

**IOSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI**

**Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială**



# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**- Rezumat -**

**Optimizarea holistică a procesului de fabricație**

**Holistic optimization of manufacturing process**

**Doctorand,  
Ing. Cezarina AFTENI**

**Conducător științific,  
Prof. dr. ing. hab. Gabriel-Radu FRUMUȘANU**

**IOSUD - UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI**

**Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială**



# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**- Rezumat -**

**Optimizarea holistică a procesului de fabricație**

**Holistic optimization of manufacturing process**

**Doctorand,  
Ing. Cezarina AFTENI**

<b>Președinte,</b>	Prof. dr. ing. Cătălin FETECĂU	Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
<b>Conducător științific,</b>	Prof. dr. ing. Gabriel-Radu FRUMUȘANU	Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați
<b>Referenți științifici:</b>	Prof. dr. ing. ec. Cristian-Vasile DOICIN Prof. dr. ing. ec. Dumitru NEDELUCU Prof. dr. ing. Cătălina MAIER	Universitatea Politehnică din București Universitatea Tehnică “Gh. Asachi” din Iași Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

**Seria I 4: Inginerie Industrială Nr. 70  
Galați, 2020**

**Cuprins**

	Nr. pag. teză	Nr. pag rezumat
<b>Introducere</b> .....	v	iii
<b>Capitolul 1. Stadiul actual privind optimizarea procesului de fabricație</b> .....	1	1
1.1. Problema optimizării .....	2	1
1.1.1. Optimizarea uni-criterială .....	4	2
1.1.2. Optimizarea multi-criterială .....	5	2
1.1.3. Optimizarea multi-nivel .....	7	2
1.1.4. Optimizarea multi-etapă.....	7	3
1.2. Tehnici moderne de optimizare .....	8	3
1.2.1. Tehnici bazate pe algoritmi genetici.....	8	3
1.2.2. Tehnici bazate pe rețele neuronale artificiale .....	10	4
1.2.3. Tehnici bazate pe modelul roiului de particule .....	11	4
1.2.4. Tehnici bazate pe modelul coloniei de furnici.....	13	5
1.2.5. Tehnici bazate pe logica fuzzy .....	14	5
1.2.6. Tehnici de tip combinatoric .....	15	5
1.3. Performanța fabricației .....	16	5
1.3.1. Planificarea proceselor de fabricație .....	18	5
1.3.2. Alocarea resurselor proceselor de fabricație .....	20	6
1.4. Cercetări privind optimizarea planificării fabricației .....	23	7
1.5. Cercetări privind optimizarea alocării resurselor necesare fabricației.....	34	8
1.6. Cercetări privind optimizarea integrată a fabricației .....	40	8
1.7. Concluzii referitoare la stadiul actual privind optimizarea procesului de fabricație .....	46	8
<b>Capitolul 2. Obiectivele tezei și direcții de cercetare</b> .....	47	11
<b>Capitolul 3. Conceptul metodologiei de optimizare holistică a procesului de fabricație</b> .....	51	13
3.1. Optimizarea holistică – o nouă abordare .....	52	13
3.2. Formalism (domeniu, variabile, criterii, restricții) .....	53	13
3.3. Tehnici de optimizare .....	56	14
3.4. Algoritmul metodei de optimizare holistică.....	65	14
3.5. Acțiuni pentru evaluarea activității curente.....	70	16
<b>Capitolul 4. Metodă de identificare structurală a procesului de fabricație</b> .....	71	17
4.1. Nivelurile procesului de fabricație .....	72	17
4.2. Identificarea activităților de la fiecare nivel al procesului .....	76	18
4.3. Variantele de realizare a activităților .....	78	19
4.4. Concluzii privind metoda de identificare structurală a procesului de fabricație .....	80	20
<b>Capitolul 5. Metodă de identificare cauzală a procesului de fabricație</b> .....	81	21
5.1. Considerații generale.....	82	21
5.2. Algoritmul metodei de identificare cauzală.....	86	23

5.3. Identificarea procesului.....	87	24
5.4. Concatenarea datelor.....	87	24
5.5. Combinarea cazurilor.....	88	24
5.6. Identificarea legăturilor cauzale.....	89	25
5.6.1. Reducerea dimensionalității problemei.....	91	26
5.6.2. Evaluarea capacității de modelare a variabilelor-cauză.....	92	27
5.7. Gruparea variabilelor.....	94	30
5.7.1. Algoritm pentru generarea de seturi cu mai puține variabile.....	95	30
5.7.2. Algoritm de evaluare a capacității de modelare a seturilor de variabile..	95	30
5.8. Arborele legăturilor cauzale.....	97	32
5.9. Concluzii privind metoda de identificare cauzală a procesului de fabricație.....	98	32
<b>Capitolul 6. Metodă de evaluare comparativă a variantelor procesului de fabricație.....</b>	<b>99</b>	<b>33</b>
6.1. Problema de evaluare comparativă.....	100	33
6.2. Algoritmul metodei de evaluare comparativă.....	101	34
6.3. Procedură pentru delimitarea vecinătății.....	102	35
6.4. Procedură pentru modelarea apropierii.....	104	36
6.5. Concluzii privind metoda de evaluare comparativă a procesului de fabricație	104	36
<b>Capitolul 7. Validare experimentală.....</b>	<b>105</b>	<b>37</b>
7.1. Identificare structurală în cazul fabricării unui rulment.....	106	37
7.2. Identificare cauzală și evaluare comparativă în cazul strunjirii unei piese cilindrice – baza de date generată artificial.....	107	39
7.3. Identificare cauzală și evaluare comparativă în cazul strunjirii unui inel de rulment – baza de date colectate din mediul industrial.....	120	50
7.4. Identificare cauzală și evaluare comparativă la primirea unei comenzi – baza de date colectate din mediul industrial.....	127	-
<b>Capitolul 8. Concluzii finale și contribuții originale.....</b>	<b>134</b>	<b>53</b>
<b>Lista de lucrări științifice.....</b>	<b>142</b>	<b>57</b>
<b>Bibliografie.....</b>	<b>143</b>	<b>59</b>

**Cuvinte cheie:** *optimizare, holistic, proces de fabricație, planificare dinamică, evaluare comparativă, modelare, baze de date, performanța fabricației, indicatori de performanță, capacitate de modelare, identificare structurală, identificare cauzală.*

## Introducere

Obiectivul general al studiilor întreprinse în această teză a fost cercetarea în vederea elaborării unui nou concept referitor la optimizarea procesului de fabricație – optimizarea holistică, precum și a dezvoltării unor metode originale care să permită implementarea acestui concept în practică.

Conceptul de *optimizare holistică* a fost dezvoltat în legătură directă cu cerințele de optimizare a proceselor de fabricație. Optimizarea holistică presupune, în general, reluarea acțiunii de optimizare la niveluri succesive, ori de câte ori este necesar și anume de fiecare dată când trebuie luate noi decizii.

În viziunea prezentată în această teză, „optimizarea holistică” se caracterizează prin aceea că:

- *Zona de optimizare* acoperă întregul ciclu de viață al obiectului de optimizare. Când acest obiect este procesul de fabricație, ciclul de viață este cuprins între comanda produselor (de către client) și livrarea produsului (către client).
- *Obiectivul optimizării* este abordarea concomitentă a tuturor aspectelor optimizării, și anume: cea mai bună formalizare a problemei de optimizare, cea mai bună instrumentare pentru evaluarea poziției unei soluții potențiale în raport cu obiectivul optimizării, precum și cea mai bună soluție pentru problema optimizării.
- *Acțiunea de optimizare holistică* constă, în cazul procesului de fabricație, în asigurarea optimizării permanente a fluxului de decizii prin care un proces de fabricație în curs de desfășurare este controlat.

Obiectivele specifice au constat în:

- extinderea domeniului de optimizare la întreg ciclul de viață a procesului de fabricație (de la comanda produselor până la livrarea produsului);
- redefinirea scopului optimizării, urmărind cea mai bună formulare a problemei, cea mai bună instrumentare a evaluării, cea mai bună soluție pentru cererea de optimizare, conform unui criteriu/set de criterii predefinit;
- modificarea caracterului optimizării – caracter dinamic prin posibilitatea reconsiderării acesteia în orice etapă a procesului de fabricație și, în același timp caracter flexibil prin posibilitatea schimbării formatului problemei de optimizare și a funcției-obiectiv;
- redefinirea spațiului de optimizare, luând în considerare relațiile cauzale dintre variabilele problemei de optimizare;
- înlocuirea modelării analitice a procesului de fabricație cu o modelare cauzală;
- utilizarea evaluării comparative pentru selectarea soluției optime.

Teza de doctorat este structurată pe opt capitole, astfel:

- În **capitolul 1**, intitulat **”Stadiul actual privind optimizarea procesului de fabricație”**, este realizată documentarea stadiului actual privind abordări ale problemelor de optimizare a performanței proceselor de fabricație în urma studierii literaturii tehnice, a lucrărilor științifice și a tezelor de doctorat din acest domeniu.
- În **capitolul 2**, intitulat **”Obiectivele tezei și direcții de cercetare”**, sunt evidențiate câteva neajunsuri în tratarea problemei optimizării procesului de fabricație, este propusă o reconsiderare a conceptului de optimizare a procesului de fabricație prin direcții de cercetare și sunt prezentate obiectivele cercetării.

- În **capitolul 3**, intitulat ”**Conceptul metodologiei de optimizare holistică a procesului de fabricație**”, este prezentat conceptul de *optimizare holistică* în legătură directă cu cerințele de optimizare a proceselor de fabricație și sunt identificate trăsăturile-cheie care descriu optimizarea holistică, prin referire la optimizarea convențională. Conform conceptului de optimizare holistică, în acest capitol este propusă o metodă originală pentru optimizarea procesului de fabricație.
- În **capitolul 4**, intitulat ”**Metodă de identificare structurală a procesului de fabricație**”, este dezvoltată o metodă care permite o structurare a activităților aferente acestuia, la toate nivelurile implicate (contractare, planificarea producției, proiectarea produselor planificarea proceselor și prelucrarea produselor), prin elaborarea arborelui de activități specifice (evidențind relațiile între etapele procesului de fabricație și circuitul informațional aferent) și identificarea variantelor de desfășurare a procesului de fabricație de la nivelul fiecărei activități de fabricație. Metoda urmărește selectarea celor mai bune variante la fiecare nivel al activității de fabricație, în funcție de diferite criterii de optimizare (cum ar fi, spre exemplu costul, timpul de prelucrare, consumul de energie, alt consum critic, sau combinații ale acestora).
- În **capitolul 5**, intitulat ”**Metodă de identificarea cauzală a procesului de fabricație**” este dezvoltată o metodă ce permite furnizarea unor forme multiple pentru una și aceeași relație cauzală. Metoda este concepută cu scopul de a fi aplicată în cazul optimizării holistice a procesului de fabricație, înainte de evaluarea comparativă a rezultatelor activităților care pot fi selectate la nivelul unui punct de decizie din graful aferent unui proces de fabricație. Metoda permite identificarea celui mai potrivit set de variabile-cauză, pe baza căruia poate fi evaluată o variabilă-efect, în funcție de condițiile specifice unui proces de fabricație anume. Aplicarea metodei are ca finalitate elaborarea *arborelui de legături cauzale*.
- În **capitolul 6**, intitulat ”**Metodă de evaluare comparativă a variantelor procesului de fabricație**”, este dezvoltată o metodă care propune o abordare inovativă în analiza soluțiilor potențial optimale, bazată pe ierarhizarea acestora. Metoda este concepută pentru a asista selectarea variantei optime de continuare a unui proces de fabricație, la un anumit nivel de decizie. Evaluarea comparativă a alternativelor potențiale se face prin raportarea acestora la cazurile de procese de fabricație deja efectuate. Aplicarea metodei de evaluare comparativă se face după identificarea cauzală aferentă, respectiv după adoptarea unui set de variabile-cauză care descriu variabila-efect de interes în momentul curent, prin aplicarea metodei prezentate în capitolul anterior.
- În **capitolul 7**, intitulat ”**Validare experimentală**”, este validată metoda de optimizare holistică a procesului de fabricație prin intermediul unor experimente numerice, derulate sub formă de studii de caz: *i*) identificare structurală în cazul fabricării unui rulment, *ii*) identificare cauzală și evaluare comparativă pentru costul unei operații de strunjire - bază de date generată artificial, *iii*) identificare cauzală și evaluare comparativă pentru timpul de prelucrare a unui inel de rulment - bază de date colectate din mediul industrial și *iv*) identificare cauzală și evaluare comparativă pentru costul de fabricație a unui rulment - bază de date colectate din mediul industrial.
- În **capitolul 8**, intitulat ”**Concluzii finale și contribuții originale**”, sunt evidențiate contribuțiile originale ale autoarei tezei, sunt prezentate concluziile finale ale tezei de doctorat și sunt conturate câteva direcții viitoare de valorificare și aprofundare a cercetărilor prezentate în teză.
- Lucrarea se încheie cu o enumerare a referințelor bibliografice utilizate, precum și lista lucrărilor publicate și prezentate la manifestări științifice.

## Capitolul 1

### Stadiul actual privind optimizarea procesului de fabricație

În cadrul acestui capitol a fost dezvoltată o analiză sistematică cu privire la formularea și rezolvarea problemelor de optimizare în general și a celor referitoare la procesul de fabricație, în special. Stadiul actual privind abordări ale problemelor de optimizare a performanței proceselor de fabricație a fost dezvoltat pe baza studierii literaturii tehnice, a lucrărilor științifice și a tezelor de doctorat din acest domeniu.

Analiza bibliografiei a fost dezvoltată pe următoarele direcții:

- formatul problemei de optimizare (de ex. uni-criterială sau multi-criterială);
- funcția obiectiv (spre ex. productivitatea, costurile de producție, rugozitatea suprafeței fabricate, mărimea forței de așchiere a metalului, consumul de energie, etc.);
- metodele de rezolvare (spre ex. Algoritmi genetici GA, Rețele neuronale artificiale ANN, metode bazate pe roiul de particule PSO, metode bazate pe modelul coloniei de furnici ACO, metode bazate pe logica fuzzy LF, metode de tip combinatoric, etc.).

De asemenea, au fost analizate rezultatele cercetărilor referitoare la:

- planificarea („planning”-ul) proceselor de fabricație;
- optimizarea alocării resurselor („scheduling”-ul) proceselor de fabricație.

#### 1.1. Problema optimizării

Optimizarea este, în esență, o opțiune științifică, care constă în elaborarea și trierea sistematică a soluțiilor posibile ale unei probleme ingineresti. Scopul final al optimizării este selectarea acelei soluții care, în limitele unui cadru de referință definit prin condițiile admise sau impuse inițial, conduce la folosirea cea mai avantajoasă a resurselor de care se dispune pentru materializarea ei.

*Problema de optimizare* reprezintă o aplicație matematică de selectare a unei soluții, dintr-o mulțime posibilă, pe baza evaluării funcției (funcțiilor) obiectiv.

Din punct de vedere matematic, o problemă de optimizare conține trei componente, [1]:

- o funcție obiectiv,  $f(X)$ , care urmează să fie minimizată sau maximizată:

$$\min, \max f(X), X \in R^m \quad (1.1)$$

- variabilele vectorului  $X$ :

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (1.2)$$

- restricții ce vor fi respectate, de forma:

$$g(X) \leq 0, \text{ restricții de inegalitate} \quad (1.3)$$

$$h(X) = 0, \text{ restricții de egalitate} \quad (1.4)$$

Necesitatea optimizării proceselor de fabricație este justificată de existența unei mari varietăți de metode și procedee tehnologice, dintre care se impune selectarea celei care corespunde cel mai mult unui anumit criteriu.

Multe probleme reale necesită mai degrabă o soluție optimă decât o simplă soluție. Întrucât problemele de decizie necesită un răspuns da/nu, problemele de optimizare necesită găsirea celei mai bune soluții, diferențiind soluțiile posibile.

### 1.1.1. Optimizarea uni-criterială

Prin optimizare se caută să se minimizeze (sau maximizeze) o funcție obiectiv de forma, [2]:

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_p) = f(x_1, x_2, \dots, x_p) \rightarrow \min, \max. \quad (1.5)$$

În cazul unei probleme de optimizare din domeniul fabricației,  $f$  - poate fi productivitatea, costul, rugozitatea suprafeței fabricate, mărimea forței de așchiere, consumul de energie etc.

Optimizarea uni-criterială a fost abordată în literatura de specialitate, spre exemplu, în lucrările [3], [4]. Pentru rezolvarea acestei probleme în lucrările [5], [6] sunt prezentate metode deterministe, stochastice, heuristice și metaheuristice standard.

### 1.1.2. Optimizarea multi-criterială

Optimizarea multi-criterială (numită și optimizare multi-obiectiv, optimizare multi-performanță, sau optimizare Pareto) este o zonă de luare a deciziilor cu multiple criterii, poate fi definită ca problema găsirii unui vector al variabilelor de decizie care satisface restricțiile și optimizează vectorul obiectiv, ale cărui elemente reprezintă funcțiile obiectiv, [2].

Conceptul „Pareto”, numit după Vilfredo Pareto (1848-1923), inginer și economist italian, care a folosit conceptul în studiile sale privind eficiența economică și distribuția veniturilor, [7]. În figura 1.1 este prezentată curba Pareto (în roșu), pentru o problemă de minimizare cu două obiective ( $f_1, f_2$ ). Se dorește a se identifica acei indivizi care minimizează ambele obiective  $f_1$  și  $f_2$ . Oricare doi indivizi de pe curba Pareto (A, B) sunt non-dominați, [8].

