----------|
| 1 | Debit180Z1 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD90 |
| 2 | Debit180Z2 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD94 |
| 3 | Debit180Z3 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD98 |
| 4 | Debit200Z1 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD114 |
| 5 | Debit200Z2 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD118 |
| 6 | Debit200Z3 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD122 |
| 7 | Debit250Z1 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD126 |
| 8 | Debit250Z2 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD130 |
| 9 | Debit250Z3 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD134 |
| 10 | Scriere_vana | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD38 |
| 11 | Vana180Z1 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD78 |
| 12 | Vana180Z2 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD82 |
| 13 | Vana180Z3 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD86 |
| 14 | Vana200Z1 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD102 |
| 15 | Vana200Z2 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD106 |
| 16 | Vana200Z3 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD110 |
| 17 | Vana22 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD50 |
| 18 | Vana23 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD54 |
| 19 | Vit_introdusa | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | MD25 |
| 20 | Viteza_turnare | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD58 |
| 21 | Viteza180 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD66 |
| 22 | Viteza200 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD70 |
| 23 | Viteza250 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD74 |
| 24 | Zona2 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD42 |
| 25 | Zona3 | Floating-point number 32-bit IEEE 754 | 4 | FloatToFloat | Reglaj_viteza | DB1_DD46 |

Anexa 6**Date simulare condiții de laborator**

| Dif. de temp. | Vit. de turnare | Vana Z1 | Vana Z2 | Vana Z3 | Debit Z1 | Debit Z2 | Debit Z3 |
|----------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 67.2859 | 0.6000 | 5.8218 | 8.2168 | 10.1982 | 3.9063 | 5.5078 | 6.8359 |
| 67.2859 | 0.6000 | 5.8275 | 8.2168 | 10.1982 | 3.8918 | 5.4873 | 6.8106 |
| 67.2454 | 0.6000 | 5.8275 | 8.2168 | 10.1982 | 3.9063 | 5.5078 | 6.8359 |
| 64.0856 | 0.6000 | 5.7176 | 8.0700 | 10.0159 | 3.8339 | 5.4058 | 6.7093 |
| 62.9919 | 0.6500 | 5.8681 | 8.2740 | 10.2691 | 3.8050 | 5.3650 | 6.6587 |
| 61.2905 | 0.6500 | 5.7986 | 8.1679 | 10.1374 | 3.8484 | 5.4262 | 6.7347 |
| 60.0752 | 0.6500 | 5.7350 | 8.1271 | 10.0868 | 3.8484 | 5.4262 | 6.7347 |
| 59.6701 | 0.7000 | 5.9491 | 8.3882 | 10.4109 | 3.8628 | 5.4466 | 6.7600 |
| 58.1308 | 0.7000 | 5.8912 | 8.3066 | 10.3096 | 3.9207 | 5.5078 | 6.8359 |
| 56.9155 | 0.7000 | 5.8044 | 8.1760 | 10.1476 | 3.8918 | 5.4873 | 6.8106 |
| 55.9433 | 0.7500 | 5.8738 | 8.2495 | 10.2387 | 3.8484 | 5.4262 | 6.7347 |
| 55.1331 | 0.7500 | 5.9086 | 8.3229 | 10.3299 | 3.8918 | 5.4873 | 6.8106 |
| 53.7153 | 0.7500 | 5.8275 | 8.2087 | 10.1881 | 3.9207 | 5.5282 | 6.8613 |
| 52.9861 | 0.7500 | 5.8044 | 8.1760 | 10.1476 | 3.8918 | 5.4873 | 6.8106 |
| 52.1759 | 0.7500 | 5.7639 | 8.1271 | 10.0868 | 3.8484 | 5.4262 | 6.7347 |
| 51.8924 | 0.7500 | 5.7292 | 8.0781 | 10.0260 | 3.8194 | 5.3854 | 6.6840 |
| 51.2847 | 0.8000 | 5.8912 | 8.3066 | 10.3096 | 3.7905 | 5.3446 | 6.6334 |
| 50.2720 | 0.8000 | 5.8160 | 8.1924 | 10.1678 | 3.8339 | 5.4058 | 6.7093 |
| 49.4618 | 0.8000 | 5.7813 | 8.1597 | 10.1273 | 3.8773 | 5.4669 | 6.7853 |
| 47.7199 | 0.8000 | 5.7002 | 8.0373 | 9.9754 | 3.8339 | 5.4058 | 6.7093 |
| 47.1933 | 0.8500 | 5.8333 | 8.2332 | 10.2185 | 3.7760 | 5.3242 | 6.6081 |
| 45.5729 | 0.8500 | 5.7407 | 8.0944 | 10.0463 | 3.7760 | 5.3242 | 6.6081 |
| 44.9248 | 0.9000 | 5.8218 | 8.1760 | 10.1476 | 3.7760 | 5.3242 | 6.6081 |
| 43.5880 | 0.9000 | 5.7639 | 8.1271 | 10.0868 | 3.7616 | 5.3037 | 6.5828 |
| 42.8183 | 0.9000 | 5.6829 | 8.0455 | 9.9855 | 3.7760 | 5.3242 | 6.6081 |
| 41.6840 | 0.9000 | 5.6192 | 7.9639 | 9.8843 | 3.7326 | 5.2630 | 6.5321 |
| 40.7118 | 0.9000 | 5.5903 | 7.8905 | 9.7931 | 3.6603 | 5.1610 | 6.4055 |
| 40.0637 | 0.9500 | 5.5266 | 7.8007 | 9.6817 | 3.6169 | 5.0998 | 6.3296 |
| 38.4433 | 0.9500 | 5.5556 | 7.8497 | 9.7425 | 3.6169 | 5.0998 | 6.3296 |
| 37.3900 | 0.9500 | 5.4861 | 7.7436 | 9.6108 | 3.5301 | 4.9774 | 6.1777 |
| 35.8912 | 0.9500 | 5.3993 | 7.6130 | 9.4488 | 3.4722 | 4.8958 | 6.0764 |
| 35.5266 | 1.0000 | 5.5093 | 7.7681 | 9.6412 | 3.4288 | 4.8346 | 6.0004 |
| 35.0810 | 1.0000 | 5.4803 | 7.7273 | 9.5906 | 3.4578 | 4.8754 | 6.0511 |
| 35.0405 | 1.0000 | 5.4398 | 7.6783 | 9.5298 | 3.4433 | 4.8550 | 6.0258 |
| 35.0000 | 1.0500 | 5.5845 | 7.8741 | 9.7729 | 3.4578 | 4.8754 | 6.0511 |
| 34.9595 | 1.0500 | 5.5845 | 7.8741 | 9.7729 | 3.4722 | 4.8958 | 6.0764 |
| 34.9595 | 1.0500 | 5.5787 | 7.8741 | 9.7729 | 3.5301 | 4.9774 | 6.1777 |
| 36.0127 | 1.0500 | 5.6424 | 7.9639 | 9.8843 | 3.5301 | 4.9774 | 6.1777 |
| 36.8229 | 1.0500 | 5.7060 | 8.0618 | 10.0058 | 3.6314 | 5.1201 | 6.3549 |
| 37.2280 | 1.0500 | 5.7407 | 8.0944 | 10.0463 | 3.7037 | 5.2222 | 6.4815 |
| 37.8762 | 1.0500 | 5.7755 | 8.1434 | 10.1071 | 3.7471 | 5.2834 | 6.5574 |
| 38.4838 | 1.0000 | 5.7870 | 8.1924 | 10.1678 | 3.7905 | 5.3446 | 6.6334 |
| 39.6181 | 1.0000 | 5.7870 | 8.1679 | 10.1374 | 3.7905 | 5.3446 | 6.6334 |
| 40.7523 | 1.0000 | 5.8449 | 8.2413 | 10.2286 | 3.7905 | 5.3446 | 6.6334 |
| 41.1979 | 1.0000 | 5.8796 | 8.2903 | 10.2894 | 3.8050 | 5.3650 | 6.6587 |
| 42.0891 | 0.9500 | 5.8565 | 8.2903 | 10.2894 | 3.8918 | 5.4873 | 6.8106 |
| 42.9803 | 0.9500 | 5.8854 | 8.2821 | 10.2792 | 3.8628 | 5.4466 | 6.7600 |
| 45.8565 | 0.9000 | 6.0012 | 8.5269 | 10.5830 | 3.9352 | 5.5282 | 6.8613 |
| 46.7477 | 0.9000 | 5.9433 | 8.3800 | 10.4008 | 3.9641 | 5.5894 | 6.9372 |
| 48.2060 | 0.9000 | 6.0475 | 8.5269 | 10.5830 | 3.9786 | 5.6098 | 6.9625 |
| 49.8264 | 0.9000 | 6.1516 | 8.6738 | 10.7653 | 3.9931 | 5.6302 | 6.9878 |
| 50.3125 | 0.8500 | 6.0012 | 8.4616 | 10.5020 | 4.0509 | 5.7118 | 7.0891 |

| | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 49.2188 | 0.8500 | 5.9491 | 8.4290 | 10.4615 | 4.1088 | 5.7934 | 7.1904 |
| 47.9225 | 0.8500 | 5.8449 | 8.3148 | 10.3197 | 4.0220 | 5.6709 | 7.0385 |
| 47.0718 | 0.8500 | 5.8102 | 8.1924 | 10.1678 | 3.9786 | 5.6098 | 6.9625 |
| 46.2211 | 0.8500 | 5.7523 | 8.1108 | 10.0666 | 3.8918 | 5.4873 | 6.8106 |
| 45.6539 | 0.9000 | 5.8854 | 8.2903 | 10.2894 | 3.8484 | 5.4262 | 6.7347 |
| 44.3981 | 0.9000 | 5.7928 | 8.1679 | 10.1374 | 3.8773 | 5.4669 | 6.7853 |
| 43.5069 | 0.9000 | 5.7639 | 8.1189 | 10.0767 | 3.8484 | 5.4262 | 6.7347 |
| 41.5625 | 0.9000 | 5.6366 | 7.9476 | 9.8640 | 3.7326 | 5.2630 | 6.5321 |
| 40.9954 | 0.9500 | 5.7234 | 8.0944 | 10.0463 | 3.7182 | 5.2426 | 6.5068 |
| 39.6181 | 0.9500 | 5.6597 | 7.9720 | 9.8944 | 3.7326 | 5.2630 | 6.5321 |
| 38.1192 | 0.9500 | 5.5382 | 7.8089 | 9.6918 | 3.6748 | 5.1814 | 6.4308 |
| 36.0127 | 0.9500 | 5.3762 | 7.6212 | 9.4589 | 3.5446 | 4.9978 | 6.2030 |
| 34.3924 | 1.0000 | 5.4109 | 7.6293 | 9.4690 | 3.4578 | 4.8754 | 6.0511 |
| 33.6632 | 1.0000 | 5.3472 | 7.5396 | 9.3576 | 3.3854 | 4.7735 | 5.9245 |
| 32.8530 | 1.0000 | 5.3009 | 7.4743 | 9.2766 | 3.3565 | 4.7326 | 5.8738 |
| 32.3669 | 1.0000 | 5.2604 | 7.4172 | 9.2057 | 3.2986 | 4.6510 | 5.7726 |
| 31.9213 | 1.0000 | 5.2199 | 7.3601 | 9.1348 | 3.2552 | 4.5899 | 5.6966 |
| 30.9896 | 1.0000 | 5.1678 | 7.2785 | 9.0336 | 3.2118 | 4.5286 | 5.6207 |
| 29.8958 | 1.1000 | 5.2951 | 7.5069 | 9.3171 | 3.1684 | 4.4674 | 5.5447 |
| 28.8426 | 1.1000 | 5.2199 | 7.3601 | 9.1348 | 3.2118 | 4.5286 | 5.6207 |
| 27.4653 | 1.1000 | 5.1273 | 7.2214 | 8.9627 | 3.1539 | 4.4471 | 5.5194 |
| 26.2095 | 1.1500 | 5.1100 | 7.2132 | 8.9525 | 3.0816 | 4.3450 | 5.3928 |
| 25.1563 | 1.1500 | 5.0058 | 7.0663 | 8.7703 | 3.0816 | 4.3450 | 5.3928 |
| 23.6574 | 1.1500 | 4.9074 | 6.9113 | 8.5778 | 2.9514 | 4.1614 | 5.1649 |
| 23.0093 | 1.2000 | 4.9132 | 6.9602 | 8.6386 | 2.8501 | 4.0186 | 4.9877 |
| 21.4294 | 1.2000 | 4.7859 | 6.7562 | 8.3854 | 2.7778 | 3.9166 | 4.8611 |
| 19.3229 | 1.2500 | 4.6528 | 6.5686 | 8.1525 | 2.6765 | 3.7739 | 4.6839 |
| 16.9734 | 1.2500 | 4.4560 | 6.3238 | 7.8487 | 2.5608 | 3.6107 | 4.4813 |
| 16.9734 | 1.3000 | 4.5197 | 6.3727 | 7.9094 | 2.4306 | 3.4271 | 4.2535 |
| 16.9734 | 1.3000 | 4.5197 | 6.3727 | 7.9094 | 2.4161 | 3.3862 | 4.2028 |
| 15.6366 | 1.3000 | 4.3808 | 6.1606 | 7.6461 | 2.4306 | 3.4271 | 4.2535 |
| 15.3530 | 1.3500 | 4.4213 | 6.2422 | 7.7474 | 2.3582 | 3.3251 | 4.1269 |
| 14.7454 | 1.3500 | 4.3634 | 6.1524 | 7.6360 | 2.3293 | 3.2843 | 4.0762 |
| 14.3808 | 1.3500 | 4.3461 | 6.1606 | 7.6461 | 2.3148 | 3.2639 | 4.0509 |
| 13.1655 | 1.4000 | 4.1956 | 5.9648 | 7.4031 | 2.2714 | 3.2027 | 3.9750 |
| 13.0440 | 1.4000 | 4.2419 | 5.9811 | 7.4233 | 2.2280 | 3.1415 | 3.8990 |
| 11.8287 | 1.4000 | 4.1146 | 5.7934 | 7.1904 | 2.1991 | 3.1007 | 3.8484 |
| 11.0185 | 1.4000 | 4.0394 | 5.7281 | 7.1094 | 2.0978 | 2.9579 | 3.6712 |
| 10.7755 | 1.4500 | 4.0625 | 5.6792 | 7.0486 | 2.0255 | 2.8559 | 3.5446 |
| 9.7222 | 1.4500 | 3.9468 | 5.5568 | 6.8967 | 1.9821 | 2.7947 | 3.4686 |
| 9.5197 | 1.5000 | 3.9178 | 5.5160 | 6.8461 | 1.9531 | 2.7539 | 3.4180 |
| 9.5197 | 1.5000 | 3.9468 | 5.5649 | 6.9068 | 1.8953 | 2.6723 | 3.3167 |
| 8.4664 | 1.5000 | 3.8079 | 5.4099 | 6.7144 | 1.8663 | 2.6315 | 3.2661 |
| 8.2234 | 1.5500 | 3.8426 | 5.4181 | 6.7245 | 1.8519 | 2.6111 | 3.2407 |
| 7.4537 | 1.5500 | 3.7616 | 5.3038 | 6.5828 | 1.8084 | 2.5499 | 3.1648 |
| 7.0486 | 1.5500 | 3.7153 | 5.2467 | 6.5119 | 1.7506 | 2.4683 | 3.0635 |
| 6.4815 | 1.6000 | 3.6458 | 5.1406 | 6.3802 | 1.6927 | 2.3867 | 2.9622 |
| 5.3877 | 1.6000 | 3.5243 | 4.9938 | 6.1979 | 1.6348 | 2.3051 | 2.8610 |
| 3.6863 | 1.6000 | 3.3391 | 4.7326 | 5.8738 | 1.5480 | 2.1827 | 2.7091 |
| 2.5926 | 1.6000 | 3.2176 | 4.5694 | 5.6713 | 1.4323 | 2.0195 | 2.5065 |
| 2.4711 | 1.6500 | 3.2060 | 4.5205 | 5.6105 | 1.3310 | 1.8767 | 2.3293 |
| 1.5799 | 1.6500 | 3.1019 | 4.3818 | 5.4384 | 1.2731 | 1.7951 | 2.2280 |
| 1.5799 | 1.6500 | 3.1019 | 4.3736 | 5.4282 | 1.2153 | 1.7135 | 2.1267 |
| 0.2431 | 1.7000 | 2.9572 | 4.2023 | 5.2156 | 1.1719 | 1.6524 | 2.0508 |
| 0.2431 | 1.7000 | 2.9456 | 4.1533 | 5.1548 | 1.0995 | 1.5503 | 1.9242 |
| 0.0810 | 1.7000 | 2.9456 | 4.1533 | 5.1548 | 1.0417 | 1.4687 | 1.8229 |