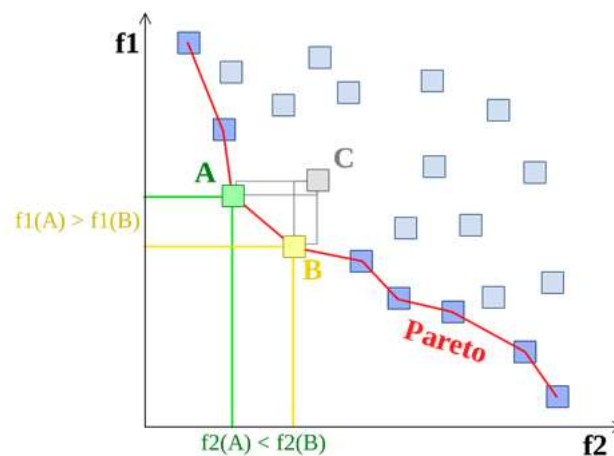


Figura 1.1. Front Pareto [8]

Metodele de optimizare multi-obiectiv pot fi grupate în patru clase: metode fără preferințe, metode a-priori, metode a-posteriori și metode interactive [9].

Optimizarea multi-criterială a fost abordată în literatura de specialitate, spre exemplu, în lucrările [10], [11].

### 1.1.3. Optimizarea multi-nivel

În multe procese decizionale există o ierarhie a factorilor de decizie și deciziile sunt luate la diferite niveluri. Optimizarea multi-nivel se concentrează pe întreaga structură ierarhică. În ceea ce privește modelarea, domeniul restricțiilor asociate unei probleme de optimizare multi-nivel este implicit determinat de o serie de probleme de optimizare care trebuie rezolvate într-o secvență predeterminată.



### Optimizarea holistică a procesului de fabricație

Problemele de optimizare multi-nivel, în general, sunt programe matematice care au un subset al variabilelor constrânse să fie o soluție optimă pentru „alte programe” parametrizate de variabile rămase.

Spre exemplu, o problemă de optimizare bi-nivel poate fi definită ca:

$$\min_{x \in X, y \in Y} F(x, y) \quad (1.6)$$

în care:  $y \in \arg \min_{z \in Y} f(x, z)$ ;  $F, f : R^{n_x} \times R^{n_y}$ ,  $X \subseteq R^{n_x}$ ,  $Y \subseteq R^{n_y}$ .

Problemele de optimizare multi-nivel sunt greu de rezolvat, [12]. O metodă de rezolvare este aceea de a reformula problemele de optimizare multi-nivel în probleme de optimizare pentru care sunt disponibili algoritmi de soluție robuști.

Metodele evolutive [13], deși necesită o mare capacitate computațională, ar putea fi un instrument alternativ pentru a compensa unele dintre aceste dificultăți și pentru a duce la o soluție optimă (aproximativă).

#### 1.1.4. Optimizarea multi-etapă

Optimizarea multi-etapă, generalizează optimizarea standard prin modelarea problemelor de decizie ierarhică, care implică procese decizionale succesive/multiple.

Problema canonică care trebuie rezolvată, în cazul minimizării este:

$$\min_{x, y} \left( \sum_{t=1}^T f_t(x_t, y_t) : (x_{t-1}, x_t, y_t) \in X_t, \forall t \right) \quad (1.7)$$

în care:  $t$  - înseamnă etapa temporală care aparține unui set de etape de timp  $T$ ,  $x_t$  - variabile condiție și  $y_t$  - variabile locale/etape.

Acest tip de problemă poate fi rezolvat prin algoritmul „branch and bound” („ramifică și delimitează”), [14] și tehnica Benders, [15].

## 1.2. Tehnici moderne de optimizare

În tabelul 1.1 este prezentată o sinteză a studiului privind aplicarea tehnicilor moderne de optimizare în rezolvarea problemei de optimizare a proceselor de fabricație, conform literaturii de specialitate.

Tabelul 1.1. Sinteza studiului privind aplicarea tehnicilor moderne de optimizare

<b>Tehnici moderne de optimizare</b>	<b>Referință bibliografică</b>
Algoritmi genetici GA	[16]–[22]
Rețele neuronale artificiale ANN	[23]–[25]
Tehnici bazate pe roiul de particule PSO	[18], [26]–[29]
Tehnici bazate pe modelul coloniei de furnici ACO	[26], [30]–[34]
Tehnici bazate pe logica fuzzy LF	[31], [35]–[37]
Tehnici de tip combinatoric	[38]

### 1.2.1. Tehnici bazate pe algoritmi genetici

Algoritmii genetici (GA) joacă un rol important în rezolvarea problemelor de optimizare. GA fac parte din categoria algoritmilor evolutivi, utilizând operațiunea de selecție („*selection*”), operatorii de mutație („*mutation*”), de încrucișare („*crossover*”) sau de recombinare („*recombination*”) și conceptele de populație, individ, moștenire genetică și supraviețuirea indivizilor puternici pentru găsirea soluției optime (figura 1.2), [39].

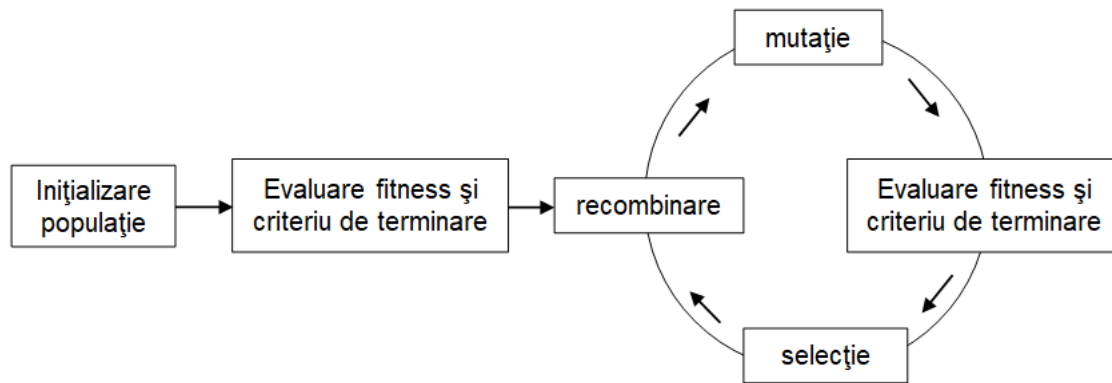


Figura 1.2. Etapele unui GA [39]

### 1.2.2. Tehnici bazate pe rețele neuronale artificiale

Rețelele neuronale artificiale (ANN) sunt parte din știința *inteligenței artificiale* (IA), întâlnită în literatura de specialitate sub denumirea de *rețele neuronale*. ANN reprezintă o metodă generică de reprezentare a relațiilor de intrare și de ieșire prin mai multe straturi interconectate a grupurilor de neuroni artificiali, [40].

Elementul de baza al unei ANN este *neuronul*. Funcția de bază a *neuronului artificial*, este că, folosind o schemă, să adune intrările într-un anumit mod și să producă o ieșire, dacă suma respectivă depășește un anumit prag. Neuronii (elemente de procesare) sunt aranjați pe straturi (unități) și legați prin conexiuni sinaptice, caracterizate de anumite ponderi (figura 1.3).

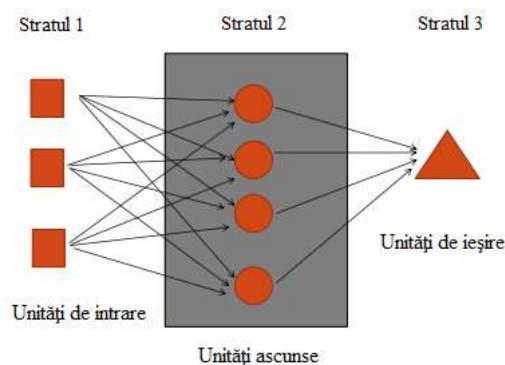


Figura 1.3. Structura unui ANN [40]

### 1.2.3. Tehnici bazate pe modelul roiului de particule

Modelul de inspirație al acestei clase de algoritmi (PSO) este cel al comportamentului stolurilor de păsări, respectiv al bancurilor de pești, [41]. Tehnica PSO poate fi definită ca o procedură de rezolvare a problemelor de optimizare prin imitarea proceselor naturale observate la nivelul comportamentului roiurilor de particule. Evoluția spectaculoasă și rapidă a tehnicii PSO este datorată simplității modelului propus și a rezultatelor bune pe care le oferă. Principiul de bază este acela că fiecare individ al populației își stabilește strategia de deplasare atât pornind de la experiența proprie cât și de la experiența întregii populații. Elementul cheie îl reprezintă partajarea informației în cadrul populației.

### 1.2.4. Tehnici bazate pe modelul coloniei de furnici

Optimizarea pe baza modelului coloniei de furnici (ACO) este o direcție relativ nouă a Calculului Natural, având ca și punct de pornire modelul biologic al coloniilor de furnici.

Metaeuristica a fost propusă de M. Dorigo și reprezintă o alternativă viabilă în abordarea problemelor de optimizare combinatorică prin identificarea traseelor optime, a problemelor de planificare a activităților și ordonare secvențială, [42].

Primul algoritm ACO, sub denumirea Ant System, a fost aplicat pentru rezolvarea problemei comis-voiajorului.

### 1.2.5. Tehnici bazate pe logica fuzzy

Logica fuzzy este o formă de logică multi-valorică derivată din setul teoretic fuzzy, folosită pentru concluzionarea unor propoziții ale căror valoare de adevăr este mai mult aproximativă decât precisă.

Conceptul de „mulțime fuzzy” a fost introdus în anul 1965 de Lotfi A. Zadeh în revista “Information and Control” cu scopul de a modela caracterul imprecis al apartenenței, metoda a fost numită *fuzzy* după „clasele care nu au granițe precis delimitate”, [43].

### 1.2.6. Tehnici de tip combinatoric

Optimizarea combinatorică este un subset de optimizare matematică, care este legată de operațiunile de cercetare, teoria algoritmilor și teoria complexității computaționale. Ea are aplicații importante în mai multe domenii, printre care inteligența artificială, învățare automată, matematică și inginerie software, [44].

## 1.3. Performanța fabricației

În funcție de problematica abordată, cercetările referitoare la optimizarea proceselor de fabricație se pot încadra într-una din următoarele două mari categorii: *planificarea proceselor de fabricație* și *alocarea resurselor proceselor de fabricație*.

### 1.3.1. Planificarea proceselor de fabricație

În cadrul companiilor de fabricație, după primirea unei comenzi de realizare a unui anumit produs și acceptul acesteia pentru producție, prima acțiune care trebuie făcută, este aceea de *planificare a proceselor de fabricație*. Pentru a se desfășura producția comenzii, este nevoie de existența unui *plan*. Planul este un ansamblu coerent de obiective ce trebuie îndeplinite, pentru fiecare obiectiv prevăzându-se acțiunile ce contribuie la atingerea lui și resursele necesare (umane, materiale, financiare, informaționale, timp).

➤ Conform lucrării [45], planificarea proceselor de fabricație implică efectuarea următoarelor acțiuni succesive: selectare, programare și analiză.

*Selectarea* presupune că, pornind de la *comanda* pentru produs, acesta este descompus (la primul nivel) în *elemente componente* care trebuiesc fabricate, pentru fiecare *element component* identificându-se *succesiunea de operații* necesare pentru a-l produce (al doilea nivel) figura 1.4. După descompunerea *comenzilor*, procedurile de prelucrare considerate disponibile în atelier în vederea fabricației produsului sunt inventariate. Algoritmul metodologic potrivit căruia se desfășoară procesul se numește *procedură de prelucrare*.

### Stadiul actual privind optimizarea procesului de fabricație

Un proces de fabricație elementar rezultă prin asocierea între o operație sau un grup de faze aparținând aceleleași operații și o procedură prin care aceasta să poată fi realizată. Un plan de operații rezultă prin înscrierea într-o ordine bine determinată a proceselor de fabricație elementare necesare în vederea fabricației unei piese. Scopul *selectării* este acela de a genera un set de planuri de operații sub-optimale.

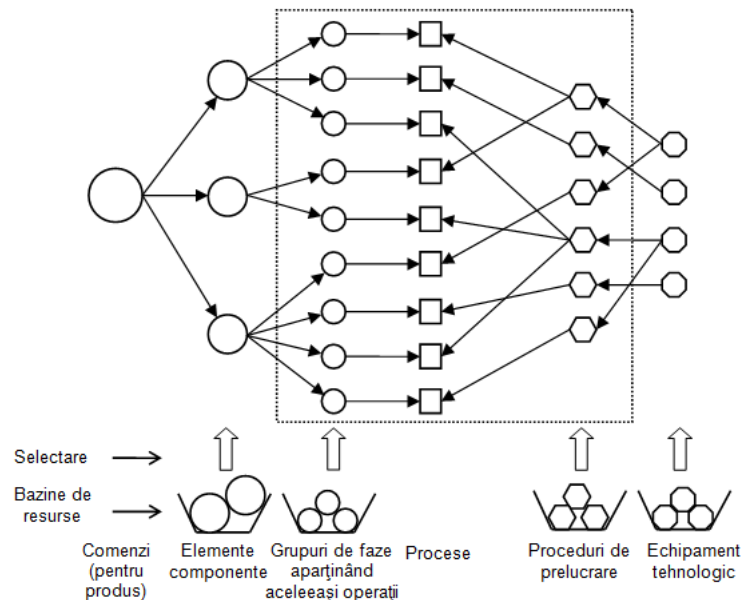


Figura 1.4. Graf ilustrând o variantă generică a procesului de planificare [45]

*Programarea* constă în stabilirea condițiilor reale de implementare a planurilor selectate, și anume valorile pentru toți parametrii procedurilor implicate, precum și configurarea echipamentului tehnologic alocat în acest scop.

*Analiza* are drept scop de a alege planul optim, după criteriul de performanță luat în considerare. Acest lucru se poate face o dată pentru totdeauna, înainte de a începe fabricația, sau de-a lungul realizării comenzii, în funcție de circumstanțele reale. A doua opțiune ia în considerare posibile modificări ale condițiilor de fabricație, ceea ce poate conduce la situația în care un alt plan sub-optim devine optim, în loc de cel ales anterior.

### 1.3.2. Alocarea resurselor proceselor de fabricație

Alocarea resurselor este procesul de organizare controlată și optimizare a muncii și sarcinilor într-un proces de fabricație. Eșalonarea este utilizată pentru alocarea resurselor întreprinderii, a mașinilor unelte, a resurselor umane, pentru planificarea proceselor de producție și a aprovizionării cu materii prime și materiale, [46].

Alocarea resurselor proceselor de fabricație constă în defalcarea planului de operații pe verigile structurale elementare (secții, ateliere, locuri de muncă) și pe perioade scurte (luni, decade, zile, schimburi, ore) în condițiile utilizării cât mai eficiente a resurselor. Eșalonarea alocării resurselor face posibilă determinarea timpului și datei de începutul și de sfârșitul a operațiilor. Ora și data de fabricație fiecărei componente este fixată în așa fel încât asamblarea pentru produsul final nu este întârziată în nici un fel.

Alocarea resurselor proceselor de fabricație realizează o eșalonare a prelucrării care să concorde cu capacitatea de producție.

## 1.4. Cercetări privind optimizarea planificării fabricației

În cercetările existente referitoare la optimizarea planificării fabricației, au fost adoptate diferite obiective, cum ar fi: *productivitatea, costurile de producție, rugozitatea suprafeței fabricate, mărimea forței de așchiere a metalului și performanța energetică.*

➤ Lucrarea [47] are ca obiectiv determinarea *ratei maxime a productivității* atunci când în cazul unei prelucrări este utilizată o singură sculă pe o mașină-unealtă automată. Autorii au dezvoltat o expresie analitică pentru funcția de dependență a ratei productivității relativ la modificările posibile ale capacității de așchiere a sculei așchietoare. Lucrarea [48] abordează *minimizarea timpului de producție* într-un proces de așchiere. Au fost determinați parametrii optimi de prelucrare în cazul prelucrării unui profil continuu în raport cu timpul de producție.

➤ Lucrarea [49] descrie optimizarea proceselor de prelucrare având ca obiectiv *costul minim* în cazul unui proces de strunjire. Prin utilizarea tehnicii GA au fost determinați parametrii optimi de prelucrare (viteza de așchiere și avansul). Lucrarea [50] abordează optimizarea proceselor de producție având în vedere minimizarea funcției obiectiv a *costului de producție* în cazul unui proces de strunjire cu mai multe treceri. Tehnica PSO a fost utilizată pentru optimizare, acestea fiindu-i asociată tehnica „Simulated Annealing” SA.

➤ Lucrarea [51] tratează optimizarea pentru *etapa de programare* a planificării, autorii au avut ca obiectiv determinarea parametrilor optimi ai funcției obiectiv care urmărește *minimizarea rugozității suprafeței prelucrate (Ra) și a vibrațiilor (Vb)*. Autorii au folosit o combinație între metoda suprafețelor de răspuns (RSM) și metoda Taguchi (TM) pentru determinarea parametrilor, în cazul unei operații de rectificare cilindrică exterioară pe o mașină de rectificat CNC.

➤ Lucrarea [52] tratează optimizarea pentru *etapa de programare* a planificării. Autorii au avut ca obiectiv determinarea valorilor optime a parametrilor de așchiere pentru minimizarea funcției obiectiv - *forța principală de așchiere*. A fost dezvoltat un model a forței principale de așchiere în timpul unui proces de strunjire, prin utilizarea tehnicii RSM cât și a metodei GA pentru optimizarea parametrilor de așchiere.

➤ Lucrarea [53] tratează optimizarea pentru *etapa de selecție* a planificării, autorii având ca obiectiv obținerea unui *consum minim de energie*. Lucrarea [54] tratează optimizarea pentru *etapa de selecție* a planificării, autorii au avut ca obiectiv *minimizarea consumului de energie*. Este prezentat un studiu experimental privind optimizarea parametrilor procesului de așchiere, în scopul de a obține cea mai mică valoare a energiei consumate de către o mașină unealtă. A fost folosită tehnica Robust Design pentru determinarea efectelor parametrilor.

Pe lângă abordările prezentate mai sus, în care optimizarea este uni-criterială, există și cercetări care abordează optimizarea multi-criterială a planificării proceselor de fabricație.

➤ Lucrarea [55] abordează *optimizarea multi-criterială* în ceea ce privește obiectivele: *rata de îndepărtare a materialului (MRR), rugozitatea suprafeței prelucrate (SR) și consumul de energie (CE)*, în cazul unui proces de frezare. Parametrii de așchiere luați în considerare au fost: viteza de rotație, viteza de avans, adâncimea de așchiere și lungimea de așchiere. Pentru a optimiza parametrii de așchiere, autorii au stabilit relații între variabilele de referință și variabilele de intrare, au folosit RSM pentru a construi modelul de regresie.

➤ Lucrarea [56] abordează *optimizarea multi-criterială* în ceea ce privește obiectivele: *consumul de energie* reflectat prin emisiile de carbon, *timpul de prelucrare și costurile de prelucrare*. Este prezentat un model matematic în care o metodă de optimizare a parametrilor de prelucrare a fost propusă în cazul unui proces de așchiere cu mai multe treceri. Modelele de prelucrare prin strunjire cu mai multe treceri au fost optimizate cu algoritmul MOTLBO.

## 1.5. Cercetări privind optimizarea alocării resurselor necesare fabricației

În lucrările de cercetare existente, au fost luate în considerare diferite obiective, cum ar fi:  *timpul de finalizare a unei comenzi, consumul de energie, costul de producție și timpul total de așteptare și de întârziere.*

- Lucrarea [57] abordează probleme de optimizare dinamică a eșalonării alocării punctelor de lucru în vederea *minimizării timpului de finalizare a unei comenzi.* Au fost generate diverse probleme care includ numărul punctelor de lucru, numărul mașinilor unelte, și au fost efectuate diferite experimente numerice în vederea dezvoltării unei metodologii hibride a GA. Problema dinamică a eșalonării alocării punctelor de lucru este de fapt o problemă de optimizare combinatorică în care la începerea programului sunt programate  $n$  puncte de lucru și după începerea programului apare un set  $n'$  de noi puncte de lucru, prevăzute cu  $m$  mașini unelte.
- În lucrarea [22] a fost stabilit un model matematic a eșalonării alocării resurselor producției, în ceea ce privește *minimizarea consumului total de energie.* Modelul matematic este bazat pe un algoritm de evoluție diferențial auto-adaptiv DE. Pentru a îmbunătăți rezultatele acestui algoritm autorii au folosit parametrii factorului de proporționalitate (F) și probabilitatea încrucișării (CR). Lucrarea [18] tratează optimizarea eșalonării alocării resurselor proceselor de fabricație în ceea ce privește *minimizarea consumului de energie și a timpului de finalizare a unei comenzi.* Autorii abordează modificarea unui program stabilit pentru sarcinile dintr-un atelier de lucru, în cazul în care mașini-unelte pot lucra la viteze de așchiere diferite păstrând în același timp alocarea inițială și secvența de prelucrare a operațiilor fixe (figura 1.5).

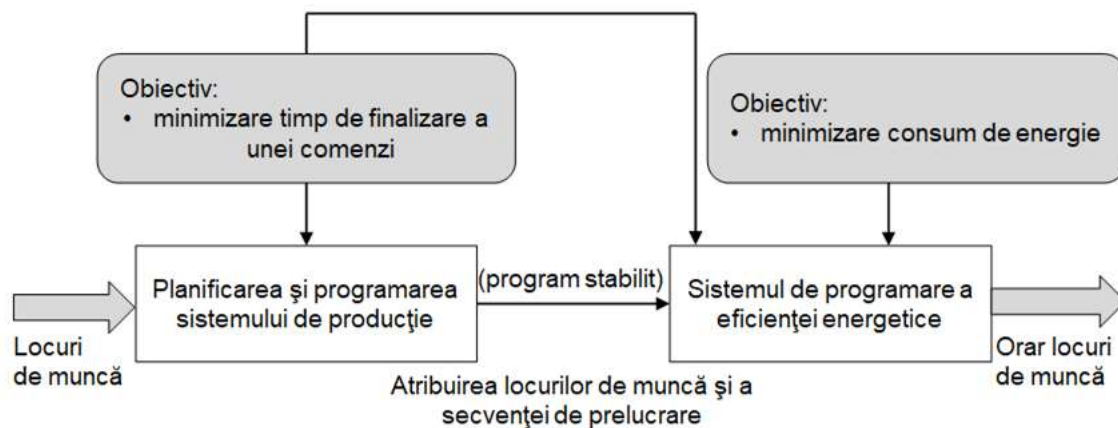


Figura 1.5. Program stabilit luând în considerare consumul de energie [18]

- Lucrarea [58] abordează problema de optimizare a eșalonării alocării resurselor locurilor de muncă, având ca funcții obiectiv: *minimizarea costului total de fabricație și minimizarea timpului de prelucrare.*

## 1.6. Cercetări privind optimizarea integrată a fabricației

- În lucrarea [59] a fost propus un model matematic cu privire la *eficiența energetică* pentru atelierele de lucru și timpul de prelucrare, care integrează procesul de planificare și de eșalonare a alocării resurselor locurilor de muncă (EIPPS). Autorii au adoptat un GA modificat pentru a obține soluția optimă modelului. Legătura dintre funcțiile planificării și a eșalonării alocării resurselor procesului se menține prin operațiile sarcinilor (figura 1.6).

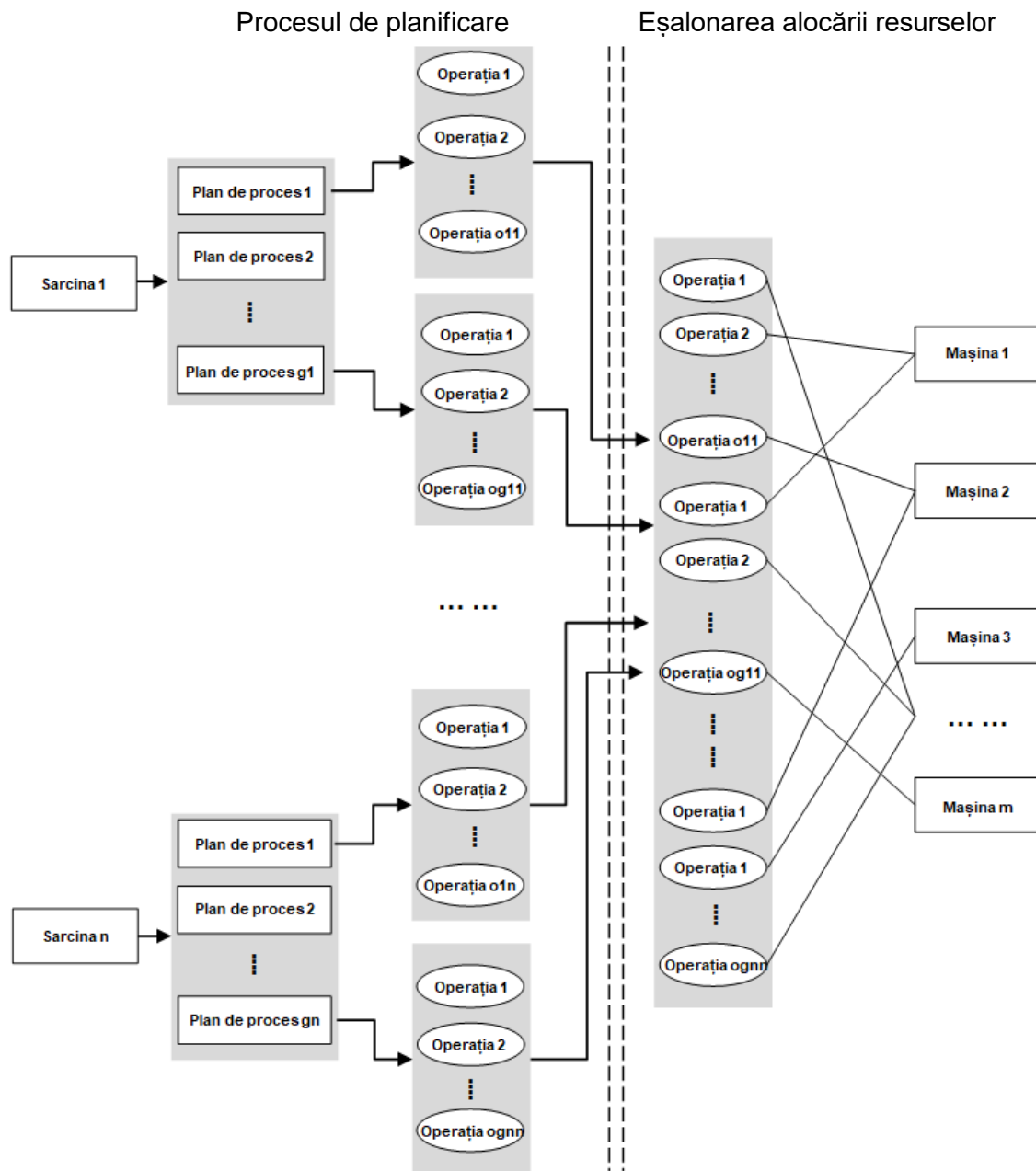
*Optimizarea holistică a procesului de fabricație*

Figura 1.6. Integrarea planificării și eșalonarea alocării resurselor procesului [59]

Modelul matematic de realizare a unui program de integrare mixt multi-obiectiv: *minimizarea consumul total de energie ( $f_1$ ) și minimizarea timpului de finalizare a unei comenzi ( $f_2$ ).*

➤ În lucrarea [60] este stabilit și formulat un model matematic care încorporează selectarea mașinilor și secvențele operațiilor în procesul de planificare și determinarea eșalonării alocării locurilor de muncă IPPS. A fost dezvoltat un algoritm îmbunătățit IGA cu noi metode inițiale de selecție pentru planurile de proces și cu noi reprezentări genetice pentru planul de eșalonare a alocării resurselor acesta fiind combinat cu planurile de proces și cu metoda operatorului genetic pentru îmbunătățirea performanțelor algoritmul și pentru a optima IPPS în vederea minimizării timpului de prelucrare și a debitului mediu a măsurilor de performanță de timp.

## 1.7. Concluzii referitoare la stadiul actual privind optimizarea procesului de fabricație

În urma analizei bibliografiei, atât din țară, cât și din literatura de specialitate internațională, cu privire la tematica abordată în cadrul tezei și anume, optimizarea procesului de fabricație, se pot formula următoarele concluzii, pe baza cărora se vor contura direcțiile de cercetare urmărite în continuare:

1. Există o cantitate impresionantă de studii și cercetări în domeniu, care au avut în vedere diferite obiective legate de procesele de fabricație, soluțiile fiind dezvoltate pe baza unei mari varietăți de metode/tehnici de optimizare.
2. Optimizarea proceselor de fabricație a urmărit o multitudine de aspecte, fie acestea tehnice, financiare, comerciale, economice, de mediu, sau de altă natură.
3. Abordarea problemei de optimizare a fost făcută, de multe ori pe baza unui singur criteriu de optimizare (derivat din obiectivele enumerate mai sus), cu toate că mediul real de fabricație este complex și poate fi supus optimizării după mai multe criterii de optimizare. Există totuși suficiente studii care au luat în considerare obiective multiple (optimizare multi-criterială), fără ca modul în care acestea au fost asociate să fie unitar.
4. Cele mai întâlnite criterii de optimizare sunt: *productivitatea, costurile de producție, rugozitatea suprafeței fabricate, mărimea forței de așchiere a metalului, consumul de energie etc.*
5. Cele mai multe dintre cercetările studiate au utilizat una dintre metodele/tehnicele de optimizare următoare: *Algoritmi genetici; Rețele neuronale artificiale; Roi de particule; Colonie de furnici; Logică fuzzy; Combinatorică.*
6. În unele situații au fost implementate tehnici de optimizare îmbunătățite cum ar fi: *Algoritmi genetici îmbunătățiți, Algoritmi genetici multi-obiectiv, Optimizare hibridă roi de particule, Optimizare bazată pe învățare automată multi-obiectiv*, lucru care a permis identificarea unor soluții optime de calitate superioară în faza de planificare a producției.
7. În multe situații, optimizarea procesului de fabricație se confundă cu optimizarea parametrilor regimului de așchiere. Aceasta se face, de regulă, prin utilizarea unui model analitic al funcției obiectiv.
8. Optimizarea alocării resurselor necesare prelucrării unui produs în cadrul unui atelier/secție de producție poate fi efectuată cu ajutorul unor metode dedicate care urmăresc minimizarea consumului de resurse și a timpului mediu de procesare, respectiv maximizarea productivității.
9. În majoritatea cazurilor planificarea proceselor de fabricație este abordată separat de eșalonarea alocării resurselor proceselor de fabricație.
10. Marea majoritate a lucrărilor existente se referă la optimizarea etapei de execuție propriu-zisă (prelucrării) a produsului.



## Capitolul 2

---

### Obiectivele tezei și direcții de cercetare

Pe baza concluziilor prezentate în capitolul 1, conform cercetărilor existente, se pot evidenția câteva neajunsuri în tratarea problemei optimizării procesului de fabricație:

1. Domeniul de optimizare nu acoperă întregul ciclu de viață al obiectului optimizat. Când acest obiect este procesul de fabricație, ciclul de viață este cuprins între comanda produselor (de către client) și livrarea produsului (către client).
2. Scopul optimizării este definit unilateral/în mod restrâns, referindu-se doar la cea mai bună soluție a problemei de optimizare, conform unui criteriu/set de criterii predefinit.
3. Optimizarea convențională nu este suficient adaptată cerințelor specifice proceselor de fabricație, deoarece:
  - 3.1. Deși un proces trebuie optimizat în integralitatea sa, adesea acest lucru nu este fezabil de la bun început; decizii la niveluri succesive trebuie luate pe parcursul procesului, în timp ce decizia de la un anumit nivel nu poate fi luată înainte de a îndeplini sarcinile de la nivelul precedent;
  - 3.2. Sarcinile îndeplinite pe parcursul unui proces de fabricație (ce include etapele: ofertare-negociere-acceptare comenzi, proiectare produs, planificare procese, programare operații, eșalonare alocare resurse, execuție propriu-zisă) au naturi diferite, ca și exigențe diferite;
  - 3.3. Variabilele-efect care ar trebui utilizate pentru a descrie îndeplinirea unei anumite sarcini de fabricație, nu sunt precizate cu exactitate; mai mult, variabilele descriptive trebuie selectate din rândul unor variabile specifice sarcinii îndeplinite, care nu sunt neapărat independente;
  - 3.4. Relațiile cauzale fie dintre variabilele descriptive, fie dintre un set de variabile descriptive și o variabilă-efect, nu sunt apriori cunoscute;
  - 3.5. Existența unui număr adesea mare de sarcini de fabricație ce trebuie îndeplinite pentru obținerea unui produs conduce la un număr foarte mare de variabile care trebuie monitorizate, dimensionalitatea problemei de optimizare fiind, astfel, prea mare pentru resursele computaționale disponibile în mod curent.

### Direcții de cercetare

Pornind de la neajunsurile arătate mai sus, se propune o reconsiderare a conceptului de optimizare a procesului de fabricație, prin abordarea următoarelor direcții de cercetare:

- extinderea domeniului de optimizare la întreg ciclul de viață a procesului de fabricație, de la comanda produselor, trecând prin planificarea producției, proiectarea produselor, planificarea proceselor și prelucrare produselor, până la livrarea produselor;
- redefinirea scopului optimizării, aceasta urmând să însemne, concomitent: cea mai bună formulare a problemei, cea mai bună instrumentare a evaluării, precum și, evident cea mai bună soluție pentru cererea de optimizare;
- modificarea caracterului optimizării, pentru a-i imprima un caracter dinamic (prin posibilitatea reconsiderării acesteia în orice etapă a procesului de fabricație) și, în același timp flexibil (prin posibilitatea schimbării formatului problemei de optimizare și a funcției-obiectiv);

---

**Obiectivele tezei și direcții de cercetare**

---

- redefinirea spațiului de optimizare, prin luarea în considerare a relațiilor cauzale dintre variabilele problemei de optimizare;
- înlocuirea modelării analitice a procesului de fabricație cu o modelare cauzală;
- utilizarea evaluării comparative pentru selectarea soluției optime.