Anexa 7**Date sistem Fuzzy ϕ 180 mm**

| Dif. de temp. | Vit. de turnare | Vana Z1 | Vana Z2 | Vana Z3 | Debit Z1 | Debit Z2 | Debit Z3 |
|----------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 67.2049 | 1.6912 | 0.5200 | 0.5400 | 0.2878 | 64.9132 | 79.8438 | 82.8438 |
| 67.1644 | 1.7108 | 0.6438 | 0.6638 | 0.3491 | 67.0833 | 83.7500 | 86.7500 |
| 65.0984 | 1.7338 | 0.8075 | 0.8275 | 0.4301 | 75.0405 | 98.0729 | 101.0729 |
| 63.0729 | 1.7394 | 0.8474 | 0.8674 | 0.4499 | 75.7639 | 99.3750 | 102.3750 |
| 61.7361 | 1.7461 | 0.8957 | 0.9157 | 0.4738 | 81.5509 | 109.7917 | 112.7917 |
| 60.6829 | 1.7519 | 0.9356 | 0.9556 | 0.4935 | 82.9977 | 112.3958 | 115.3958 |
| 59.6701 | 1.7682 | 1.0468 | 1.0668 | 0.5486 | 89.5081 | 124.1146 | 127.1146 |
| 58.9815 | 1.7710 | 1.0657 | 1.0857 | 0.5579 | 90.9549 | 126.7188 | 129.7188 |
| 56.8750 | 1.7814 | 1.1371 | 1.1571 | 0.5932 | 96.0185 | 135.8333 | 138.8333 |
| 56.1053 | 1.8007 | 1.2672 | 1.2872 | 0.6576 | 105.4225 | 152.7604 | 155.7604 |
| 54.0394 | 1.8014 | 1.2756 | 1.2956 | 0.6618 | 106.1458 | 154.0625 | 157.0625 |
| 53.3507 | 1.8112 | 1.3407 | 1.3607 | 0.6940 | 110.4861 | 161.8750 | 164.8750 |
| 52.4190 | 1.8207 | 1.4015 | 1.4215 | 0.7241 | 113.3796 | 167.0833 | 170.0833 |
| 51.3657 | 1.8219 | 1.4141 | 1.4341 | 0.7303 | 117.7199 | 176.1979 | 179.1979 |
| 49.9884 | 1.8222 | 1.4162 | 1.4362 | 0.7314 | 119.1667 | 177.5000 | 180.5000 |
| 49.9074 | 1.8262 | 1.4435 | 1.4635 | 0.7449 | 119.8900 | 178.8021 | 181.8021 |
| 49.6238 | 1.8419 | 1.5506 | 1.5706 | 0.7978 | 125.6771 | 189.2188 | 192.2188 |
| 49.0162 | 1.8452 | 1.5736 | 1.5936 | 0.8093 | 126.4005 | 190.5208 | 193.5208 |
| 47.5579 | 1.8581 | 1.6597 | 1.6797 | 0.8519 | 132.9109 | 202.2396 | 205.2396 |
| 46.7477 | 1.8618 | 1.6786 | 1.6986 | 0.8612 | 135.0810 | 206.1458 | 209.1458 |
| 45.5324 | 1.8707 | 1.7458 | 1.7658 | 0.8944 | 138.6979 | 212.6563 | 215.6563 |
| 44.7627 | 1.8753 | 1.7751 | 1.7951 | 0.9090 | 140.8681 | 216.5625 | 219.5625 |
| 43.5069 | 1.8814 | 1.8213 | 1.8413 | 0.9318 | 143.7616 | 221.7708 | 224.7708 |
| 42.6563 | 1.8980 | 1.9347 | 1.9547 | 0.9879 | 148.8252 | 230.8854 | 233.8854 |
| 41.9676 | 1.9005 | 1.9514 | 1.9714 | 0.9962 | 151.7188 | 236.0938 | 239.0938 |
| 40.6713 | 1.9134 | 2.0396 | 2.0596 | 1.0399 | 156.0590 | 243.9063 | 246.9063 |
| 39.8611 | 1.9174 | 2.0669 | 2.0869 | 1.0534 | 158.2292 | 247.8125 | 250.8125 |
| 38.6458 | 1.9281 | 2.1320 | 2.1520 | 1.0856 | 165.4630 | 260.8333 | 263.8333 |
| 37.3495 | 1.9364 | 2.1907 | 2.2107 | 1.1146 | 166.9097 | 263.4375 | 266.4375 |
| 36.5799 | 1.9364 | 2.1970 | 2.2170 | 1.1178 | 171.2500 | 271.2500 | 274.2500 |
| 34.9595 | 1.9290 | 2.1466 | 2.1666 | 1.0928 | 173.4201 | 275.1563 | 278.1563 |
| 34.7975 | 1.9269 | 2.1320 | 2.1520 | 1.0856 | 172.6968 | 273.8542 | 276.8542 |
| 34.8785 | 1.9207 | 2.0900 | 2.1100 | 1.0648 | 170.5266 | 269.9479 | 272.9479 |
| 35.6076 | 1.9180 | 2.0711 | 2.0911 | 1.0554 | 167.6331 | 264.7396 | 267.7396 |
| 36.2558 | 1.9091 | 2.0102 | 2.0302 | 1.0253 | 164.0162 | 258.2292 | 261.2292 |
| 36.8634 | 1.9078 | 2.0018 | 2.0218 | 1.0212 | 162.5694 | 255.6250 | 258.6250 |
| 37.4306 | 1.9045 | 1.9787 | 1.9987 | 1.0097 | 160.3993 | 251.7188 | 254.7188 |
| 38.4838 | 1.8888 | 1.8717 | 1.8917 | 0.9568 | 154.6123 | 241.3021 | 244.3021 |
| 38.7674 | 1.8870 | 1.8612 | 1.8812 | 0.9516 | 153.1655 | 238.6979 | 241.6979 |
| 39.4965 | 1.8821 | 1.8255 | 1.8455 | 0.9339 | 150.2720 | 234.7917 | 237.7917 |
| 40.7928 | 1.8670 | 1.7227 | 1.7427 | 0.8830 | 148.1019 | 229.5833 | 232.5833 |
| 41.3194 | 1.8630 | 1.6954 | 1.7154 | 0.8695 | 141.5914 | 217.8646 | 220.8646 |
| 41.9676 | 1.8609 | 1.6807 | 1.7007 | 0.8622 | 140.1447 | 215.2604 | 218.2604 |
| 43.9525 | 1.8486 | 1.5967 | 1.6167 | 0.8207 | 136.5278 | 208.7500 | 211.7500 |
| 44.4387 | 1.8397 | 1.5359 | 1.5559 | 0.7906 | 131.4641 | 199.6354 | 202.6354 |
| 45.4109 | 1.8373 | 1.5212 | 1.5412 | 0.7833 | 130.7407 | 198.3333 | 201.3333 |
| 46.4236 | 1.8268 | 1.4477 | 1.4677 | 0.7469 | 125.6771 | 189.2188 | 192.2188 |
| 47.0313 | 1.8210 | 1.4099 | 1.4299 | 0.7282 | 123.5069 | 185.3125 | 188.3125 |
| 47.7199 | 1.8118 | 1.3491 | 1.3691 | 0.6981 | 122.0602 | 182.7083 | 185.7083 |
| 49.0567 | 1.8032 | 1.2861 | 1.3061 | 0.6670 | 119.8900 | 178.8021 | 181.8021 |
| 49.9074 | 1.8001 | 1.2651 | 1.2851 | 0.6566 | 114.1030 | 168.3854 | 171.3854 |
| 51.0417 | 1.7894 | 1.1916 | 1.2116 | 0.6202 | 109.0394 | 159.2708 | 162.2708 |

| | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| 52.4190 | 1.7894 | 1.1916 | 1.2116 | 0.6202 | 109.0394 | 159.2708 | 162.2708 |
| 52.7836 | 1.8035 | 1.2882 | 1.3082 | 0.6680 | 107.5926 | 156.6667 | 159.6667 |
| 53.8773 | 1.8038 | 1.2903 | 1.3103 | 0.6690 | 110.4861 | 161.8750 | 164.8750 |
| 54.2014 | 1.8124 | 1.3491 | 1.3691 | 0.6981 | 113.3796 | 167.0833 | 170.0833 |
| 53.9178 | 1.8164 | 1.3721 | 1.3921 | 0.7095 | 113.3796 | 167.0833 | 170.0833 |
| 52.3380 | 1.8284 | 1.4519 | 1.4719 | 0.7490 | 116.9965 | 173.5938 | 176.5938 |
| 51.5278 | 1.8532 | 1.6282 | 1.6482 | 0.8363 | 126.4005 | 190.5208 | 193.5208 |
| 50.6771 | 1.8535 | 1.6303 | 1.6503 | 0.8373 | 128.5706 | 194.4271 | 197.4271 |
| 49.4213 | 1.8590 | 1.6681 | 1.6881 | 0.8560 | 134.3576 | 204.8437 | 207.8437 |
| 48.3275 | 1.8633 | 1.6975 | 1.7175 | 0.8705 | 134.3576 | 204.8437 | 207.8437 |
| 46.1806 | 1.8762 | 1.7856 | 1.8056 | 0.9142 | 140.8681 | 216.5625 | 219.5625 |
| 45.7350 | 1.8793 | 1.8066 | 1.8266 | 0.9246 | 141.5914 | 217.8646 | 220.8646 |
| 44.9653 | 1.8873 | 1.8591 | 1.8791 | 0.9505 | 145.9317 | 225.6771 | 228.6771 |
| 44.0336 | 1.8996 | 1.9389 | 1.9589 | 0.9900 | 150.2720 | 233.4896 | 236.4896 |
| 42.7373 | 1.9051 | 1.9766 | 1.9966 | 1.0087 | 151.7188 | 236.0938 | 239.0938 |
| 41.6435 | 1.9109 | 2.0207 | 2.0407 | 1.0305 | 158.9525 | 249.1146 | 252.1146 |
| 41.1574 | 1.9115 | 2.0270 | 2.0470 | 1.0336 | 159.6759 | 250.4167 | 253.4167 |
| 40.0637 | 1.9195 | 2.0816 | 2.1016 | 1.0606 | 161.1227 | 253.0208 | 256.0208 |
| 38.8889 | 1.9210 | 2.0921 | 2.1121 | 1.0658 | 161.1227 | 253.0208 | 256.0208 |
| 38.1597 | 1.9361 | 2.1949 | 2.2149 | 1.1167 | 166.1863 | 262.1354 | 265.1354 |
| 38.0787 | 1.9508 | 2.2915 | 2.3115 | 1.1645 | 174.1435 | 276.4583 | 279.4583 |
| 37.1875 | 1.9520 | 2.2999 | 2.3199 | 1.1687 | 176.3137 | 280.3646 | 283.3646 |
| 35.9317 | 1.9579 | 2.3398 | 2.3598 | 1.1884 | 180.6539 | 288.1771 | 291.1771 |
| 34.6759 | 1.9662 | 2.4006 | 2.4206 | 1.2185 | 182.8241 | 292.0833 | 295.0833 |
| 34.0683 | 1.9720 | 2.4384 | 2.4584 | 1.2372 | 186.4410 | 298.5938 | 301.5938 |
| 32.8530 | 1.9760 | 2.4657 | 2.4857 | 1.2507 | 187.1644 | 299.8958 | 302.8958 |
| 32.1238 | 1.9904 | 2.5664 | 2.5864 | 1.3006 | 192.2280 | 309.0104 | 312.0104 |
| 30.9086 | 2.0008 | 2.6378 | 2.6578 | 1.3359 | 197.2917 | 318.1250 | 321.1250 |
| 30.5035 | 2.0057 | 2.6714 | 2.6914 | 1.3525 | 200.1852 | 323.3333 | 326.3333 |
| 29.3692 | 2.0113 | 2.7092 | 2.7292 | 1.3712 | 205.9722 | 333.7500 | 336.7500 |
| 27.7083 | 2.0159 | 2.7406 | 2.7606 | 1.3868 | 205.9722 | 333.7500 | 336.7500 |
| 27.1007 | 2.0217 | 2.7721 | 2.7921 | 1.4024 | 208.1424 | 337.6563 | 340.6563 |
| 26.2500 | 2.0242 | 2.7952 | 2.8152 | 1.4138 | 208.8657 | 338.9583 | 341.9583 |
| 25.1563 | 2.0373 | 2.8834 | 2.9034 | 1.4574 | 211.7593 | 344.1667 | 347.1667 |
| 24.3056 | 2.0490 | 2.9673 | 2.9873 | 1.4990 | 216.0995 | 351.9792 | 354.9792 |
| 24.3056 | 2.0545 | 3.0051 | 3.0251 | 1.5177 | 217.5463 | 354.5833 | 357.5833 |
| 23.2523 | 2.0628 | 3.0618 | 3.0818 | 1.5457 | 221.1632 | 361.0938 | 364.0938 |
| 22.2801 | 2.0717 | 3.1226 | 3.1426 | 1.5758 | 225.5035 | 368.9063 | 371.9063 |
| 20.7407 | 2.0760 | 3.1520 | 3.1720 | 1.5904 | 229.8438 | 376.7188 | 379.7188 |
| 20.3356 | 2.0822 | 3.1940 | 3.2140 | 1.6111 | 232.0139 | 380.6250 | 383.6250 |
| 19.0394 | 2.1006 | 3.3178 | 3.3378 | 1.6724 | 238.5243 | 392.3438 | 395.3438 |
| 17.9456 | 2.1165 | 3.4291 | 3.4491 | 1.7275 | 250.0984 | 413.1771 | 416.1771 |
| 16.9734 | 2.1187 | 3.4291 | 3.4491 | 1.7275 | 252.2685 | 417.0833 | 420.0833 |
| 16.2847 | 2.1319 | 3.5340 | 3.5540 | 1.7794 | 259.5023 | 430.1042 | 433.1042 |
| 14.1377 | 2.1408 | 3.5949 | 3.6149 | 1.8095 | 266.0127 | 441.8229 | 444.8229 |
| 12.8009 | 2.1530 | 3.6789 | 3.6989 | 1.8511 | 276.1400 | 461.3542 | 464.3542 |
| 11.5451 | 2.1534 | 3.6810 | 3.7010 | 1.8521 | 281.9271 | 470.4688 | 473.4688 |
| 10.3299 | 2.1601 | 3.7271 | 3.7471 | 1.8750 | 286.9908 | 479.5833 | 482.5833 |
| 8.9931 | 2.1770 | 3.8426 | 3.8626 | 1.9321 | 295.6713 | 495.2083 | 498.2083 |
| 7.7373 | 2.1807 | 3.8657 | 3.8857 | 1.9435 | 299.2882 | 501.7188 | 504.7188 |
| 6.5625 | 2.1837 | 3.8888 | 3.9088 | 1.9549 | 306.5220 | 514.7396 | 517.7396 |
| 5.7523 | 2.1853 | 3.8993 | 3.9193 | 1.9601 | 307.9688 | 517.3438 | 520.3438 |
| 4.9421 | 2.1991 | 3.9937 | 4.0137 | 2.0069 | 315.2025 | 530.3646 | 533.3646 |
| 3.9699 | 2.1991 | 3.9937 | 4.0137 | 2.0069 | 318.8194 | 536.8750 | 539.8750 |
| 2.5926 | 2.1991 | 3.9937 | 4.0137 | 2.0069 | 318.8194 | 536.8750 | 539.8750 |
| 2.3495 | 2.1991 | 3.9937 | 4.0137 | 2.0069 | 318.8194 | 536.8750 | 539.8750 |

Anexa 8**Date sistem Fuzzy ϕ 200 mm**

| Dif. de temp. | Vit. de turnare | Vana Z1 | Vana Z2 | Vana Z3 | Debit Z1 | Debit Z2 | Debit Z3 |
|----------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 58.4144 | 1.3575 | 0.8456 | 1.0288 | 0.7016 | 82.0524 | 97.9797 | 67.2940 |
| 57.8877 | 1.3608 | 0.8643 | 1.0514 | 0.7168 | 82.0524 | 97.9797 | 67.2940 |
| 56.2674 | 1.3737 | 0.9358 | 1.1380 | 0.7750 | 85.9659 | 102.6817 | 70.4769 |
| 55.6192 | 1.3777 | 0.9580 | 1.1648 | 0.7930 | 90.6620 | 108.3241 | 74.2963 |
| 54.3229 | 1.3882 | 1.0141 | 1.2328 | 0.8388 | 96.1409 | 114.9068 | 78.7523 |
| 53.9583 | 1.3912 | 1.0277 | 1.2492 | 0.8499 | 96.9236 | 115.8472 | 79.3889 |
| 51.7708 | 1.4081 | 1.1196 | 1.3605 | 0.9247 | 101.6198 | 121.4896 | 83.2083 |
| 51.1632 | 1.4124 | 1.1452 | 1.3914 | 0.9455 | 108.6641 | 129.9531 | 88.9375 |
| 50.4340 | 1.4176 | 1.1792 | 1.4326 | 0.9732 | 111.7948 | 133.7147 | 91.4838 |
| 50.1100 | 1.4198 | 1.1911 | 1.4471 | 0.9829 | 111.7948 | 133.7147 | 91.4838 |
| 49.1377 | 1.4277 | 1.2354 | 1.5006 | 1.0189 | 115.7083 | 138.4167 | 94.6667 |
| 48.0845 | 1.4354 | 1.2779 | 1.5521 | 1.0536 | 117.2737 | 140.2975 | 95.9398 |
| 47.1933 | 1.4425 | 1.3171 | 1.5995 | 1.0855 | 121.9699 | 145.9398 | 99.7593 |
| 47.1528 | 1.4428 | 1.3188 | 1.6016 | 1.0868 | 122.7526 | 146.8802 | 100.3958 |
| 45.8565 | 1.4514 | 1.3682 | 1.6613 | 1.1270 | 125.1007 | 149.7014 | 102.3056 |
| 44.8438 | 1.4600 | 1.4107 | 1.7129 | 1.1617 | 129.0142 | 154.4034 | 105.4884 |
| 44.1146 | 1.4658 | 1.4447 | 1.7541 | 1.1894 | 133.7103 | 160.0457 | 109.3079 |
| 43.8715 | 1.4683 | 1.4550 | 1.7664 | 1.1977 | 135.2757 | 161.9265 | 110.5810 |
| 43.4259 | 1.4710 | 1.4737 | 1.7891 | 1.2130 | 138.4065 | 165.6881 | 113.1273 |
| 42.8588 | 1.4759 | 1.5026 | 1.8241 | 1.2365 | 139.1892 | 166.6285 | 113.7639 |
| 41.7245 | 1.4845 | 1.5503 | 1.8818 | 1.2753 | 143.1027 | 171.3304 | 116.9468 |
| 40.9549 | 1.4894 | 1.5775 | 1.9148 | 1.2975 | 143.8854 | 172.2708 | 117.5833 |
| 39.8611 | 1.4980 | 1.6252 | 1.9725 | 1.3363 | 149.3643 | 178.8536 | 122.0394 |
| 39.5370 | 1.5002 | 1.6371 | 1.9869 | 1.3460 | 152.4951 | 182.6152 | 124.5856 |
| 38.5648 | 1.5081 | 1.6813 | 2.0405 | 1.3820 | 156.4086 | 187.3171 | 127.7685 |
| 38.3218 | 1.5097 | 1.6864 | 2.0467 | 1.3862 | 157.9740 | 189.1979 | 129.0417 |
| 37.5116 | 1.5158 | 1.7205 | 2.0879 | 1.4139 | 159.5393 | 191.0787 | 130.3148 |
| 36.4178 | 1.5238 | 1.7647 | 2.1414 | 1.4499 | 161.8874 | 193.8999 | 132.2245 |
| 35.2431 | 1.5330 | 1.8192 | 2.2074 | 1.4943 | 168.1490 | 201.4230 | 137.3171 |
| 35.0810 | 1.5339 | 1.8209 | 2.2094 | 1.4957 | 170.4971 | 204.2442 | 139.2269 |
| 33.8657 | 1.5434 | 1.8771 | 2.2774 | 1.5414 | 172.8452 | 207.0654 | 141.1366 |
| 32.5694 | 1.5530 | 1.9298 | 2.3413 | 1.5844 | 174.4106 | 208.9462 | 142.4097 |
| 31.5972 | 1.5606 | 1.9724 | 2.3928 | 1.6190 | 183.0202 | 219.2905 | 149.4120 |
| 31.1921 | 1.5637 | 1.9894 | 2.4134 | 1.6329 | 183.0202 | 219.2905 | 149.4120 |
| 30.3009 | 1.5704 | 2.0269 | 2.4588 | 1.6634 | 188.4991 | 225.8733 | 153.8681 |
| 29.9769 | 1.5732 | 2.0422 | 2.4773 | 1.6758 | 192.4126 | 230.5752 | 157.0509 |
| 30.0174 | 1.5726 | 2.0405 | 2.4752 | 1.6744 | 193.1953 | 231.5156 | 157.6875 |
| 30.1389 | 1.5717 | 2.0337 | 2.4670 | 1.6689 | 192.4126 | 230.5752 | 157.0509 |
| 30.7465 | 1.5671 | 2.0115 | 2.4402 | 1.6509 | 192.4126 | 230.5752 | 157.0509 |
| 31.3542 | 1.5615 | 1.9843 | 2.4072 | 1.6287 | 192.4126 | 230.5752 | 157.0509 |
| 33.0556 | 1.5499 | 1.9128 | 2.3207 | 1.5705 | 188.4991 | 225.8733 | 153.8681 |
| 33.3796 | 1.5474 | 1.8992 | 2.3042 | 1.5594 | 187.7164 | 224.9329 | 153.2315 |
| 34.3924 | 1.5388 | 1.8515 | 2.2465 | 1.5206 | 179.8895 | 215.5289 | 146.8657 |
| 35.0810 | 1.5342 | 1.8260 | 2.2156 | 1.4998 | 177.5414 | 212.7077 | 144.9560 |
| 36.4178 | 1.5250 | 1.7749 | 2.1538 | 1.4583 | 173.6279 | 208.0058 | 141.7731 |
| 36.6609 | 1.5223 | 1.7596 | 2.1353 | 1.4458 | 172.8452 | 207.0654 | 141.1366 |
| 37.1470 | 1.5186 | 1.7392 | 2.1105 | 1.4291 | 168.1490 | 201.4230 | 137.3171 |
| 37.7546 | 1.5137 | 1.7188 | 2.0858 | 1.4125 | 165.8009 | 198.6019 | 135.4074 |
| 38.1597 | 1.5097 | 1.6967 | 2.0590 | 1.3945 | 163.4528 | 195.7807 | 133.4977 |
| 39.1319 | 1.5039 | 1.6575 | 2.0116 | 1.3626 | 162.6701 | 194.8403 | 132.8611 |
| 40.3472 | 1.4940 | 1.6235 | 1.9704 | 1.3349 | 157.9740 | 189.1979 | 129.0417 |

| | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| 41.2384 | 1.4876 | 1.5673 | 1.9024 | 1.2892 | 155.6259 | 186.3767 | 127.1319 |
| 42.2106 | 1.4802 | 1.5264 | 1.8530 | 1.2559 | 150.1470 | 179.7940 | 122.6759 |
| 42.5752 | 1.4775 | 1.5111 | 1.8344 | 1.2434 | 147.7989 | 176.9728 | 120.7662 |
| 43.5475 | 1.4710 | 1.4754 | 1.7912 | 1.2143 | 145.4508 | 174.1516 | 118.8565 |
| 44.4387 | 1.4640 | 1.4362 | 1.7438 | 1.1825 | 142.3200 | 170.3900 | 116.3102 |
| 45.6944 | 1.4541 | 1.3835 | 1.6799 | 1.1395 | 138.4065 | 165.6881 | 113.1273 |
| 45.9780 | 1.4514 | 1.3716 | 1.6655 | 1.1298 | 136.0584 | 162.8669 | 111.2176 |
| 46.6262 | 1.4465 | 1.3409 | 1.6284 | 1.1049 | 132.1450 | 158.1649 | 108.0347 |
| 46.5856 | 1.4471 | 1.3426 | 1.6304 | 1.1062 | 130.5796 | 156.2841 | 106.7616 |
| 45.4514 | 1.4554 | 1.3869 | 1.6840 | 1.1423 | 129.7969 | 155.3438 | 106.1250 |
| 44.6412 | 1.4612 | 1.4141 | 1.7170 | 1.1644 | 129.7969 | 155.3438 | 106.1250 |
| 44.1551 | 1.4655 | 1.4447 | 1.7541 | 1.1894 | 132.9277 | 159.1053 | 108.6713 |
| 43.5069 | 1.4704 | 1.4720 | 1.7870 | 1.2116 | 136.8411 | 163.8073 | 111.8542 |
| 42.4942 | 1.4781 | 1.5145 | 1.8385 | 1.2462 | 141.5373 | 169.4496 | 115.6736 |
| 42.4942 | 1.4781 | 1.5145 | 1.8385 | 1.2462 | 142.3200 | 170.3900 | 116.3102 |
| 40.9954 | 1.4894 | 1.5741 | 1.9107 | 1.2947 | 144.6681 | 173.2112 | 118.2199 |
| 39.8611 | 1.4983 | 1.6184 | 1.9642 | 1.3308 | 149.3643 | 178.8536 | 122.0394 |
| 38.7674 | 1.5060 | 1.6711 | 2.0281 | 1.3737 | 154.8432 | 185.4363 | 126.4954 |
| 38.0787 | 1.5115 | 1.6932 | 2.0549 | 1.3917 | 156.4086 | 187.3171 | 127.7685 |
| 36.9039 | 1.5204 | 1.7477 | 2.1208 | 1.4361 | 161.8874 | 193.8999 | 132.2245 |
| 35.7697 | 1.5287 | 1.7937 | 2.1765 | 1.4735 | 162.6701 | 194.8403 | 132.8611 |
| 34.7569 | 1.5370 | 1.8413 | 2.2342 | 1.5123 | 169.7144 | 203.3038 | 138.5903 |
| 34.3924 | 1.5391 | 1.8532 | 2.2486 | 1.5220 | 171.2798 | 205.1846 | 139.8634 |
| 33.4606 | 1.5462 | 1.8924 | 2.2960 | 1.5539 | 174.4106 | 208.9462 | 142.4097 |
| 32.3669 | 1.5542 | 1.9366 | 2.3495 | 1.5899 | 177.5414 | 212.7077 | 144.9560 |
| 30.0174 | 1.5723 | 2.0320 | 2.4649 | 1.6675 | 182.2375 | 218.3501 | 148.7755 |
| 29.6933 | 1.5751 | 2.0524 | 2.4897 | 1.6842 | 185.3683 | 222.1117 | 151.3218 |
| 29.0451 | 1.5800 | 2.0796 | 2.5226 | 1.7063 | 192.4126 | 230.5752 | 157.0509 |
| 28.4780 | 1.5846 | 2.1034 | 2.5515 | 1.7257 | 194.7607 | 233.3964 | 158.9606 |
| 26.2905 | 1.6002 | 2.1749 | 2.6380 | 1.7839 | 200.2396 | 239.9792 | 163.4167 |
| 25.8854 | 1.6036 | 2.2056 | 2.6751 | 1.8089 | 201.0223 | 240.9196 | 164.0532 |
| 24.3866 | 1.6159 | 2.2788 | 2.7637 | 1.8685 | 207.2839 | 248.4427 | 169.1458 |
| 23.2118 | 1.6248 | 2.3281 | 2.8235 | 1.9087 | 209.6319 | 251.2639 | 171.0556 |
| 21.4294 | 1.6380 | 2.4030 | 2.9141 | 1.9696 | 211.9800 | 254.0851 | 172.9653 |
| 19.8495 | 1.6490 | 2.4626 | 2.9862 | 2.0181 | 213.5454 | 255.9659 | 174.2384 |
| 18.5938 | 1.6585 | 2.5153 | 3.0501 | 2.0611 | 220.5897 | 264.4294 | 179.9676 |
| 17.2569 | 1.6693 | 2.5698 | 3.1160 | 2.1055 | 227.6340 | 272.8929 | 185.6968 |
| 16.0417 | 1.6785 | 2.6209 | 3.1779 | 2.1470 | 234.6782 | 281.3565 | 191.4259 |
| 15.7176 | 1.6809 | 2.6396 | 3.2005 | 2.1623 | 238.5917 | 286.0584 | 194.6088 |
| 14.1782 | 1.6932 | 2.6992 | 3.2726 | 2.2108 | 247.9841 | 297.3432 | 202.2477 |
| 13.6921 | 1.6960 | 2.7230 | 3.3015 | 2.2302 | 250.3322 | 300.1643 | 204.1574 |
| 12.2338 | 1.7073 | 2.7809 | 3.3716 | 2.2773 | 260.5072 | 312.3895 | 212.4329 |
| 12.0313 | 1.7085 | 2.7928 | 3.3860 | 2.2870 | 261.2899 | 313.3298 | 213.0694 |
| 11.4236 | 1.7135 | 2.8200 | 3.4189 | 2.3092 | 267.5515 | 320.8530 | 218.1620 |
| 11.2616 | 1.7144 | 2.8251 | 3.4251 | 2.3133 | 273.8130 | 328.3762 | 223.2546 |
| 10.1678 | 1.7224 | 2.8694 | 3.4787 | 2.3494 | 280.8573 | 336.8397 | 228.9838 |
| 9.1551 | 1.7297 | 2.9102 | 3.5281 | 2.3826 | 282.4227 | 338.7205 | 230.2569 |
| 8.0208 | 1.7392 | 2.9630 | 3.5920 | 2.4256 | 288.6843 | 346.2436 | 235.3495 |
| 7.5752 | 1.7423 | 2.9817 | 3.6147 | 2.4408 | 293.3805 | 351.8860 | 239.1690 |
| 5.9549 | 1.7540 | 3.0345 | 3.6786 | 2.4838 | 299.6421 | 359.4091 | 244.2616 |
| 5.0637 | 1.7623 | 3.0855 | 3.7404 | 2.5254 | 301.9901 | 362.2303 | 246.1713 |
| 3.2813 | 1.7758 | 3.1587 | 3.8290 | 2.5850 | 307.4690 | 368.8131 | 250.6273 |
| 1.9850 | 1.7853 | 3.2132 | 3.8949 | 2.6293 | 313.7306 | 376.3362 | 255.7199 |
| 0.1215 | 1.7991 | 3.2949 | 3.9938 | 2.6958 | 323.9057 | 388.5613 | 263.9954 |
| 0.1215 | 1.7991 | 3.2949 | 3.9938 | 2.6958 | 326.2538 | 391.3825 | 265.9051 |
| 0.1215 | 1.7991 | 3.2949 | 3.9938 | 2.6958 | 326.2538 | 391.3825 | 265.9051 |
| 0.1215 | 1.7991 | 3.2949 | 3.9938 | 2.6958 | 326.2538 | 391.3825 | 265.9051 |

Anexa 9**Date sistem Fuzzy ϕ 250 mm**

| Dif. de temp. | Vit. de turnare | Vana Z1 | Vana Z2 | Vana Z3 | Debit Z1 | Debit Z2 | Debit Z3 |
|----------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 49.0162 | 1.1840 | 1.4561 | 1.4761 | 0.7511 | 197.1273 | 215.1273 | 157.7922 |
| 48.3681 | 1.1909 | 1.4939 | 1.5139 | 0.7698 | 202.5092 | 220.5092 | 159.9190 |
| 47.8009 | 1.1968 | 1.5212 | 1.5412 | 0.7833 | 200.7153 | 218.7153 | 159.2101 |
| 46.7882 | 1.2075 | 1.5715 | 1.5915 | 0.8082 | 215.0671 | 233.0671 | 164.8814 |
| 46.0995 | 1.2147 | 1.6114 | 1.6314 | 0.8280 | 222.2431 | 240.2431 | 167.7170 |
| 45.6539 | 1.2194 | 1.6345 | 1.6545 | 0.8394 | 225.8310 | 243.8310 | 169.1348 |
| 44.0741 | 1.2361 | 1.7164 | 1.7364 | 0.8799 | 234.8009 | 252.8009 | 172.6794 |
| 43.7095 | 1.2399 | 1.7353 | 1.7553 | 0.8892 | 236.5949 | 254.5949 | 173.3883 |
| 42.5752 | 1.2514 | 1.7919 | 1.8119 | 0.9173 | 243.7708 | 261.7708 | 176.2240 |
| 41.9271 | 1.2587 | 1.8276 | 1.8476 | 0.9349 | 250.9467 | 268.9467 | 179.0596 |
| 41.1169 | 1.2672 | 1.8696 | 1.8896 | 0.9557 | 252.7408 | 270.7408 | 179.7685 |
| 40.9549 | 1.2689 | 1.8780 | 1.8980 | 0.9599 | 256.3287 | 274.3287 | 181.1863 |
| 39.0914 | 1.2860 | 1.9619 | 1.9819 | 1.0014 | 268.8866 | 286.8866 | 186.1487 |
| 38.5648 | 1.2928 | 1.9955 | 2.0155 | 1.0180 | 276.0625 | 294.0625 | 188.9844 |
| 37.7951 | 1.3022 | 2.0417 | 2.0617 | 1.0409 | 283.2384 | 301.2384 | 191.8200 |
| 36.7014 | 1.3137 | 2.0984 | 2.1184 | 1.0689 | 295.7963 | 313.7963 | 196.7824 |
| 36.2558 | 1.3184 | 2.1026 | 2.1226 | 1.0710 | 297.5903 | 315.5903 | 197.4913 |
| 35.2836 | 1.3286 | 2.1634 | 2.1834 | 1.1011 | 308.3542 | 326.3542 | 201.7448 |
| 35.1620 | 1.3299 | 2.1781 | 2.1981 | 1.1084 | 310.1481 | 328.1481 | 202.4537 |
| 33.9873 | 1.3422 | 2.2390 | 2.2590 | 1.1385 | 319.1181 | 337.1181 | 205.9983 |
| 33.3391 | 1.3491 | 2.2726 | 2.2926 | 1.1552 | 324.5000 | 342.5000 | 208.1250 |
| 32.1644 | 1.3614 | 2.3335 | 2.3535 | 1.1853 | 337.0579 | 355.0579 | 213.0874 |
| 31.8403 | 1.3653 | 2.3523 | 2.3723 | 1.1946 | 337.0579 | 355.0579 | 213.0874 |
| 30.8275 | 1.3751 | 2.4006 | 2.4206 | 1.2185 | 347.8217 | 365.8217 | 217.3409 |
| 30.3414 | 1.3806 | 2.4279 | 2.4479 | 1.2320 | 351.4097 | 369.4097 | 218.7587 |
| 29.6123 | 1.3883 | 2.4657 | 2.4857 | 1.2507 | 360.3796 | 378.3796 | 222.3032 |
| 29.4502 | 1.3896 | 2.4720 | 2.4920 | 1.2538 | 362.1736 | 380.1736 | 223.0121 |
| 28.3565 | 1.4015 | 2.5287 | 2.5487 | 1.2819 | 372.9375 | 390.9375 | 227.2656 |
| 27.8299 | 1.4071 | 2.5580 | 2.5780 | 1.2964 | 380.1134 | 398.1134 | 230.1013 |
| 27.5463 | 1.4100 | 2.5664 | 2.5864 | 1.3006 | 385.4954 | 403.4954 | 232.2280 |
| 26.3310 | 1.4228 | 2.6336 | 2.6536 | 1.3338 | 394.4653 | 412.4653 | 235.7726 |
| 25.8044 | 1.4284 | 2.6588 | 2.6788 | 1.3463 | 401.6412 | 419.6412 | 238.6082 |
| 25.2778 | 1.4339 | 2.6903 | 2.7103 | 1.3619 | 407.0231 | 425.0231 | 240.7350 |
| 25.4398 | 1.4322 | 2.6882 | 2.7082 | 1.3608 | 410.6111 | 428.6111 | 242.1528 |
| 25.9664 | 1.4267 | 2.6546 | 2.6746 | 1.3442 | 417.7870 | 435.7870 | 244.9884 |
| 26.2500 | 1.4237 | 2.6399 | 2.6599 | 1.3369 | 419.5810 | 437.5810 | 245.6973 |
| 26.8981 | 1.4169 | 2.6063 | 2.6263 | 1.3203 | 415.9931 | 433.9931 | 244.2795 |
| 27.1007 | 1.4147 | 2.5958 | 2.6158 | 1.3151 | 414.1991 | 432.1991 | 243.5706 |
| 27.5868 | 1.4096 | 2.5706 | 2.5906 | 1.3026 | 405.2292 | 423.2292 | 240.0260 |
| 28.4780 | 1.4002 | 2.5245 | 2.5445 | 1.2798 | 398.0533 | 416.0533 | 237.1904 |
| 28.7616 | 1.3972 | 2.5098 | 2.5298 | 1.2725 | 396.2592 | 414.2592 | 236.4815 |
| 29.2477 | 1.3921 | 2.4846 | 2.5046 | 1.2601 | 392.6713 | 410.6713 | 235.0637 |
| 29.9363 | 1.3849 | 2.4552 | 2.4752 | 1.2455 | 390.8773 | 408.8773 | 234.3548 |
| 30.3414 | 1.3806 | 2.4300 | 2.4500 | 1.2331 | 385.4954 | 403.4954 | 232.2280 |
| 31.2731 | 1.3708 | 2.3901 | 2.4101 | 1.2133 | 378.3194 | 396.3194 | 229.3923 |
| 31.8808 | 1.3648 | 2.3544 | 2.3744 | 1.1957 | 365.7616 | 383.7616 | 224.4300 |
| 32.3264 | 1.3593 | 2.3272 | 2.3472 | 1.1822 | 358.5856 | 376.5856 | 221.5943 |
| 32.9340 | 1.3533 | 2.3020 | 2.3220 | 1.1697 | 356.7917 | 374.7917 | 220.8854 |
| 33.5822 | 1.3465 | 2.2600 | 2.2800 | 1.1489 | 351.4097 | 369.4097 | 218.7587 |
| 34.5544 | 1.3363 | 2.2096 | 2.2296 | 1.1240 | 338.8519 | 356.8519 | 213.7963 |
| 34.9595 | 1.3320 | 2.1886 | 2.2086 | 1.1136 | 338.8519 | 356.8519 | 213.7963 |

| | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| 36.3773 | 1.3171 | 2.1152 | 2.1352 | 1.0772 | 320.9120 | 338.9120 | 206.7072 |
| 37.3900 | 1.3064 | 2.0627 | 2.0827 | 1.0513 | 317.3241 | 335.3241 | 205.2894 |
| 37.5116 | 1.3051 | 2.0564 | 2.0764 | 1.0482 | 315.5301 | 333.5301 | 204.5804 |
| 38.6458 | 1.2936 | 1.9997 | 2.0197 | 1.0201 | 310.1481 | 328.1481 | 202.4537 |
| 39.1319 | 1.2889 | 1.9766 | 1.9966 | 1.0087 | 304.7662 | 322.7662 | 200.3270 |
| 40.4282 | 1.2744 | 1.9137 | 1.9337 | 0.9775 | 294.0023 | 312.0023 | 196.0735 |
| 40.7928 | 1.2706 | 1.8906 | 1.9106 | 0.9661 | 288.6204 | 306.6204 | 193.9468 |
| 40.9144 | 1.2693 | 1.8801 | 1.9001 | 0.9609 | 279.6505 | 297.6505 | 190.4022 |
| 40.7928 | 1.2706 | 1.8864 | 1.9064 | 0.9640 | 279.6505 | 297.6505 | 190.4022 |
| 40.3877 | 1.2749 | 1.9053 | 1.9253 | 0.9734 | 277.8565 | 295.8565 | 189.6933 |
| 39.7801 | 1.2813 | 1.9389 | 1.9589 | 0.9900 | 277.8565 | 295.8565 | 189.6933 |
| 38.8889 | 1.2906 | 1.9850 | 2.0050 | 1.0128 | 279.6505 | 297.6505 | 190.4022 |
| 37.8762 | 1.3013 | 2.0375 | 2.0575 | 1.0388 | 288.6204 | 306.6204 | 193.9468 |
| 37.3495 | 1.3068 | 2.0648 | 2.0848 | 1.0523 | 292.2083 | 310.2083 | 195.3646 |
| 36.3368 | 1.3175 | 2.1173 | 2.1373 | 1.0783 | 299.3842 | 317.3842 | 198.2002 |
| 35.9722 | 1.3213 | 2.1362 | 2.1562 | 1.0876 | 304.7662 | 322.7662 | 200.3270 |
| 35.2836 | 1.3286 | 2.1718 | 2.1918 | 1.1053 | 308.3542 | 326.3542 | 201.7448 |
| 34.6759 | 1.3346 | 2.2012 | 2.2212 | 1.1198 | 311.9421 | 329.9421 | 203.1626 |
| 34.1088 | 1.3410 | 2.2327 | 2.2527 | 1.1354 | 320.9120 | 338.9120 | 206.7072 |
| 33.9468 | 1.3427 | 2.2327 | 2.2527 | 1.1354 | 326.2940 | 344.2940 | 208.8339 |
| 32.8530 | 1.3542 | 2.2978 | 2.3178 | 1.1676 | 335.2639 | 353.2639 | 212.3785 |
| 32.6100 | 1.3567 | 2.2999 | 2.3199 | 1.1687 | 335.2639 | 353.2639 | 212.3785 |
| 31.3542 | 1.3695 | 2.3670 | 2.3870 | 1.2019 | 335.2639 | 353.2639 | 212.3785 |
| 30.9086 | 1.3746 | 2.3964 | 2.4164 | 1.2164 | 338.8519 | 356.8519 | 213.7963 |
| 28.9236 | 1.3955 | 2.4993 | 2.5193 | 1.2673 | 347.8217 | 365.8217 | 217.3409 |
| 27.9109 | 1.4062 | 2.5538 | 2.5738 | 1.2943 | 351.4097 | 369.4097 | 218.7587 |
| 27.1817 | 1.4139 | 2.5916 | 2.6116 | 1.3130 | 356.7917 | 374.7917 | 220.8854 |
| 26.5741 | 1.4203 | 2.6231 | 2.6431 | 1.3286 | 358.5856 | 376.5856 | 221.5943 |
| 25.9259 | 1.4271 | 2.6567 | 2.6767 | 1.3452 | 363.9676 | 381.9676 | 223.7211 |
| 24.5891 | 1.4412 | 2.7260 | 2.7460 | 1.3795 | 367.5556 | 385.5556 | 225.1389 |
| 24.4271 | 1.4429 | 2.7343 | 2.7543 | 1.3837 | 371.1435 | 389.1435 | 226.5567 |
| 22.8877 | 1.4591 | 2.8141 | 2.8341 | 1.4231 | 381.9074 | 399.9074 | 230.8102 |
| 22.3611 | 1.4646 | 2.8414 | 2.8614 | 1.4366 | 383.7014 | 401.7014 | 231.5191 |
| 21.5104 | 1.4736 | 2.8855 | 2.9055 | 1.4585 | 396.2592 | 414.2592 | 236.4815 |
| 21.1863 | 1.4770 | 2.8960 | 2.9160 | 1.4636 | 401.6412 | 419.6412 | 238.6082 |
| 20.0116 | 1.4894 | 2.9631 | 2.9831 | 1.4969 | 412.4051 | 430.4051 | 242.8617 |
| 18.7153 | 1.5030 | 3.0177 | 3.0377 | 1.5239 | 426.7569 | 444.7569 | 248.5330 |
| 18.2292 | 1.5081 | 3.0492 | 3.0692 | 1.5395 | 432.1389 | 450.1389 | 250.6597 |
| 17.4190 | 1.5166 | 3.0912 | 3.1112 | 1.5602 | 439.3148 | 457.3148 | 253.4954 |
| 16.6088 | 1.5252 | 3.1394 | 3.1594 | 1.5841 | 442.9028 | 460.9028 | 254.9132 |
| 14.6644 | 1.5456 | 3.2402 | 3.2602 | 1.6340 | 451.8727 | 469.8727 | 258.4578 |
| 14.4213 | 1.5482 | 3.2528 | 3.2728 | 1.6402 | 459.0486 | 477.0486 | 261.2934 |
| 12.5984 | 1.5674 | 3.3472 | 3.3672 | 1.6870 | 476.9884 | 494.9884 | 268.3825 |
| 12.1933 | 1.5716 | 3.3682 | 3.3882 | 1.6974 | 485.9584 | 503.9584 | 271.9271 |
| 10.7755 | 1.5866 | 3.4417 | 3.4617 | 1.7337 | 503.8981 | 521.8981 | 279.0162 |
| 10.4514 | 1.5900 | 3.4585 | 3.4785 | 1.7420 | 516.4560 | 534.4560 | 283.9786 |
| 8.7500 | 1.6079 | 3.5466 | 3.5666 | 1.7856 | 537.9838 | 555.9838 | 292.4855 |
| 7.9398 | 1.6156 | 3.5844 | 3.6044 | 1.8043 | 550.5416 | 568.5416 | 297.4479 |
| 5.3472 | 1.6437 | 3.7082 | 3.7282 | 1.8656 | 577.4514 | 595.4514 | 308.0816 |
| 3.6053 | 1.6620 | 3.7985 | 3.8185 | 1.9103 | 607.9491 | 625.9491 | 320.1331 |
| 3.4433 | 1.6638 | 3.8237 | 3.8437 | 1.9227 | 620.5070 | 638.5070 | 325.0955 |
| 2.0660 | 1.6783 | 3.8867 | 3.9067 | 1.9539 | 640.2407 | 658.2407 | 332.8935 |
| 1.6204 | 1.6829 | 3.9118 | 3.9318 | 1.9664 | 652.7986 | 670.7986 | 337.8559 |
| 0.1215 | 1.6987 | 3.9937 | 4.0137 | 2.0069 | 676.1204 | 694.1204 | 347.0717 |
| 0.1215 | 1.6987 | 3.9937 | 4.0137 | 2.0069 | 677.9144 | 695.9144 | 347.7807 |
| 0.1215 | 1.6987 | 3.9937 | 4.0137 | 2.0069 | 677.9144 | 695.9144 | 347.7807 |
| 0.1215 | 1.6987 | 3.9937 | 4.0137 | 2.0069 | 677.9144 | 695.9144 | 347.7807 |