**Obiectivele cercetării**

În legătură cu reconsiderarea conceptului de optimizare a procesului de fabricație și pentru implementarea acestuia, obiectivele cercetărilor prezentate în cadrul tezei au fost, în mod concret:

- Dezvoltarea conceptului de optimizare holistică a procesului de fabricație și fundamentarea din punct de vedere teoretic prin: precizarea caracterului abordării, definirea formalismului și poziționarea față de optimizarea convențională.
- Dezvoltarea unei metode de planificare optimă dinamică a procesului de fabricație (capabilă să reducă la minimum timpul și efortul consumat pentru luarea unor decizii adaptate condițiilor din piață) și elaborarea unui algoritm de aplicare a acesteia.
- Dezvoltarea unei metode de identificare structurală a procesului de fabricație, (permițând structurarea activităților aferente acestuia, pentru toate etapele implicate, anume: contractare, planificarea producției, proiectarea produselor, planificarea proceselor și prelucrarea produselor), prin elaborarea arborelui de activități specifice (evidențind relațiile între etapele procesului de fabricație și circuitul informațional aferent) și identificarea variantelor de desfășurare a procesului de fabricație de la nivelul fiecărei activități de fabricație.
- Dezvoltarea unei metode de identificare cauzală a procesului de fabricație (permițând evidențierea unor multiple forme pentru una și aceeași relație cauzală, dintre care se poate selecta cea mai potrivită pentru rezolvarea unei probleme de evaluare comparativă), având ca rezultat elaborarea *arborelui legăturilor cauzale* (pentru a da posibilitatea de selectare, de fiecare dată, a setului de variabile-cauză cel mai potrivit pentru modelarea efectului) și elaborarea unui algoritm de aplicare a acestei metode.
- Dezvoltarea unei metode de evaluare comparativă a procesului de fabricație (care să propună o abordare diferită în efectuarea evaluării soluțiilor potențial optime, bazată pe ierarhizarea acestora, criteriile de ierarhizare pot fi, spre exemplu, costul, timpul de prelucrare, energia consumată, etc.) și elaborarea unui algoritm de aplicare a acestei metode.
- Exemplificarea metodei de identificare structurală în cazul fabricării unui rulment, într-un studiu de caz urmărind realizarea grafului traseului de fabricație, incluzând etapele, tehnologiile și pașii decizionali aferenți nivelurilor de identificare.
- Validarea și evaluarea metodei de identificare a legăturilor cauzale și testarea metodei de evaluare comparativă și a algoritmului pentru evaluarea ierarhizării cazurilor în trei studii de caz:
  - cu date generate artificial, în cazul strunjirii unei piese cilindrice, având ca funcție-obiectiv costul prelucrării;
  - cu date reale, extrase din mediul industrial, în cazul strunjirii unui inel de rulment, având ca funcție-obiectiv timpul de prelucrare;
  - cu date reale, extrase din mediul industrial, în cazul fabricării unui rulment, având ca funcție-obiectiv costul acestuia.

## Capitolul 3

### Conceptul metodologiei de optimizare holistică a procesului de fabricație

În cadrul acestui capitol este dezvoltat conceptul de optimizare holistică, în legătură directă cu cerințele de optimizare a proceselor de fabricație și sunt identificate trăsăturile-cheie care descriu optimizarea holistică, prin referire la optimizarea convențională. Conform conceptului de optimizare holistică, în acest capitol este propusă, în principiu, o metodă originală pentru optimizarea proceselor de fabricație. Potrivit acesteia, sunt prezentați pașii algoritmului de „identificare și selectare”.

#### 3.1. Optimizarea holistică – o nouă abordare

În viziunea prezentată aici, „optimizarea holistică” se caracterizează prin aceea că:

- *Zona de optimizare* acoperă întregul ciclu de viață al obiectului de optimizare. Când acest obiect este procesul de fabricație, ciclul de viață este cuprins între comanda produselor (de către client) și livrarea produsului (către client).
- *Obiectivul optimizării* este abordarea concomitentă a tuturor aspectelor optimizării, și anume: cea mai bună formalizare a problemei de optimizare; cea mai bună instrumentare pentru evaluarea poziției unei soluții potențiale în raport cu obiectivul optimizării și cea mai bună soluție pentru problema optimizării.
- *Acțiunea de optimizare holistică* constă, în cazul procesului de fabricație, în asigurarea optimizării permanente a fluxului de decizii prin care un proces de fabricație în curs de desfășurare este controlat.

#### 3.2. Formalism (domeniu, variabile, criterii, restricții)

Formalismul metodei holistice de optimizare este prezentat mai jos, în concordanță cu aspectele evidențiate în tabelul 3.1.

- **Domeniul optimizării** – dacă optimizarea convențională se realizează într-un spațiu euclidian  $R^n$ , format din  $n$  variabile reale, optimizarea holistică se face în interiorul unui spațiu așa-numit „cauzal”  $V^m$  (figura 3.1), format, în general, din  $m$  variabile cauzale și relațiile de dependență dintre acestea.

Pentru a înțelege mai ușor modul în care funcționează optimizarea holistică, în figura 3.1 este prezentat spațiul cauzal al obiectului optimizat.

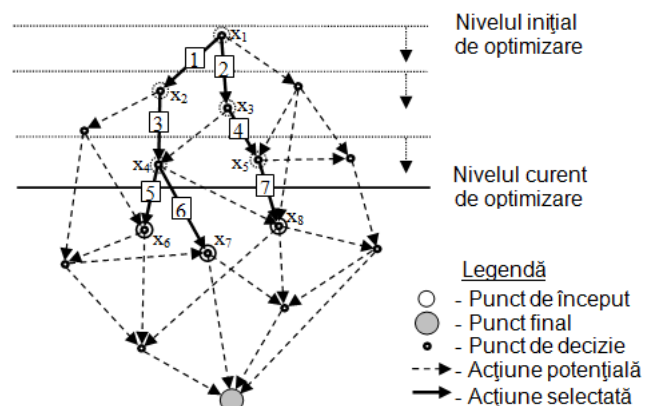


Figura 3.1. Spațiul cauzal al obiectului optimizat

- **Variabilele optimizării** sunt decizii ce urmează a fi luate, referitoare atât la obiectul optimizat, cât și la problema optimizării. Valoarea unei astfel de variabile este o acțiune care trebuie realizată. În cazul optimizării convenționale, variabilele sunt independente și numerice, în timp ce la optimizarea holistică sunt interdependente și logice.

---

**Conceptul metodologiei de optimizare holistică a procesului de fabricație**

---

Variabile interdependente deoarece decizia de luat depinde la un moment dat de deciziile anterioare și determină următoarele decizii. În optimizarea convențională, evaluarea variabilelor-efect este absolută, spre deosebire de aceasta, în optimizarea holistică, evaluarea variabilei-efect este comparativă.

- **Criteriul de optimizare** – așa după cum s-a menționat deja, acesta se poate modifica la fiecare nivel succesiv de optimizare. Spre exemplu, în cazul optimizării holistice a unui proces de fabricație, drept criteriu de optimizare pot fi luate în considerare costul, timpul, energia, sau combinații între acestea. Evident, la un moment dat, pot fi luate în considerare și mai multe criterii concomitent (formatul problemei de optimizare modificându-se de la standard la multi-obiectiv).
- **Restricțiile optimizării** – în afară de restricțiile în conformitate cu teoria optimizării convenționale (referitoare la domeniile în care variabilele se pot situa), în cazul optimizării holistice, se definesc doi parametri restrictivi cu privire la selectarea acțiunilor ce urmează a fi întreprinse, anume nivelurile de admisibilitate și acuratețe. Primul se referă la numărul de acțiuni selectate raportat la numărul total de acțiuni potențiale dintr-un punct de decizie. Al doilea privește pragul de la care trebuie să difere efectele a două decizii, pentru a considera că acestea conduc la efecte diferite.

### 3.3. Tehnici de optimizare

Dintre tehnicile clasice aferente optimizării, optimizarea holistică preia elemente specifice din: optimizarea multi-etapă, analiza predictivă și optimizarea combinatorică.

*Optimizarea multi-etapă* generalizează optimizarea standard prin modelarea problemelor de decizie ierarhică, care implică procese decizionale succesive/multiple. Acest tip de problemă poate fi rezolvat prin algoritmul „branch and bound” („ramifică și delimitează”), [14] și tehnica Benders, [15].

*Analiza predictivă* este un domeniu al Statisticii care se ocupă cu extragerea informațiilor dintr-o mulțime de date și utilizarea acestora pentru a prognoza tendințele și modelele de comportament, [61]. Esența analizei predictive este determinarea relațiilor dintre variabilele cauză și variabilele efect din evenimente trecute și exploatarea acestora pentru a prognoza un rezultat necunoscut.

O problemă de *optimizare* are caracter *combinatorial* dacă fiecare variabilă poate lua independent un număr de valori numerice apriori cunoscute de exemplu: valori întregi, nenegative inferioare unui prag dat sau numai valori 0 sau 1, [62].

### 3.4. Algoritmul metodei de optimizare holistică

Aplicarea metodei presupune parcurgerea a trei etape, și anume: *i)* analiza activității anterioare, *ii)* instrumentarea evaluării și *iii)* evaluarea procesului curent.

#### 1. Analiza activității anterioare

Obiectivul acestei etape este de a descrie activitatea anterioară într-un format adecvat optimizării holistice. În acest scop, structura activității este analizată pentru a descoperi nivelurile potențiale de identificare, adică nivelurile de activitate la care trebuie întreprinse acțiuni specifice care determină cursul activității. Ansamblul de acțiuni/operațiuni care urmează să fie realizat pornind de la un astfel de nivel de identificare până finalizarea procesului reprezintă o sarcină tipică. Mai multe sarcini tipice pot fi identificate, apoi, la fiecare nivel de identificare. Noi niveluri de identificare pot fi găsite de-a lungul unei anumite sarcini tipice, în timp ce noi sarcini tipice (de complexitate mai mică) pornesc de la aceste niveluri noi și așa mai departe. Astfel, fiecare sarcină tipică implică, în general, realizarea unei succesiuni de alte sarcini tipice (având niveluri inferioare, în funcție de nivelurile de identificare care le corespund).

O bază de date a cazurilor, care rezultă prin înregistrarea cazurilor anterioare cu privire la o anumită sarcină tipică, poate să fie asociată acestei sarcini. Modele cauzale ale sarcinii tipice pot fi identificate prin procesarea informațiilor din baza de date aferentă.

### *Optimizarea holistică a procesului de fabricație*

În această etapă, rezultatul aplicării metodei constă în evidențierea nivelurilor de identificare, a acțiunilor/operațiunilor specifice și, pentru fiecare dintre acestea, construcția bazei de date a cazurilor corespunzătoare și a modelelor cauzale aferente.

#### **2. Instrumentarea evaluării**

În optimizarea holistică, formularea cererii de optimizare nu este preexistentă. De fapt, formalizarea dezideratului face parte din rezolvarea problemei de optimizare. În industria prelucrătoare, politica managerială impune dezideratul referitor la proces. Acest lucru poate fi diferit pentru diferite produse. Mai mult decât atât, dezideratul se poate schimba în timp chiar și pentru același produs. În același timp, atingerea dezideratului poate fi evaluată după diverse criterii, pentru fiecare criteriu pot fi atribuite funcții obiectiv specifice (variabile-efect), iar pentru evaluarea unei astfel de funcții pot fi utilizate seturi diferite de argumente (variabile-cauză independente). Din acest motiv, metoda prezentată necesită această etapă pentru identificarea obiectivelor, criteriilor, funcțiilor și argumentelor potențiale, dintre care se vor selecta cele mai potrivite, conform algoritmului metodei prezentat în continuare.

#### **3. Evaluarea procesului curent**

Metoda de optimizare holistică, propusă aici evită dificultățile sus-menționate. Conform acesteia, procesul de 'identificare și selectare' constă în parcurgerea succesivă a următorilor pași:

- Se avansează până la întâlnirea următorului nivel de identificare;
- Se identifică variabilele de optimizare (deciziile ce urmează a fi luate) și valorile acestora (activitățile caracteristice potențiale);
- Se adoptă obiectivul în funcție de optimizarea dorită, și corespunzător acestuia, criteriile de optimizare (vezi etapa 2);
- Se formulează criteriul selectând funcția de interes (variabila-efect a activității) și argumentele cele mai potrivite (variabile-cauză ale activității), restricțiile impuse și formatul adecvat al problemei actuale de optimizare (vezi etapa 2);
- Se efectuează evaluarea comparativă a sarcinilor tipice potențiale curente;
- Se renunță la sarcinile tipice necompetitive;
- Se evaluează comparativ sarcinile tipice rămase, ținând cont de relația între incertitudinea evaluării și acuratețea impusă în selectarea variantei optimale (care trebuie stabilită la începutul optimizării). Dacă rezultatul uneia dintre sarcinile tipice este superior comparativ cu celelalte, cu o marjă de incertitudine sub nivelul impus acurateții, atunci rezultatul este considerat optim și optimizarea este oprită. În caz contrar, se reia succesiunea de pași de la început.

Pentru a facilita înțelegerea conceptului de optimizare holistică și a metodei, în continuare este prezentată o aplicație. Se consideră cazul unui sistem de fabricație pentru produse mecanice, al cărui manager intenționează, la un moment dat, să optimizeze procesul de fabricație în mod holistic. Acuratețea impusă în selectarea variantei optimale este de 10%.

Rezultatele ipotetice ale etapei analizei activității anterioare au fost eșalonate în tabelul 3.1, în timp ce, cele ale etapei instrumentarea evaluării în tabelul 3.2. În cazul procesului curent considerat, sintagma „identifică și selectează” funcționează conform buclei de acțiuni următoare (prezentate sintetic în tabelul 3.3).

*Tabelul 3.1. Analiza activităților anterioare: identificarea activităților potențiale*

Nivel de identificare	Obiectul optimizării	Activități caracteristice
A	Comandă	A1 – Ambreiaj; A2 – Reductor; A3 – Mecanism de închidere a ușii; A4 – Frână
B	Asamblu	B1 – Reductor planetar; B2 – Reductor melc; B3 – Reductor cicloidal
C	Subansamblu	C1 – Subansamblu carcasă; C2 – Subansamblu roată dințată melcată; C3 – Subansamblu melc
D	Piesă	D1 – Forma carcasei; D2 – Carcasă sudată; D3 – Arborele roții; D4 – Roată dințată melcată
E	Plan	E1 – Plan carcasă I; E2 – Plan carcasă II; E3 – Plan roată dințată melcată
F	Operație	F1 – Frezare; F2 – Presare la rece; F3 – Strunjire
G	Fază	–

### Conceptul metodologiei de optimizare holistică a procesului de fabricație

Tabelul 3.2. Instrumentarea evaluării

Nivel de identificare	Obiectul optimizării	Caracteristici
P	Obiectiv	P1 – Eficiență; P2 – Productivitate; P3 – Ecologicitate; P4 – Calitate; P5 – Ciclu de viață; P6 – Evaluare graduală
Q	Criteriu	Q1 – Cost/produs; Q2 – Cost/cantitate; Q3 – Timp de prelucrare; Q4 – Timp/cantitate; Q5 – Profit/produs; Q6 – Rata profitului; Q7 – Energie/produs; Q8 – Clasa energetică; Q9 – Clasa calității
R	Funcție	R1 - Cost [Euro/dm <sup>3</sup> ]; R2 - Timp [min/dm <sup>3</sup> ]; R3 - Energie [KWh/dm <sup>3</sup> ]
S	Argumente	(S1.1, S1.2, S1.3); (S2.1, S2.2); ... în funcție de modelul legăturii cauzale

Tabelul 3.3. Evaluarea procesului curent

Formularea problemei			Instrumentarea evaluării				Găsirea soluției		
"identifică"	"selectează"		"identifică"				"identifică & selectează"		
			P	Q	R	S			
			"selectează"						
Niveluri	Variabile	Valori	Obiectiv	Criteriu	Funcții	Argumente	Rezultate	Delta	Mergi la
A	X <sub>A</sub>	A1, A2, A4	P1	Q1	R1	S1.2	A2	35%	Nivel-B
B	X <sub>B</sub>	B1, B2, B3	P2	Q3	R2	S2.1	B2	30%	Nivel-C
C	X <sub>C1</sub>	C1	P1	Q2	R1	S1.2	C1	22%	Nivel-D
	X <sub>C2</sub>	C2	P1	Q2	R1	S1.1	C2	20%	Nivel-D
	X <sub>C3</sub>	C3	P1	Q2	R1	S1.3	C3	10%	Stop
D	X <sub>D1</sub>	D1, D2	P3	Q7	R3	S3.1	D1	17%	Nivel-E
	X <sub>D2</sub>	D3	P2	Q4	R2	S2.1	D3	8%	Stop
	X <sub>D3</sub>	D4	P2	Q4	R2	S2.2	D4	15%	Nivel-E
E	X <sub>E1</sub>	E1, E2	P1	Q1	R1	S1.1	E2	11%	Nivel-F
	X <sub>E2</sub>	E3	P1	Q1	R1	S1.2	E3	12%	Nivel-F
F	X <sub>F1</sub>	F1	P1	Q2	R1	S1.2	F1	9%	Stop
	X <sub>F2</sub>	F2, F3	P2	Q3	R2	S2.1	F2	7%	Stop
G	X <sub>G</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-

### 3.5. Acțiuni pentru evaluarea activității curente

Cele mai importante acțiuni, pe baza cărora se face evaluarea activității curente sunt: *i*) identificare structurală, *ii*) identificare cauzală și *iii*) evaluare comparativă.

- 1. Identificarea structurală** permite o structurare a principalelor activități care compun un proces de fabricație, la toate nivelurile sale (contractare, planificarea producției, proiectarea produselor, planificarea proceselor și prelucrarea produselor). De la nivelul fiecărei activități de fabricație se va face selectarea celor mai bune variante în funcție de criteriile diferite de optimizare (cum ar fi, spre exemplu costul, timpul de prelucrare consumul de energie).
- 2. Identificarea cauzală** vizează identificarea grupurilor de variabile cu potențial de aplicare în modelarea activității/procesului. Identificarea cauzală permite selectarea variabilelor, celor mai influente, ușor de măsurat și cât mai puține posibil, cum ar fi modelul rezultat ca având cea mai mică complexitate, în conformitate cu precizia urmărită; furnizarea unor forme multiple pentru una și aceeași relație cauzală, dintre care utilizatorul o poate alege pe cea mai potrivită pentru rezolvarea unei probleme de evaluare comparativă.
- 3. Evaluarea comparativă** înseamnă stabilirea ierarhizării pentru două sau mai multe alternative de activitate/proces, după un criteriu stabilit anterior. Ierarhizarea este atribuită alternativelor potențiale, prin raportarea acestora la cazurile de activități de fabricație deja efectuate, înregistrate ca baze de date a cazurilor. Pentru a compara două (sau mai multe) alternative potențiale în funcție de un criteriu, valoarea exactă a criteriului nu este nevoie să fie cunoscută, în loc de acesta, compararea este mai ușor de realizat prin găsirea de vecinătăți ale cazurilor de activități/procese deja efectuate (cu rezultate cunoscute) cărora să le aparțină fiecare alternativă potențială. Definirea apropierii dintre două cazuri, care ar trebui evaluată pornind de la valorile variabilelor-efect cunoscute este problema cheie a evaluării comparative. Ierarhizarea unui anumit caz potențial rezultă prin analizarea apropierii dintre acesta și cele din baza de date a cazurilor (sortate după criteriul vizat).

În cadrul tezei au fost dezvoltate metode specifice pentru realizarea acestor acțiuni. Cele trei metode mai sus menționate urmează a fi prezentate în detaliu în capitolele următoare.

## Capitolul 4

### Metodă de identificare structurală a procesului de fabricație

În cadrul acestui capitol este dezvoltată o metodă de identificare structurală a procesului de fabricație, metodă care permite o structurare a activităților aferente acestuia, la toate nivelurile implicate (contractare, planificarea producției, proiectarea produselor, planificarea proceselor și prelucrarea produselor), prin elaborarea arborelui de activități specifice (evidențiind relațiile între etapele procesului de fabricație și circuitul informațional aferent) și identificarea variantelor de desfășurare a procesului de fabricație de la nivelul fiecărei activități de fabricație.

La fiecare nivel al activității de fabricație, metoda presupune selectarea celor mai bune variante, în funcție de diferite criterii de optimizare (cum ar fi, spre exemplu costul, timpul de prelucrare, consumul de energie, alt consum critic, sau combinații ale acestora).

În urma selecției variantelor celor mai bune de la nivelul fiecărei activități de fabricație, se obține un traseu tehnologic optim pentru realizarea unui produs considerat.

#### 4.1. Nivelurile procesului de fabricație

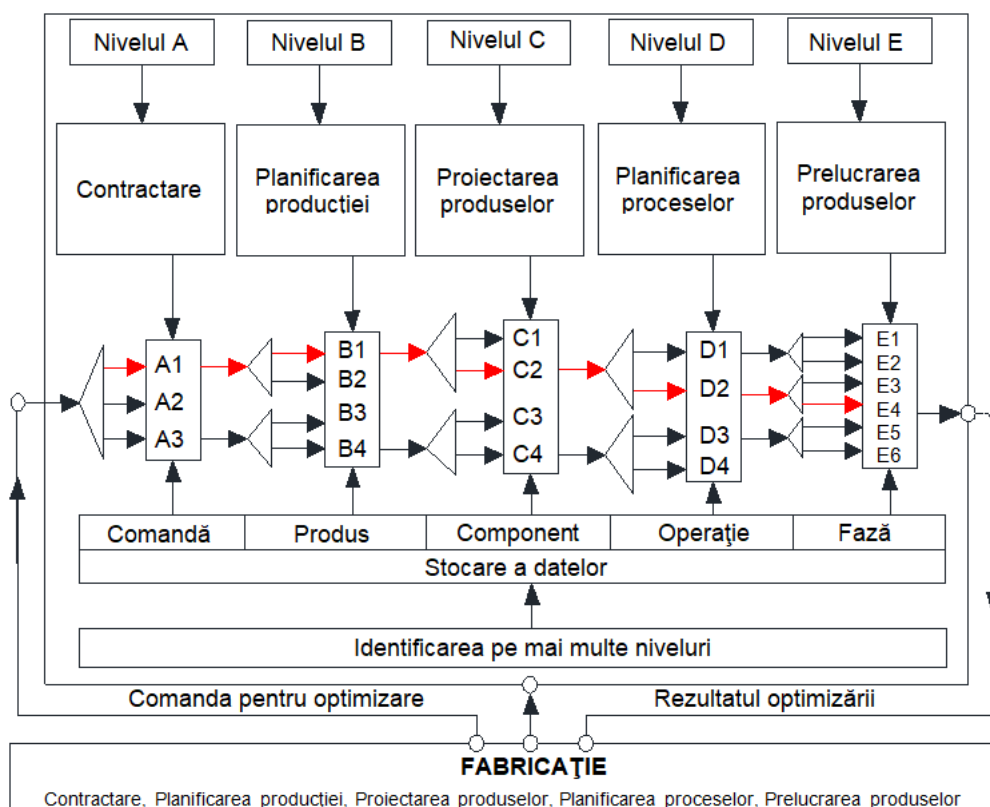


Figura 4.1. Optimizarea holistică a procesului de fabricație – schemă bloc

În cele ce urmează se va considera procesul de fabricație ca fiind compus din activități structurate pe cinci niveluri succesive (contractare, planificarea producției, proiectarea produselor, planificarea proceselor și prelucrarea produselor).

**Metodă de identificare structurală a procesului de fabricație**

Arborele de activități specifice care reflectă relațiile între activitățile de la diferite niveluri ale procesului de fabricație și care urmează a fi supus optimizării holistice, precum și circuitul informațional aferent sunt exemplificate în figura 4.1.

În figura 4.1 la nivelul A există trei activități potențiale A1, A2 și A3, dintre cele trei activități sunt selectate, conform metodei, doar două care conduc potrivit experienței anterioare la cele mai bune rezultate (cel mai mic cost, cel mai mare profit etc.), anume A1 și A2. Pentru fiecare dintre activitățile selectate, la nivelul B există patru activități potențiale B1, B2 pentru A1, B3, B4 pentru A2, dintre care doar două sunt selectate, anume B1 și B4. În continuare, procedura se aplică similar până la nivelul E. Astfel, în urma evaluărilor și selecțiilor succesive ale activităților de la diferitele niveluri ale procesului de fabricație, se obține un traseu tehnologic optim pentru procesul de fabricație considerat, care include activitățile A1, B1, C2, D2 și E4 (marcat cu roșu în figura 4.1).

**4.2. Identificarea activităților de la fiecare nivel al procesului**

Procesul de fabricație în cazul unei comenzi generice poate fi descris prin intermediul unor obiecte de activitate (acestea putând fi, la diferitele niveluri ale procesului: comandă, produs, componentă, operație, fază).

Rezultatul identificării procesului de fabricație constă în cazul metodei propuse din lanțul de activități al procesului de fabricație. Un astfel de lanț este exemplificat în reprezentare detaliată în figura 4.2-a sau sintetică în figura 4.2-b.

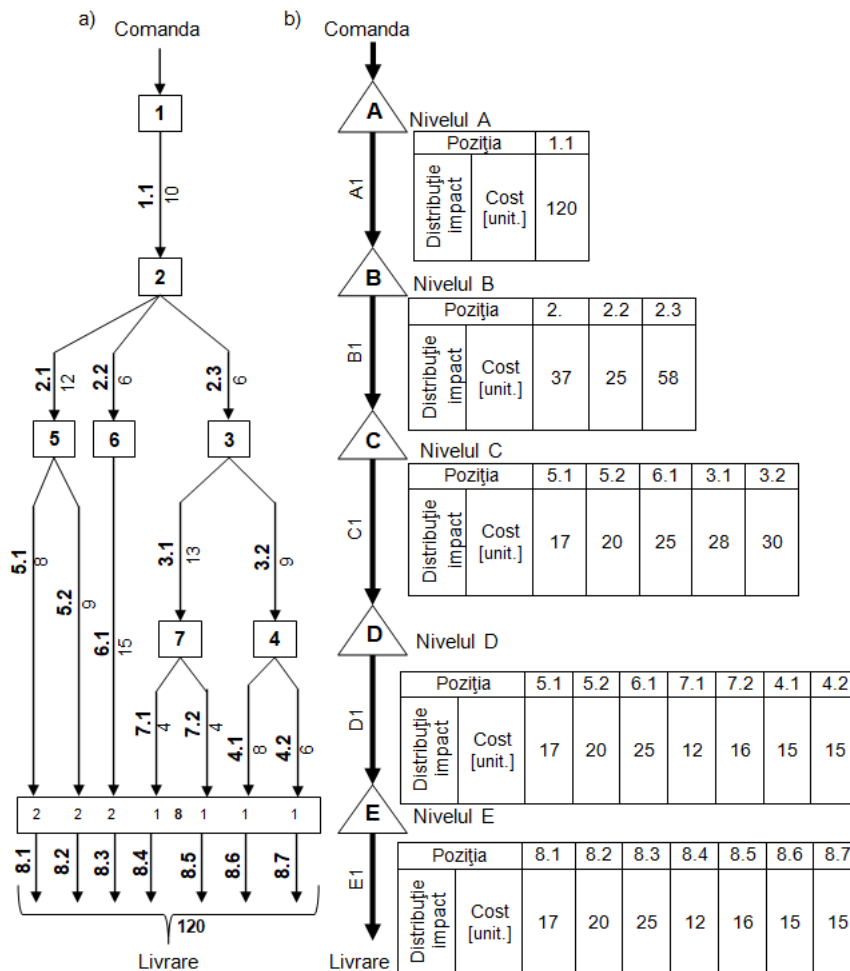


Figura 4.2. Lanțul de activități pentru o variantă a procesului de fabricație



### Optimizarea holistică a procesului de fabricație

Lanțul de activități identificat pentru satisfacerea unei comenzi date prezentat în figura 4.2-a include atât activități de fabricație aplicabile la nivelul întregului produs (notate cu numere simple 1...8), cât și activități referitoare la componente ale produsului (ale căror simboluri includ separatorul ".", de exemplu 2.1, 2.2, ..., unde numerele înainte și după punct se referă la activitate și respectiv la componentă). Acestea corespund celor 5 niveluri notate A...E identificate în figura 4.2-b. O săgeată simbolizează fiecare activitate, efectul generat de ea fiind specificat lângă aceasta. Un set determinat de activități (prin urmare, o succesiune de săgeți), pornind de la punctul de început al procesului, corespunde fiecărei componente, indiferent de nivelul componentei. Acest set reprezintă lanțul de activități al componentei considerate. Realizarea fiecărei activități se caracterizează printr-un efect rezultat (fie că este vorba de cost, timp, consum de energie etc.). Efectul cumulat al tuturor activităților care corespund căilor de compunere a unui lanț (atunci când toate efectele activităților sunt de același tip) reprezintă efectul procesului care corespunde acestui traseu. Mai multe tipuri de efecte pot fi măsurate pentru același traseu, prin valorile variabilelor-efect corespunzătoare.

Problema abordată în acest capitol poate fi formulată acum ca selectarea, din graful de fabricație, a traseului optim de fabricație, conform unui criteriu flexibil/set de criterii.

După cum se poate remarca cu ușurință, graful de fabricație poate fi foarte complex. Frecvent, structura activităților care trebuie realizată pentru a acoperi traseul de fabricație este, de asemenea, complicată. Mai mult, evaluarea efectului traseului prin descompunerea activităților în activități nominale de bază, găsirea efectului pentru fiecare dintre ele și, în final, cumularea acestor efecte este, foarte probabil, o sarcină dificilă.

### 4.3. Variantele de realizare a activităților

La un nivel al procesului de fabricație pot exista, în general, mai multe variante de desfășurare a acestuia. Spre exemplu, să presupunem că la nivelul A există variantele A1 și A2, această situație fiind prezentată simbolic în figura 4.3.

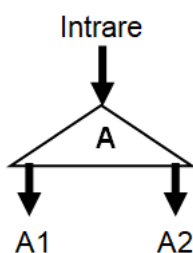


Figura 4.3. Variante de desfășurare a procesului de fabricație la nivelul A

Pentru simplitate, exemplul prezentat în figura 4.2 avea doar o singură variantă la fiecare nivel. În figura 4.4 se prezintă un proces de fabricație pentru care la fiecare nivel există mai multe variante.

Activitățile necesare a fi desfășurate între două niveluri de identificare consecutive vor fi numite căi. Căile sunt reprezentate prin săgeți groase și marcate cu litere în funcție de nivelul lor de pornire (de exemplu căile de la nivelul B la nivelul C sunt B1 și B2, etc.). Deoarece obiectul fabricat se poate regăsi în forme diferite la un anumit nivel, datorită ajungerii acolo în diferite moduri, fiecare dintre aceste forme trebuie reprezentate separat. În ciuda faptului că în practică pot exista mai multe căi pentru aducerea obiectului de la un nivel la altul, pentru simplitate s-au considerat maximum două căi pentru acest lucru. Se poate evidenția un traseu între starea obiectului, de la un nivel oarecare și punctul final al procesului. Traseul de realizare a obiectului este traseul dintre începutul procesului și oricare dintre punctele finale ale acestuia.

### Metodă de identificare structurală a procesului de fabricație

Pentru definirea unui traseu, la un anumit nivel trebuie selectată o anumită cale, trecând printr-un punct de decizie.

Trebuie observat că pentru realizarea efectivă a procesului este suficient să fie urmat un singur traseu. Ansamblul tuturor traseelor posibile care pot fi utilizate pentru obținerea produsului formează graful de fabricație al produsului (figura 4.4).

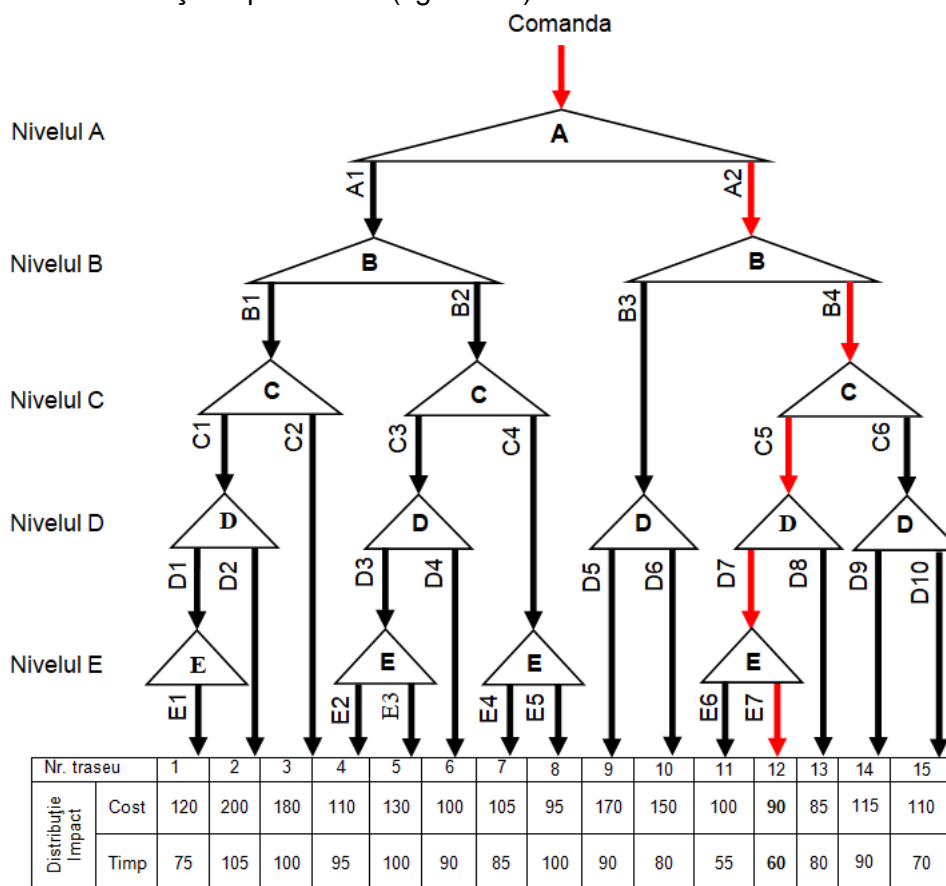


Figura 4.4. Graful de fabricație al produsului

Graful de fabricație optim se poate alege în funcție de criteriul urmărit, conform valorilor rezultate; astfel se exemplifică trei variante posibile: *i*) varianta 1: după valoarea minimă pentru cost, acesta fiind de 85 unități de cost, *ii*) varianta 2: după valoarea minimă pentru timp, acesta fiind de 55 unități de timp, *iii*) varianta 3: după o combinație între cele două criterii, costului fiind de 90 unități de cost și timpul de 60 de unități de timp, varianta marcată cu roșu în figura 4.4.