Anexa 10**Date sistem Clasic ϕ 180 mm**

| Dif. de temp. | Vit. de turnare | Vana Z1 | Vana Z2 | Vana Z3 | Debit Z1 | Debit Z2 | Debit Z3 |
|----------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 67.1644 | 1.6912 | 0.5200 | 0.5400 | 0.2878 | 82.4479 | 85.4479 | 66.3600 |
| 58.2523 | 1.7584 | 0.9796 | 0.9996 | 0.5153 | 90.2604 | 93.2604 | 70.7002 |
| 50.5556 | 1.7658 | 1.0300 | 1.0500 | 0.5402 | 125.4167 | 128.4167 | 90.2315 |
| 48.9352 | 1.8293 | 1.4645 | 1.4845 | 0.7553 | 150.1563 | 153.1563 | 103.9757 |
| 41.4815 | 1.8857 | 1.8507 | 1.8707 | 0.9464 | 202.2396 | 205.2396 | 132.9109 |
| 35.0000 | 1.9348 | 2.1865 | 2.2065 | 1.1126 | 247.8125 | 250.8125 | 158.2292 |
| 42.7373 | 1.8762 | 1.7856 | 1.8056 | 0.9142 | 230.8854 | 233.8854 | 148.8252 |
| 49.4618 | 1.8333 | 1.4918 | 1.5118 | 0.7688 | 190.5208 | 193.5208 | 126.4005 |
| 55.8218 | 1.7771 | 1.1077 | 1.1277 | 0.5787 | 170.9896 | 173.9896 | 115.5498 |
| 48.6111 | 1.8320 | 1.4834 | 1.5034 | 0.7646 | 159.2708 | 162.2708 | 109.0394 |
| 45.2488 | 1.8336 | 1.4939 | 1.5139 | 0.7698 | 186.6146 | 189.6146 | 124.2303 |
| 41.0764 | 1.8888 | 1.8717 | 1.8917 | 0.9568 | 204.8437 | 207.8437 | 134.3576 |
| 34.7164 | 1.9370 | 2.2012 | 2.2212 | 1.1198 | 245.2083 | 248.2083 | 156.7824 |
| 27.5868 | 1.9910 | 2.5706 | 2.5906 | 1.3026 | 279.0625 | 282.0625 | 175.5903 |
| 19.4850 | 2.0524 | 2.9904 | 3.0104 | 1.5104 | 331.1458 | 334.1458 | 204.5255 |
| 15.2720 | 2.0527 | 2.9925 | 3.0125 | 1.5114 | 389.7396 | 392.7396 | 237.0775 |
| 11.9097 | 2.1098 | 3.3829 | 3.4029 | 1.7046 | 404.0625 | 407.0625 | 245.0347 |
| 8.2135 | 2.1098 | 3.3829 | 3.4029 | 1.7046 | 462.6563 | 465.6563 | 277.5868 |
| 4.6991 | 2.1644 | 3.7565 | 3.7765 | 1.8895 | 471.7708 | 474.7708 | 282.6505 |
| 0.1215 | 2.1991 | 3.9937 | 4.0137 | 2.0069 | 530.3646 | 533.3646 | 315.2025 |

Anexa 11**Date sistem Clasic ϕ 200 mm**

| Dif. de temp. | Vit. de turnare | Vana Z1 | Vana Z2 | Vana Z3 | Debit Z1 | Debit Z2 | Debit Z3 |
|----------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 60.0347 | 1.3452 | 0.7775 | 0.9464 | 0.6461 | 77.3562 | 92.3374 | 63.4745 |
| 50.7176 | 1.4161 | 1.1707 | 1.4223 | 0.9663 | 88.3139 | 105.5029 | 72.3866 |
| 44.0336 | 1.4664 | 1.4499 | 1.7602 | 1.1935 | 124.3180 | 148.7610 | 101.6690 |
| 37.5521 | 1.5155 | 1.7222 | 2.0899 | 1.4153 | 143.8854 | 172.2708 | 117.5833 |
| 36.8229 | 1.5155 | 1.7222 | 2.0899 | 1.4153 | 163.4528 | 195.7807 | 133.4977 |
| 30.1794 | 1.5714 | 2.0320 | 2.4649 | 1.6675 | 168.9317 | 202.3634 | 137.9537 |
| 35.8912 | 1.5514 | 1.9213 | 2.3310 | 1.5774 | 192.4126 | 230.5752 | 157.0509 |
| 41.8056 | 1.5278 | 1.7903 | 2.1723 | 1.4707 | 172.0625 | 206.1250 | 140.5000 |
| 42.0486 | 1.4814 | 1.5333 | 1.8612 | 1.2615 | 157.9740 | 189.1979 | 129.0417 |
| 48.2870 | 1.4342 | 1.2711 | 1.5439 | 1.0480 | 142.3200 | 170.3900 | 116.3102 |
| 40.4282 | 1.4937 | 1.6013 | 1.9436 | 1.3169 | 126.6661 | 151.5822 | 103.5787 |
| 34.0278 | 1.5189 | 1.7426 | 2.1147 | 1.4319 | 152.4951 | 182.6152 | 124.5856 |
| 32.0428 | 1.5573 | 1.9537 | 2.3702 | 1.6038 | 181.4549 | 217.4097 | 148.1389 |
| 31.8403 | 1.5573 | 1.9537 | 2.3702 | 1.6038 | 185.3683 | 222.1117 | 151.3218 |
| 26.4120 | 1.5999 | 2.1903 | 2.6566 | 1.7964 | 190.0645 | 227.7540 | 155.1412 |
| 22.3611 | 1.5999 | 2.1903 | 2.6566 | 1.7964 | 210.4146 | 252.2043 | 171.6921 |
| 16.4468 | 1.6754 | 2.6090 | 3.1634 | 2.1373 | 245.6360 | 294.5220 | 200.3380 |
| 14.2593 | 1.6754 | 2.6090 | 3.1634 | 2.1373 | 256.5938 | 307.6875 | 209.2500 |
| 7.2917 | 1.7448 | 2.9936 | 3.6291 | 2.4505 | 302.7729 | 363.1707 | 246.8079 |
| 0.1215 | 1.7451 | 2.9953 | 3.6312 | 2.4519 | 311.3825 | 373.5150 | 253.8102 |

Anexa 12**Date sistem Clasic ϕ 250 mm**

| Dif. de temp. | Vit. de turnare | Vana Z1 | Vana Z2 | Vana Z3 | Debit Z1 | Debit Z2 | Debit Z3 |
|----------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 50.6366 | 1.1670 | 1.3763 | 1.3963 | 0.7116 | 191.7454 | 209.7454 | 155.6655 |
| 44.3981 | 1.1670 | 1.3763 | 1.3963 | 0.7116 | 195.3333 | 213.3333 | 157.0833 |
| 42.5752 | 1.2518 | 1.7940 | 1.8140 | 0.9183 | 247.3588 | 265.3588 | 177.6418 |
| 36.5799 | 1.2612 | 1.8402 | 1.8602 | 0.9412 | 254.5347 | 272.5347 | 180.4774 |
| 34.2303 | 1.3397 | 2.2264 | 2.2464 | 1.1323 | 311.9421 | 329.9421 | 203.1626 |
| 31.8808 | 1.3397 | 2.2264 | 2.2464 | 1.1323 | 329.8819 | 347.8819 | 210.2517 |
| 29.4502 | 1.3900 | 2.4741 | 2.4941 | 1.2549 | 367.5556 | 385.5556 | 225.1389 |
| 24.1030 | 1.4467 | 2.7532 | 2.7732 | 1.3930 | 426.7569 | 444.7569 | 248.5330 |
| 32.0023 | 1.3631 | 2.3418 | 2.3618 | 1.1894 | 354.9977 | 372.9977 | 220.1765 |
| 35.4861 | 1.3542 | 2.2978 | 2.3178 | 1.1676 | 351.4097 | 369.4097 | 218.7587 |
| 39.2535 | 1.2830 | 1.9473 | 1.9673 | 0.9942 | 283.2384 | 301.2384 | 191.8200 |
| 32.0428 | 1.3627 | 2.3398 | 2.3598 | 1.1884 | 340.6458 | 358.6458 | 214.5052 |
| 31.8808 | 1.3627 | 2.3398 | 2.3598 | 1.1884 | 346.0278 | 364.0278 | 216.6319 |
| 26.2095 | 1.4237 | 2.6399 | 2.6599 | 1.3369 | 353.2037 | 371.2037 | 219.4676 |
| 26.2500 | 1.4241 | 2.6420 | 2.6620 | 1.3380 | 385.4954 | 403.4954 | 232.2280 |
| 18.9988 | 1.4241 | 2.6420 | 2.6620 | 1.3380 | 398.0533 | 416.0533 | 237.1904 |
| 17.6215 | 1.5145 | 3.0870 | 3.1070 | 1.5582 | 460.8426 | 478.8426 | 262.0023 |
| 9.2766 | 1.5465 | 3.2444 | 3.2644 | 1.6361 | 478.7824 | 496.7824 | 269.0914 |
| 8.4259 | 1.6113 | 3.5634 | 3.5834 | 1.7940 | 606.1551 | 624.1551 | 319.4242 |

Anexa 13**Imagini din timpul experimentărilor**