#### 4.4. Concluzii privind metoda de identificare structurală a procesului de fabricație

1. Desfășurarea procesului de fabricație pentru o comandă dată se poate face prin mai multe variante de fabricație.
2. Deși au fost considerate doar maximum două variante de fabricație pentru fiecare activitate, graful variantelor de fabricație rezultă complicat, în cazul situațiilor din practica industrială, acesta putând fi mult mai complex, ceea ce face ca evaluarea tuturor traseelor posibile să fie foarte dificilă.
3. Inconvenientul de mai sus poate fi eliminat dacă la fiecare nivel al procesului de fabricație sunt luate în considerare, potrivit unui criteriu dat, cele mai bune variante, renunțându-se la celelalte.

## Capitolul 5

### Metodă de identificare cauzală a procesului de fabricație

În cadrul acestui capitol este dezvoltată o metodă de identificare a legăturilor cauzale, metodă care permite furnizarea unor forme multiple pentru una și aceeași relație cauzală. Metoda a fost concepută cu scopul de a fi aplicată în cazul optimizării holistice a procesului de fabricație, înainte de evaluarea comparativă a rezultatelor activităților care pot fi selectate la nivelul unui punct de decizie din graful aferent unui proces de fabricație. Metoda permite identificarea celui mai potrivit set de variabile-cauză, pe baza căruia poate fi evaluată o variabilă-efect, în funcție de condițiile specifice unui proces de fabricație anume. Aplicarea metodei are ca finalitate elaborarea *arborelui de legături cauzale*, ce poate fi considerat un sistem de fundamentare a deciziilor ("Decision Support System, DSS", [63]). Metoda funcționează pe baza procesării informației existente într-o bază de date asociată unui proces de fabricație ("Instances-based learning, IBL", [64]) și implică parcurgerea mai multor etape succesive. Acțiunile specifice aferente fiecărei etape sunt: *i)* identificarea procesului, *ii)* concatenarea datelor, *iii)* combinarea cazurilor, *iv)* identificarea legăturilor cauzale și *v)* determinarea seturilor de variabile.

#### 5.1. Considerații generale

*Procesul de fabricație* cuprinde întregul set de activități și procese prin care se realizează un produs (indiferent dacă acesta este un bun fizic sau un serviciu), care este obiectul unei anumite cereri din piață. Conform scopului său și în legătură cu etapa din interiorul procesului de fabricație la nivelul căruia se poartă discuția, obiectul procesului poate însemna o comandă, o componentă, un plan de operații, un program-piesă sau un produs (figura 5.1).

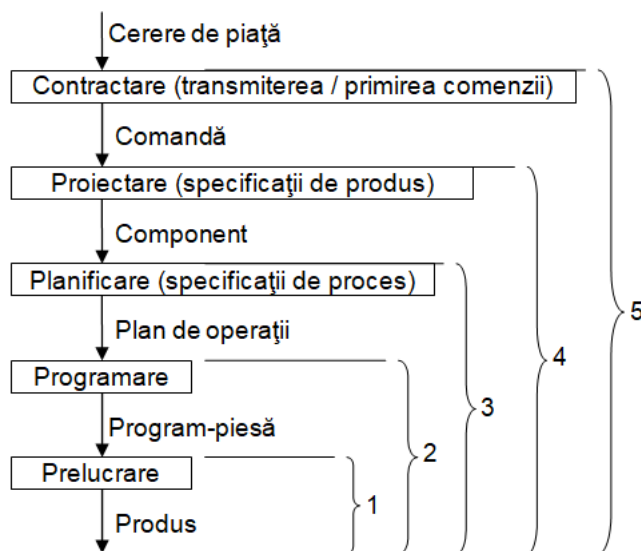


Figura 5.1. Activități aferente procesului de fabricație

Suportul care susține desfășurarea unui proces de fabricație va fi numit generic *sistem de fabricație*. În funcție de specificul procesului considerat (de exemplu 1 ... 5, figura 5.1), sistemul de fabricație poate fi abordat în moduri diferite, la diferitele niveluri.

---

*Metodă de identificare cauzală a procesului de fabricație*

---

Complexitatea sistemelor de fabricație crește în permanență datorită evoluției caracteristicilor produselor și a dezvoltării tehnologice generale. Acest lucru influențează modul în care procesele desfășurate pe astfel de sisteme sunt controlate, fiind necesare modele adecvate ale proceselor. Din ce în ce mai des, numărul variabilelor-cauză este impresionant, în timp ce în loc de o singură variabilă care caracterizează efectul, există mai multe variabile care trebuie urmărite simultan, de exemplu: costul, timpul, productivitatea și energia consumată.

Rezultatul procesului de fabricație constă nu doar în produsul însuși, ci și în efectele care decurg din desfășurarea acestuia, de exemplu: cheltuieli, uzură și impact asupra mediului.

Astfel, dacă trebuie comparate mai multe procese de fabricație disponibile pentru obținerea unui anumit produs, atunci între acestea nu se poate face nicio diferență după produsul finit, el fiind întotdeauna același. Diferența se poate face prin efectele măsurate: timpul necesar, costurile necesare și energia consumată, acestea fiind specifice fiecărui proces de fabricație. De remarcat, este faptul că efectele apar ca urmare a unor cauze specifice, care sunt în strânsă legătură cu funcționarea sistemului de fabricație. La rândul său, cauza provocării efectului este generată de îndeplinirea sarcinilor de fabricație, cauza nu ar exista fără realizarea lor. Prin urmare, este vorba despre *legături de cauzalitate* care au ca intrări sarcinile date și ca ieșiri - efectele rezultate. Un anumit număr de variabile, care măsoară atât caracteristicile sarcinilor cât și pe cele ale efectelor, permit descrierea unei astfel de legături cauzale. Aceste caracteristici, dintre care unele pot fi considerate caracteristici-cheie, trebuie să fie selectate din întregul set de caracteristici disponibile privind procesul de fabricație și acest lucru înseamnă *identificarea legăturii cauzale*.

Activitățile sau acțiunile care au loc în fiecare etapă a procesului de fabricație sunt specifice unui anumit produs. Esența managementului fabricației constă în conducerea acestor activități/acțiuni în scopul utilizării eficiente și eficace a resurselor necesare: materie primă, timp, energie, personal pentru realizarea produsului. Conducerea unei activități de producție înseamnă organizarea acesteia prin luarea deciziilor în conformitate cu scopul urmărit. Valori de referință sunt stabilite la programarea sistemului de producție, stabilirea acestora fiind un act decizional.

Necesitatea evaluării apare de fiecare dată când:

- i) o analiză „ce se întâmplă dacă” este efectuată pentru a adopta o alternativă de a proceda în cazul unei probleme de fabricație;
- ii) trebuie determinate caracteristicile sarcinii care au cel mai mare impact asupra efectului (obiectivelor) vizat (e), pentru a controla eficient procesul de fabricație.

Această evaluare necesită existența unui model, prin urmare, găsirea modelului procesului considerat este o problemă de interes general. Totuși, un astfel de model poate fi complicat, implicând numeroase variabile, astfel încât găsirea sa devine dificilă. În plus, aplicabilitatea modelului este limitată - în cazul în care premisele pe baza cărora modelul a fost determinat se modifică, acesta poate deveni inutil sau, în cel mai bun caz - inexact.

Construcția modelului implică două etape importante:

1. Stabilirea structurii modelului, aceasta însemnând, în primul rând, selectarea variabilelor-cauză prin care variabila efect poate fi evaluată.
2. Formalizarea modelului (prin relația concretă care leagă variabila-efect de variabilele-cauză) - de exemplu, pornind de la un model parametric valorile parametrilor sunt ajustate până când modelul exprimă în mod corespunzător, în mod cantitativ legătura de cauzalitate.

Un număr mare de tehnici pentru realizarea celei de-a doua etape sunt disponibile în literatura dedicată [65]–[67]. Pot fi evidențiate și lucrări care abordează prima etapă, pe baza a diferite tehnici de selectare a caracteristicilor (eng. “features selections”, [68]). Totuși, stabilirea structurii modelului pe baza determinării legăturilor de cauzalitate nu a mai fost abordată până acum, după cunoștințele noastre.

## Optimizarea holistică a procesului de fabricație

În viziunea noastră, evidențierea legăturilor de cauzalitate trebuie să se bazeze pe identificarea cauzală a procesului considerat.

În subcapitolele următoare este prezentată o metodă de identificare a legăturilor cauzale din procesul de fabricație, metodă care poate fi utilizată pentru găsirea celei mai potrivite structuri a modelului unui anumit proces de fabricație. Mai exact, metoda urmărește identificarea unor seturi de variabile cu potențial de aplicare în modelarea procesului de fabricație.

Metoda utilizează cazuistica trecută referitoare la sistemul de fabricație, înregistrată ca bază de date, pentru a releva legăturile cauzale dintre variabilele care caracterizează desfășurarea proceselor pe sistemul de fabricație considerat. Ea preia ideea provenită din teoria diferențelor finite [69] cum că dacă între două sau mai multe variabile există o legătură de cauzalitate, atunci variația unei variabile-cauză se va reflecta și prin urmare, se va putea măsura printr-o metrică adecvată, în variația altor variabile-cauză și/sau -efect. Vectorii care definesc cauzalitatea sunt specifici tipologiei produselor fabricate.

### 5.2. Algoritmul metodei de identificare cauzală

Deciziile optime privind procesul de fabricație ar trebui luate pe baza modelelor (tipurilor) procesului. Un model al procesului înseamnă, în general, relația dintre o variabilă-efect considerată și un set de descriptori de sarcină (variabila-cauză). De obicei, din cauza complexității problemelor, un astfel de model nu este nici unic, nici precis definit; astfel, pot fi luați în considerare mai mulți sau mai puțini descriptori, în combinații diferite, pentru o aceeași variabilă-efect.

Structura modelului unui proces de fabricație depinde în principal de: nivelul necesar de precizie în modelarea variabilei efect, viteza necesară în procesul de luare a deciziilor și disponibilitatea valorilor descriptorilor (posibilitatea de a le măsura).

Obiectivul metodei este de a elabora *arborele legăturilor cauzale*, facilitând alegerea de fiecare dată a setului de variabile-cauză cel mai potrivit pentru modelarea unui efect anume. Arborele legăturilor cauzale poate fi integrat în continuare într-un sistem de susținere a deciziilor (DSS) privind procesul de fabricație.

Aplicarea metodei de identificare cauzală propusă pentru modelarea procesului de fabricație implică mai multe etape succesive (figura 5.2). Acțiunile specifice care trebuie efectuate în fiecare etapă sunt prezentate în subcapitolele următoare.

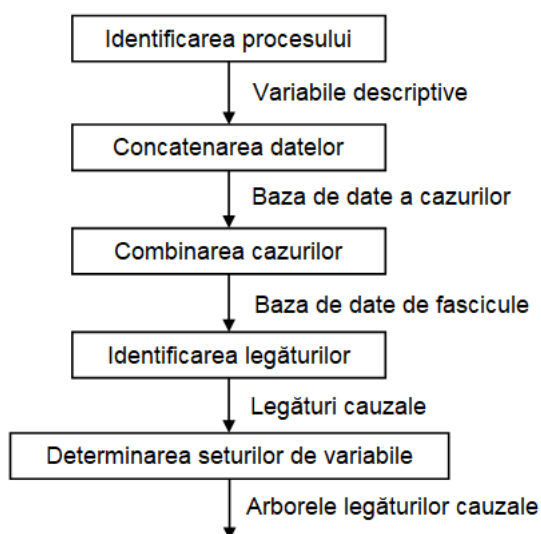


Figura 5.2. Algoritmul metodei de identificare cauzală

### 5.3. Identificarea procesului

Primul pas al algoritmului presupune, analizarea variantei de proces de fabricație-țintă, pentru a găsi variabilele care caracterizează realizarea acestuia. Aceste variabile pot fi exogene sau endogene.

De exemplu, pentru un proces de strunjire pot fi luate în discuție:

- lungimea piesei, diametrul piesei, precizia de prelucrare, materialul piesei, rigiditatea piesei, complexitatea piesei, condițiile de mediu ambient – *variabile exogene*;
- viteza de așchiere, avansul, turația, forța de așchiere, puterea mașinii unelte, volumul de așchii, costul, timpul de prelucrare, consumul de energie, gradul de uzură al sculei, al mașinii unelte, vibrațiile – *variabile endogene*.

Se definește apoi setul de variabile (atât variabilele-cauză cât și cele efect) cu potențial în modelarea procesului. Pentru același exemplu, setul variabilelor ar putea fi format din lungimea piesei, diametrul piesei, precizia de prelucrare, materialul piesei, rigiditatea piesei, viteza de așchiere, avansul, adâncimea de așchiere, forța de așchiere, puterea mașinii unelte, volumul de așchii, costul, timpul de prelucrare, consumul de energie.

### 5.4. Concatenarea datelor

Scopul acestei etape este acela de generare a bazei de date a cazurilor anterioare, despre varianta de proces de fabricație considerat. Mai multe cazuri se referă la același tip de activitate dacă pot fi caracterizate de aceleași variabile-cauză și variabile-efect – atât vectorul-condiție și vectorul-efect au aceleași variabile componente  $p_i$  și  $q_i$ .

În cazul unei activități nominale date, trei acțiuni sunt necesare pentru realizarea concatenării datelor și anume: gruparea, actualizarea și omogenizarea.

*Gruparea* are în vedere selectarea cazurilor care se referă la un proces dat și urmărește construirea *bazei de date a cazurilor*.

*Actualizarea* valorilor variabilelor este necesară datorită modificărilor care pot surveni de la momentul înregistrării cazurilor.

*Omogenizarea* își propune să facă comparabile cazurile, scalând valorile fiecărei variabile la valori cuprinse între 0 și 1. Pentru realizarea scalării variabilelor a fost elaborată o aplicație Matlab (prezentată în Anexa 2).

După rularea algoritmului de scalare, valorile scalate obținute ale variabilelor trebuie stocate (de exemplu, într-o filă nouă a fișierului Microsoft Excel).

Cazurile anterioare colectate pot fi stocate sub forma unui tabel, dar se poate utiliza, de asemenea, o reprezentare grafică, mult mai intuitivă și care permite o mai bună înțelegere a procedurilor metodei propuse.

### 5.5. Combinarea cazurilor

Metoda de identificare cauzală se bazează pe ideea că, dacă între două sau mai multe variabile există o legătură de cauzalitate, atunci variația unei variabile-cauză se va reflecta și prin urmare, se va putea măsura printr-o metrică adecvată, în variația altei variabile-cauză sau -efect. În cazul în care se consideră concomitent mai multe variabile-cauză (notate cu  $p_i$ ) legate de o variabilă-efect (notată cu  $q_j$ ), lucrurile sunt mai complicate, deoarece variabilele-cauză pot avea un impact diferit asupra variabilei-efect (uneori contrar), prin urmare efectul variațiilor lor concomitente ar putea fi mai greu de evidențiat în variația variabilei-efect.

### Optimizarea holistică a procesului de fabricație

Având în vedere cele de mai sus, pentru combinarea cazurilor se construiește o bază de date pentru fascicule. Aceasta este generată pornind de la baza de date a cazurilor anterioare, prin compararea fiecărui caz  $k$  cu celelalte cazuri  $l$ ,  $l = 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, n$  dintr-un anumit set de date. Compararea înseamnă calcularea diferențelor  $\delta p_i(k, l)$  și  $\delta q_j(k, l)$  între valorile variabilelor-cauză și -efect corespunzătoare cazurilor  $k, l$ :

$$\delta p_i(k, l) = |p_{ik} - p_{il}|, \quad i = 1 \dots n_p \quad \text{și} \quad \delta q_j(k, l) = |q_{jk} - q_{jl}|, \quad j = 1 \dots n_q \quad (5.1)$$

În relația 5.2,  $n_p$  și  $n_q$  reprezintă numărul de variabile-cauză respectiv -efect. Rezultatele comparației între cazurile  $k$  și  $l$ , notată în cele ce urmează  $(k, l)$ , generează un rând din baza de date, care va fi denumit în continuare fascicul aferent cazurilor  $k$  și  $l$ . Fasciculul se obține, de fapt, prin reunirea vectorilor  $\delta p_i(k, l)$  și  $\delta q_j(k, l)$ . Fiecare fascicul poate fi reprezentat grafic ca o poli-linie.

Cazurile și fasciculele rezultate prin compararea lor, au dimensiuni și structură identice. Astfel, din cazurile caracterizate prin variabilele  $(p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_{n_p}, q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_{n_q})$  rezultă fascicule de aceeași formă  $(\delta p_1, \delta p_2, \dots, \delta p_i, \dots, \delta p_{n_p}, \delta q_1, \delta q_2, \dots, \delta q_j, \dots, \delta q_{n_q})$ . Din acest motiv, va fi făcută în continuare, în mod firesc, o corespondență între variabila-cauză  $p_i$  și componenta  $\delta p_i$ , precum și între variabila-efect  $q_j$  și componenta  $\delta q_j$ . Deoarece rezultatele comparațiilor  $(k, l)$  și  $(l, k)$ , sunt identice (cu  $k, l = 1 \dots n$ ), numai una dintre ele se înregistrează în baza de date pentru fascicule. Astfel, această bază de date va fi formată din  $N = C_n^2$  rânduri.

## 5.6. Identificarea legăturilor cauzale

Scopul acestei etape este de a găsi și de a evalua legăturile de dependență dintre variabilele cu potențial de a descrie relația cauzală între variabilele-cauză și variabila-efect. Acest lucru se poate face pornind de la o bază de date pentru fascicule existentă, cu ajutorul unei tehnici originale dezvoltată în acest scop, și anume focalizarea fasciculelor, descrisă în continuare.

Acțiunea elementară în focalizarea fasciculelor este *secvența de focalizare*, care constă în adoptarea unor domenii de variație restricționate ("ferestre") pentru una sau mai multe dintre componentele considerate, în timp ce domeniile de variație care rezultă în consecință pentru fiecare dintre celelalte componente ale unui fascicul, -cauză sau -efect, ("imagini"), sunt măsurate după impunerea acestor ferestre. Ansamblul de fascicule care trec concomitent prin toate ferestrele considerate va fi denumit în continuare *mănunchi de fascicule*.

În figura 5.3 este prezentată o secvență de focalizare generică, în cazul unei probleme de identificare cu trei variabile-cauză și două variabile-efect, setul de date incluzând  $N = 10$  fascicule ( $n = 5$  cazuri). Două ferestre (reprezentate prin dreptunghiuri) au fost impuse pentru componentele  $\delta p_2$  și  $\delta p_3$ ; prin urmare, au rezultat trei imagini (reprezentate prin linii groase) pentru  $\delta p_1$ ,  $\delta q_1$  și  $\delta q_2$ . Cele trei fascicule reprezentate prin poli-linii compun mănunchiul de fascicule rezultat.

Pentru a facilita înțelegerea figurii, celelalte șapte fascicule, care nu făceau parte din mănunchi, nu au mai fost reprezentate.

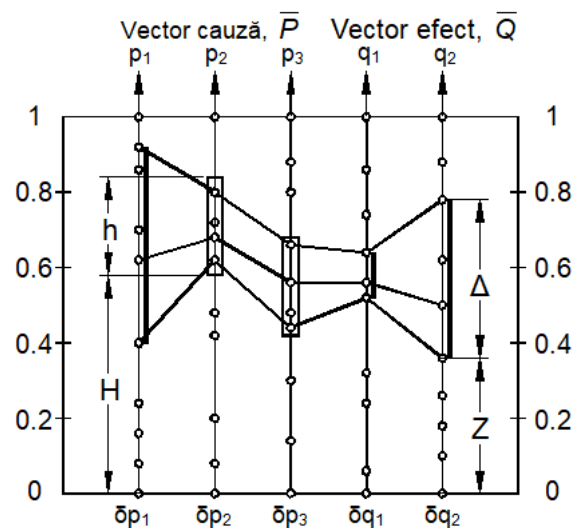


Figura 5.3. Secvența de focalizare generică

**Metodă de identificare cauzală a procesului de fabricație**

În continuare, prin *mănunchi de fascicule*, vom înțelege setul format din fasciculele care trec prin toate ferestrele considerate.

Un set format din mai multe secvențe de focalizare, pentru fiecare secvență fiind specificate dimensiunea și poziția ferestrelor și a imaginilor, alcătuiesc un *program de focalizare*. Secvențele incluse într-un program de focalizare sunt independente. Cea mai ușoară modalitate de a reprezenta un program de focalizare este un tabel, în care fiecare rând înseamnă o secvență de focalizare.

În tabelul 5.1 este prezentat un program de focalizare generic format din trei secvențe de focalizare. Pentru fiecare secvență, sunt specificate caracteristicile  $h$  și  $H$ , pentru variabilele focalizate, în timp ce pentru restul, sunt indicate caracteristicile  $\Delta$  și  $Z$  corespunzătoare imaginilor.

Tabelul 5.1. Program de focalizare

Secvența Nr. crt.	Variabile-cauză						Variabile-efect			
	$p_1$		$p_2$		$p_3$		$q_1$		$q_2$	
1	$\Delta_1(p_1)$	$Z_1(p_1)$	$h_1(p_2)$	$H_1(p_2)$	$h_1(p_3)$	$H_1(p_3)$	$\Delta_1(q_1)$	$Z_1(q_1)$	$\Delta_1(q_2)$	$Z_1(q_2)$
2	$h_2(p_1)$	$H_2(p_1)$	$\Delta_2(p_2)$	$Z_2(p_2)$	$h_2(p_3)$	$H_2(p_3)$	$\Delta_2(q_1)$	$Z_2(q_1)$	$\Delta_2(q_2)$	$Z_2(q_2)$
3	$\Delta_3(p_1)$	$Z_3(p_1)$	$h_3(p_2)$	$H_3(p_2)$	$\Delta_3(p_3)$	$Z_3(p_3)$	$h_3(q_1)$	$H_3(q_1)$	$\Delta_3(q_2)$	$Z_3(q_2)$

*Algoritmul de focalizare* poate fi acum definit ca o serie de secvențe de focalizare, dar unde, spre deosebire de programul de focalizare, valorile variabilelor secvenței curente depind de valorile lor din secvențele precedente.

Identificarea legăturilor cauzale se realizează prin evaluarea mănunchiurilor, aceasta constând în aplicarea succesivă a două proceduri:

- *Procedura de reducere a dimensionalității problemei*, pentru eliminarea variabilelor-cauză cu grad ridicat de dependență de alte variabile-cauză;
- *Procedura de evaluare a capacității de modelare* a fiecărei variabilă-cauză rămasă.

Rezultatul aplicării primei proceduri este *setul maxim* de variabile-cauză. Pornind de la acesta, pe baza valorilor caracteristicilor specifice care caracterizează variabilele-cauză în ceea ce privește capacitatea lor de modelare, pot fi generate în continuare subseturi ale setului maxim (pur și simplu denumite *seturi*).

Algoritmii procedurii sunt prezentați în continuare, prin exemplificarea aplicării acestora în cazul problemei elementare, corespunzând situației unui set de  $m$  variabile-cauză aferente unei singure variabile-efect  $q$ .

**5.6.1.Reducerea dimensionalității problemei**

Știind că, toate variabilele (cauză și efect) iau valori în intervalul  $[0, 1]$ , se ia în considerare o serie predefinită de praguri  $h_k$ , ale căror înălțimi (prezentate în figura 5.4) formează o progresie geometrică, spre exemplu:

$$h_k = 0.8^k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (5.2)$$

Unul din aceste praguri, notat cu  $h_{ref}$  este stabilit drept referință. Selecția valorii acestui prag depinde de numărul de fascicule disponibile în baza de date (ex.  $h_{ref} = h_7 = 0.2097$ ).



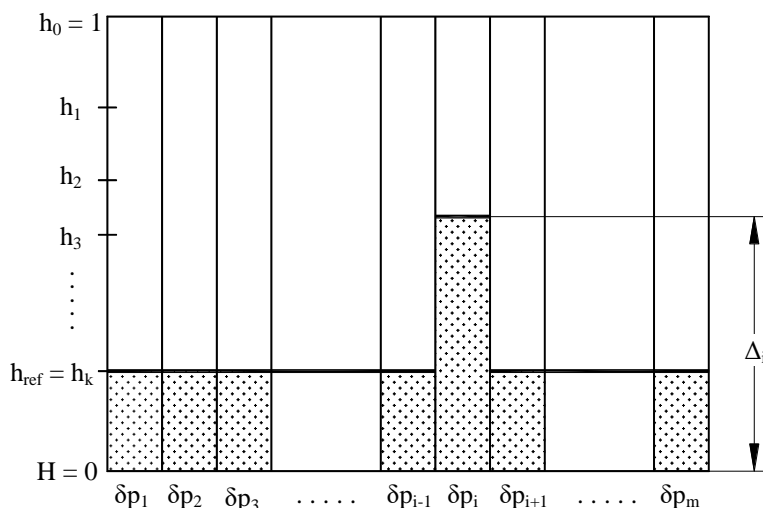


Figura 5.4. Secvența de focalizare  $i$  a algoritmului pentru reducerea dimensionalității problemei

Algoritm de focalizare care urmărește să găsească variabilele-cauză cu grad ridicat de dependență față de celelalte variabile-cauză constă în următoarele acțiuni:

- Ferestre având  $H = 0$  și  $h = h_{ref}$  sunt aplicate pentru  $(m-1)$  variabile-cauză, cu excepția variabilei  $i$ , pentru care se măsoară dimensiunea imaginii  $\Delta_i$  (Figura 5.4). Evident, există  $m$  posibilități de a face acest lucru ( $i = 1, 2, \dots, m$ ).
- Secvența de ferestre de mai sus este rulată pentru fiecare dintre variabilele-cauză, de aici rezultând că se vor obține  $m$  valori ale lui  $\Delta_i$ .
- Valoarea lui  $\Delta_{min} = \min(\Delta_i)_{i=1,2,\dots,m}$  este determinată. Dacă  $\Delta_{min} < h_{k-1}(h_{ref} = h_k)$ , atunci variabila-cauză care îi corespunde  $\Delta_{min}$  poate fi considerată ca fiind foarte dependentă de celelalte variabile-cauză și poate fi eliminată.
- Pentru setul rămas de variabile-cauză se aplică în mod repetat cele două acțiuni anterioare până când valoarea curentă a lui  $\Delta_{min}$  devine mai mare decât  $h_{k-1}$ . Ultimul set de variabile-cauză formează setul maxim de variabile. Aceste variabile-cauză pot fi considerate relativ independente între ele și pot fi folosite pentru modelarea efectului  $q$ .

### 5.6.2. Evaluarea capacității de modelare a variabilelor-cauză

Indiferent dacă se determină în cadrul setului maxim de variabile-cauză sau a unuia dintre sub-seturile sale, capacitatea de modelare a unei variabile-cauză se referă la capacitatea sa de a modela o anumită variabilă-efect. Trei criterii, prezentate mai jos, pot evalua capacitatea de modelare a unei variabile-cauză, aparținând unui set dat:

- **Puterea de modelare MP**, care arată cât de mult variația variabilei-cauză se regăsește în variația variabilei-efect.
- **Acoperirea efectului MC**, adică măsura în care variabila-cauză este capabilă să descrie de una singură variabila-efect.
- **Uniformitatea modelării MU**, reflectă împrăștierea valorilor variabilei-efect atunci când variabila-cauză are o variație uniformă.

Metodă de identificare cauzală a procesului de fabricație

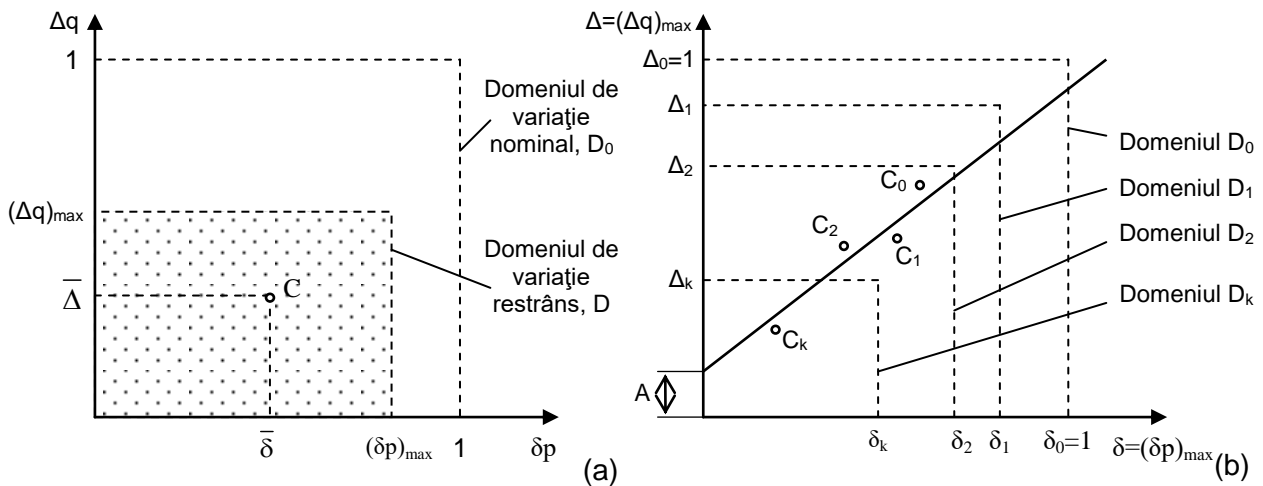


Figura 5.5. Suportul matematic al definirii atributelor capacității de modelare:  
 a) definirea domeniului restrâns; b) definirea atributelor

În figura 5.5 este prezentat suportul matematic care permite evaluarea atributelor capacității de modelare, în cazul celei mai simple relații cauzale, având expresia matematică  $q = f(p)$ . Dacă variabilele-cauză și efect sunt scalate în intervalul  $[0, 1]$ , atunci domeniul nominal de variație  $D_0$ , care include întregul set de puncte  $(\delta p_i, \Delta q_i)_{i=1..N}$  corespunzătoare bazei de date pentru fascicule asociată relației cauzale considerate, este un pătrat cu latura unitară (Figura 5.5-a). Apoi, dacă intervalul de variație pentru  $\delta p$  este restrâns la  $[0, (\delta p)_{\max}]$ , atunci, datorită relației cauzale, intervalul de variație pentru  $\delta q$  se va reduce, la rândul său, la  $[0, (\Delta q)_{\max}]$ . Astfel, rezultă un domeniu de variație restrâns  $D$  pentru punctele din baza de date pentru fascicule. Acest domeniu este, în general, dreptunghiular și punctele care îi aparțin pot fi caracterizate printr-un punct de tip centru de masă  $C(\bar{\delta}, \bar{\Delta})$ , ale cărui coordonate sunt calculate ca medie a coordonatelor corespunzătoare punctelor din interiorul lui  $D$ .

Dacă o serie de valori în progresia geometrică, cu rație subunitară, este impusă succesiv pentru  $(\delta p)_{\max}$  (renotată cu  $\delta$ ), atunci rezultă o serie corespunzătoare, cu termeni descrescători, pentru  $(\Delta q)_{\max}$  (renotată cu  $\Delta$ ). Un domeniu restrâns  $D_k$  având centrul de greutate  $C_k$  (figura 5.5-b) poate fi asociat fiecărui cuplu  $(\delta_k, \Delta_k)$ , în timp ce o dreaptă de ecuație  $y = \alpha \cdot x + \beta$  poate fi asociată prin interpolarea punctelor  $C_0, C_1, C_2, \dots, C_k, \dots$ .

„Sensibilitatea” locală a unei funcții la argumentul său, într-un anumit punct, este reprezentată de valoarea derivatei funcției în acel punct, adică de panta tangentei la graficului funcției trasată în acel punct.

Prin analogie, considerăm că panta  $a$  a unei drepte poate exprima sensibilitatea globală (denumită aici puterea de modelare, MP) a efectului  $q$  la variabila-cauză  $p$ . În același timp, pentru că  $h_j \rightarrow 0$  (împreună cu  $\bar{\delta}_{ij}$ ), atunci când  $j \rightarrow \infty$ , considerăm că „tăria” relației cauzale (denumită aici acoperirea efectului, MC) este reflectată de gradul în care  $\Delta_{ij}$  (de aici și  $\bar{\Delta}_{ij}$ ) tinde la 0 atunci când  $j \rightarrow \infty$ , aceasta fiind legată de valoarea  $b$  (cu cât este mai apropiat de 0, cu atât relația cauzală este mai puternică). În cele din urmă, dispersia punctelor  $C_k$  în raport cu linia dreaptă ar putea oferi informații relevante despre uniformitatea modelării, MU, relației cauzale - cu cât dispersia este mai mică, cu atât uniformitatea este mai mare.

Evaluarea mănunchiurilor bazată pe algoritmul de focalizare urmărește determinarea atributelor capacității de modelare în cazul variabilei-cauză  $p_i$ , aparținând unui set  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$  și constă în următoarea succesiune de acțiuni.

**Optimizarea holistică a procesului de fabricație**

- Ferestre care au  $H = 0$  și  $h = h_{ref}$  sunt impuse pentru  $(n-1)$  componente-cauză din setul considerat, cu excepția componentei  $i$ , pentru care impunem o fereastră a cărei dimensiune este modificată succesiv de la  $h_0 = 1$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ , ...,  $h_i$ , ... până la  $h_k = h_{ref}$ . Pentru fiecare dintre aceste dimensiuni ale ferestrei impuse  $p_i$ , se determină imaginea componentei-efect  $\delta q$ , având dimensiunea  $\Delta_{ij}$ ,  $j=1,2,\dots,k$  corespunzătoare dimensiunii  $h_j$  a ferestrei impuse  $\delta p_i$  (figura 5.6, unde, spre exemplu,  $j=3$ ).

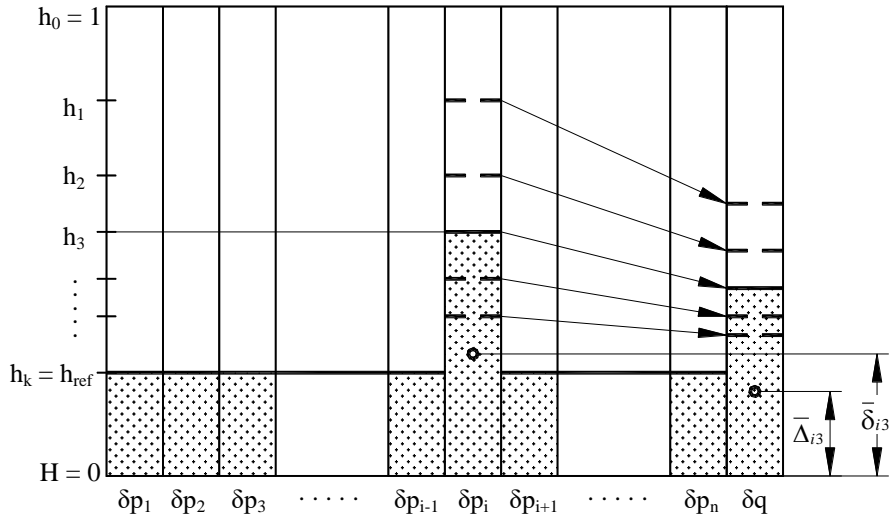


Figura 5.6. Evaluarea capacității de modelare  $p_i$

- Presupunând că în cazul ferestrei având dimensiunea  $h_j$  impusă pentru componenta  $\delta p_i$ , mănunchiul de fascicule care trece prin el și alte  $(n-1)$  ferestre cu  $h = h_{ref}$  are cardinalul  $N_{ij}$ , valorile medii  $\bar{\delta}_{ij}$  și  $\bar{\Delta}_{ij}$  sunt calculate ca:

$$\bar{\delta}_{ij} = \frac{1}{N_{ij}} \sum_{l=1}^{N_{ij}} \delta p_{il} \tag{5.3}$$

$$\bar{\Delta}_{ij} = \frac{1}{N_{ij}} \sum_{l=1}^{N_{ij}} \delta q_{il} \tag{5.4}$$

în care:  $\delta p_{il}$  și  $\delta q_{il}$  semnifică valorile lui  $\delta p_i$  și  $\delta q$  corespunzătoare fasciculului  $l$  care trece prin setul considerat de ferestre.

- O regresie liniară, având forma:

$$y = a \cdot x + b \tag{5.5}$$

este determinată pentru setul de puncte  $C_j(\bar{\delta}_{ij}, \bar{\Delta}_{ij})_{j=1,2,\dots,k}$ ; de asemenea, este calculată eroarea medie pătratică (RMSE). Astfel, attributele capacității de modelare pot fi caracterizate prin valorile  $a$  (MP),  $1-b$  (MC) și RMSE (MU).

Trebuie remarcat faptul că valorile acestor trei caracteristici sunt relative, deoarece depind de compoziția setului de variabile căruia aparțin. Cu alte cuvinte, aceleași variabile-cauză pot arăta o capacitate de modelare diferită, dacă sunt evaluate în cadrul unor seturi diferite de variabile.

## 5.7. Gruparea variabilelor

Utilizarea caracteristicilor capacității de modelare definite în capitolele anterioare pentru variabilele-cauză poate fi extinsă la cazul seturilor de variabile, după efectuarea adaptărilor necesare.

Să luăm în considerare cazul unui set maximal format din  $n_{mc}$  variabile-cauză  $p_1, p_2, \dots, p_{n_{mc}}$ . Acesta ar trebui să aibă în principiu cea mai mare capacitate de modelare a variabilei-efect  $q$ . Cu toate acestea, pot fi întâlnite situații în care valorile pentru una sau mai multe variabile din set nu sunt disponibile, sau de asemenea, ar putea fi inutil un model complicat, care implică toate variabilele din setul maxim. În ambele cazuri, soluția este utilizarea unui model cauzal definit de mai puține variabile-cauză.

Conform metodei prezentate, selecția celui mai potrivit astfel de model presupune existența mai multor modele cauzale referitoare la variabila-efect  $q$ . Acest lucru poate fi realizat prin aplicarea succesivă și repetitivă a unor algoritmi și anume: *i*) algoritm pentru generarea de seturi cu mai puține variabile și *ii*) algoritm de evaluare a capacității de modelare a seturilor de variabile.

### 5.7.1. Algoritm pentru generarea de seturi cu mai puține variabile

Să presupunem că avem un set cu  $n_c$  variabile-cauză (care poate fi setul maxim, atunci când  $n_c = n_{mc}$ ). Oricare dintre variabile ar putea fi eliminată pentru a obține un set cu  $(n_c-1)$  variabile, putând rezulta  $n_c$  astfel de seturi. Dacă din fiecare set cu  $(n_c-1)$  variabile se elimină câte o nouă variabilă-cauză, numărul total de seturi distincte cu  $(n_c-2)$  variabile-cauză care ar putea fi obținute este  $n_c(n_c-1)$ . Evident, după doar câțiva pași de generare a seturilor mai mici, eliminând variabile una câte una, va rezulta un număr foarte mare de seturi, ceea ce complică foarte mult problema evaluării capacității de modelare pentru toate seturile. O soluție rezonabilă este de a lua în considerare doar o parte din eliminările posibile, mai exact – să fie eliminate, la fiecare nivel, doar variabilele care au o capacitate de modelare mai redusă.

În acest scop, a fost elaborat un algoritm (prezentat în Anexa 4) care presupune trei etape:

- Fiecare dintre cele  $n_c$  variabile-cauză este analizată după un criteriu selectat, pentru evaluarea capacității de modelare (MP, MC sau MU).
- Numărul de variabile-cauză care trebuie eliminate este stabilit în concordanță cu cerințele problemei de modelare adresată.
- După găsirea a  $n_d$  variabile-cauză cu cea mai scăzută capacitate de modelare,  $n_d$  seturi cu  $(n_c-1)$  variabile sunt generate prin eliminarea lor, una câte una.

### 5.7.2. Algoritm de evaluare a capacității de modelare a seturilor de variabile

Pentru evaluarea capacității de modelare a seturilor de variabile a fost elaborat un algoritm specific (prezentat în Anexa 5). Algoritmul se aplică pentru un set dat de variabile-cauză care modelează o anumită variabilă-efect. Aplicarea criteriilor definite în subcapitolele anterioare (MP, MC și MU) poate fi extinsă de la evaluarea variabilelor-cauză la evaluarea seturilor de variabile-cauză, în ceea ce privește capacitatea de modelare.

### Optimizarea holistică a procesului de fabricație

În cazul unui set, valorile criteriilor (notate cu  $MP_c$ ,  $MC_c$  și  $MU_c$ ) rezultă prin aplicarea următoarei proceduri:

- Ferestre având  $H = 0$  și dimensiunea succesiv modificată de la  $h_0 = 1$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ , ...,  $h_j$ , ... până la  $h_k = h_{ref}$  sunt considerate concomitent pentru toate  $n_c$  variabile din set, pentru fiecare dimensiune a ferestrelor corespunzând o imagine a variabilei-efect  $q$  având dimensiunea  $\Delta_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, k$  (figura 5.7, unde, spre exemplu,  $j = 3$ ).

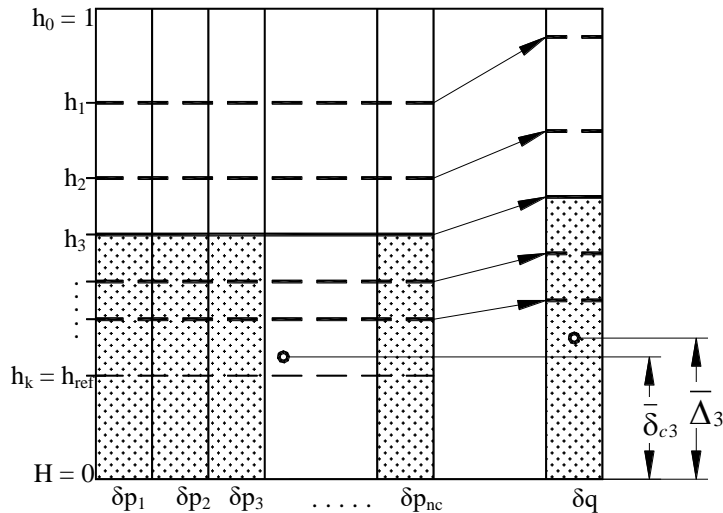


Figura 5.7. Evaluarea capacității de modelare a setului

- Presupunând că, în cazul ferestrelor cu dimensiunea  $h_j$  impuse variabilelor setului, mănunchiul de fascicule care trece prin ele are cardinalul  $N_j$ , valorile medii  $\bar{\delta}_{cj}$  și  $\bar{\Delta}_j$  se calculează ca:

$$\bar{\delta}_{cj} = \frac{1}{n_c \cdot N_j} \left( \sum_{l=1}^{N_j} \delta p_{1l} + \sum_{l=1}^{N_j} \delta p_{2l} + \dots + \sum_{l=1}^{N_j} \delta p_{nl} \right) \quad (5.6)$$

$$\bar{\Delta}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{l=1}^{N_j} \delta q_l \quad (5.7)$$

în care:  $\delta p_{il}$  și  $\delta q_l$  semnificând valorile lui  $\delta p_i$  și  $\delta q$  care corespund fasciculului  $l$  care trece prin setul considerat de ferestre,  $i = 1, 2, \dots, n_c$ .

- O regresie liniară, având forma:

$$y = a_c \cdot x + b_c \quad (5.8)$$

se determină pentru setul de puncte  $(\bar{\delta}_{cj}, \bar{\Delta}_j)_{j=1, 2, \dots, k}$ , fiind calculată și eroarea medie pătratică.

Caracteristicile capacității de modelare a setului pot fi caracterizate prin valorile:

$$MP_c = a_c, MC_c = 1 - b_c \text{ și } MU_c = RMSE \quad (5.9)$$

**Observație:** Generarea iterativă de seturi mai mici trebuie oprită atunci când valoarea (valorile) pentru una sau mai multe caracteristici ale capacității de modelare intră sub o valoare-prag (stabilă în funcție de cerințele problemei de modelare care trebuie rezolvată), ceea ce arată că seturile devin incapabile să descrie variabila-efect în mod satisfăcător.

## 5.8. Arborele legăturilor cauzale

Selectarea celui mai potrivit set de variabile-cauză cu ajutorul căruia poate fi descris efectul se face, în cazul metodei de identificare cauzală propusă, cu ajutorul unei reprezentări intuitive numită *arborele legăturilor cauzale* (figura 5.8). Acesta constituie o reprezentare a informațiilor referitoare la seturile de variabilele-cauză generate ca mai sus, în ceea ce privește capacitatea lor de modelare, împreună cu relațiile dintre aceste seturi. Arborele legăturilor cauzale este construit pe baza evaluării capacității de modelare a seturilor componente.

Arborele legăturilor cauzale este o reprezentare de tip graf a setului de variabile-cauză (figura 5.8), trasat conform următoarelor reguli:

- Fiecare set este reprezentat printr-un dreptunghi, în interiorul căruia sunt menționate variabilele ce îl compun.
- Punctul de pornire este *setul maxim*. Săgeata trasată între două seturi arată că cel de-al doilea set rezultă din primul, prin eliminarea variabilei al cărui simbol este menționat în apropierea săgeții.
- Nivelul (înălțimea) reprezentării unui set rezultă după una dintre caracteristicile capacității de modelare (alese între  $MP_c$ ,  $MC_c$ ,  $MU_c$ , sau o combinație ponderată a acestora).

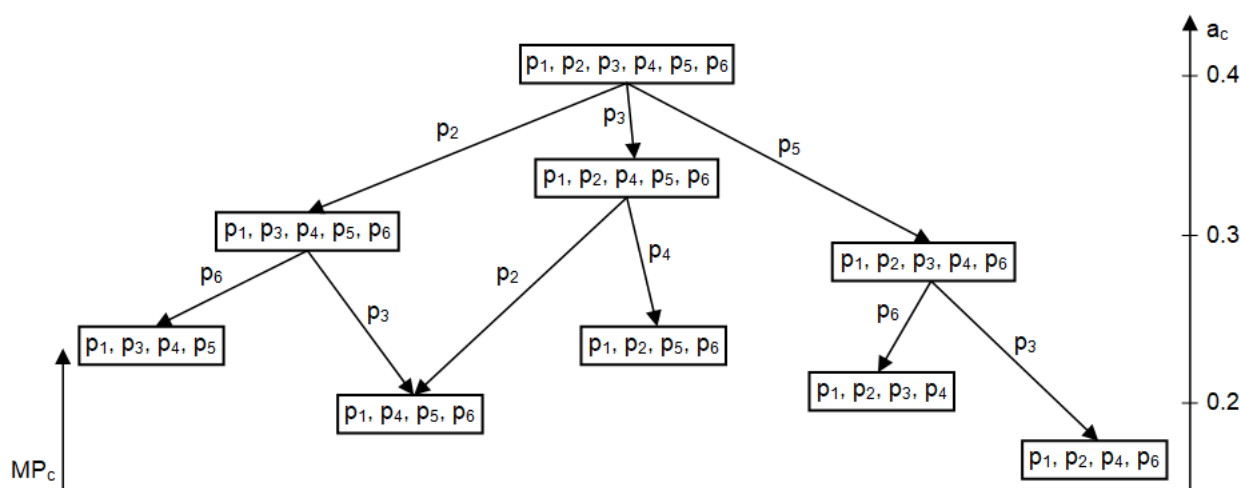


Figura 5.8. Arborele legăturilor cauzale asociat variabilei-efect  $q$ , trasat după valorile lui  $a_c$

## 5.9. Concluzii privind metoda de identificare cauzală a procesului de fabricație

1. Metoda de identificare a legăturilor cauzale dezvoltată aici permite furnizarea unor forme multiple pentru descrierea aceleiași variabile-efect, dintre care utilizatorul o poate alege pe cea mai potrivită pentru rezolvarea unei probleme de evaluare comparativă.
2. Aplicarea metodei permite o reducere semnificativă a dimensionalității problemei abordate, ceea ce are un impact favorabil asupra elaborării ulterioare a modelului necesar pentru realizarea evaluării comparative.
3. Modul de reprezentare sub formă arborescentă a multiplelor legături cauzale este intuitiv și permite o orientare ușoară a utilizatorului cu privire la performanțele potențiale de modelare ale diferitelor seturi de variabile-cauză.

## Capitolul 6

### Metodă de evaluare comparativă a variantelor procesului de fabricație

În cadrul acestui capitol este dezvoltată o metodă de evaluare comparativă a variantelor procesului de fabricație, metodă care propune o abordare inovativă în analiza soluțiilor potențial optimale, bazată pe ierarhizarea acestora. Metoda de evaluare comparativă a fost concepută pentru a asista selectarea variantei optime de continuare a unui proces de fabricație, la un anumit nivel de decizie. Evaluarea comparativă înseamnă stabilirea ierarhizării pentru două sau mai multe alternative de proces, după un anumit criteriu (costul, timpul de prelucrare, energia consumată).

Evaluarea comparativă a alternativelor potențiale se face prin raportarea acestora la cazurile de procese de fabricație deja efectuate, ale căror parametri au fost înregistrați în baza de date a cazurilor anterioare.

Potrivit metodei de optimizare holistică a procesului de fabricație, acesta este descris printr-un număr de variabile-cauză, respectiv variabile-efect. Aplicarea metodei de evaluare comparativă se face după identificarea cauzală aferentă, respectiv după adoptarea unui set de variabile-cauză care descriu variabila-efect de interes în momentul curent, prin aplicarea metodei prezentate în capitolul anterior.

#### 6.1. Problema de evaluare comparativă

Soluția de rezolvare a problemei a fost dezvoltată pornind de la următoarele idei-cheie:

- Cele mai relevante informații despre un proces pot fi obținute prin înregistrarea informațiilor privind implementările anterioare sub forma unei baze de date, aici incluzând, evident, atât variabilele-cauză cât și variabilele-efect.
- Nu este nevoie să se cunoască valoarea exactă a criteriului pentru a compara două (sau mai multe) alternative potențiale în funcție de acest criteriu.
- Cea mai eficientă evaluare comparativă poate fi obținută prin ajustarea cantității de informații prelucrate la nivelul necesar al preciziei de comparație.

Soluția de rezolvare propusă în cadrul tezei constă în:

- înlocuirea comparației directe a alternativelor potențiale prin comparații succesive între fiecare dintre acestea și cazurile din baza de date, pe baza variabilelor cu valori cunoscute.
- rezultatul unei astfel de comparații este ierarhizarea alternativei potențiale (eng. „ranking”), aceasta fiind găsită fără evaluarea directă a valorii criteriului pe care se bazează comparația.

Subiectul analizei evaluării comparative este:

- definirea apropierii dintre două cazuri, care ar trebui evaluată pornind de la valorile variabilelor-efect cunoscute.
- forma funcției de proximitate trebuie determinată prin modelarea unui set de cazuri din baza de date a cazurilor, alese în mod adecvat.
- ierarhizarea unui anumit caz potențial rezultă prin analizarea apropierii dintre acesta și cele din baza de date a cazurilor (sortate după criteriul vizat).
- vecinătățile cazului potențial pot fi delimitate și reduse iterativ, până când ierarhizarea rezultată devine suficient de precisă pentru a distinge între aceasta și celelalte cazuri potențiale în competiție.

## 6.2. Algoritmul metodei de evaluare comparativă

Algoritmul după care este atribuită ierarhizarea corespunzătoare unei alternative date este prezentat în figura 6.1.

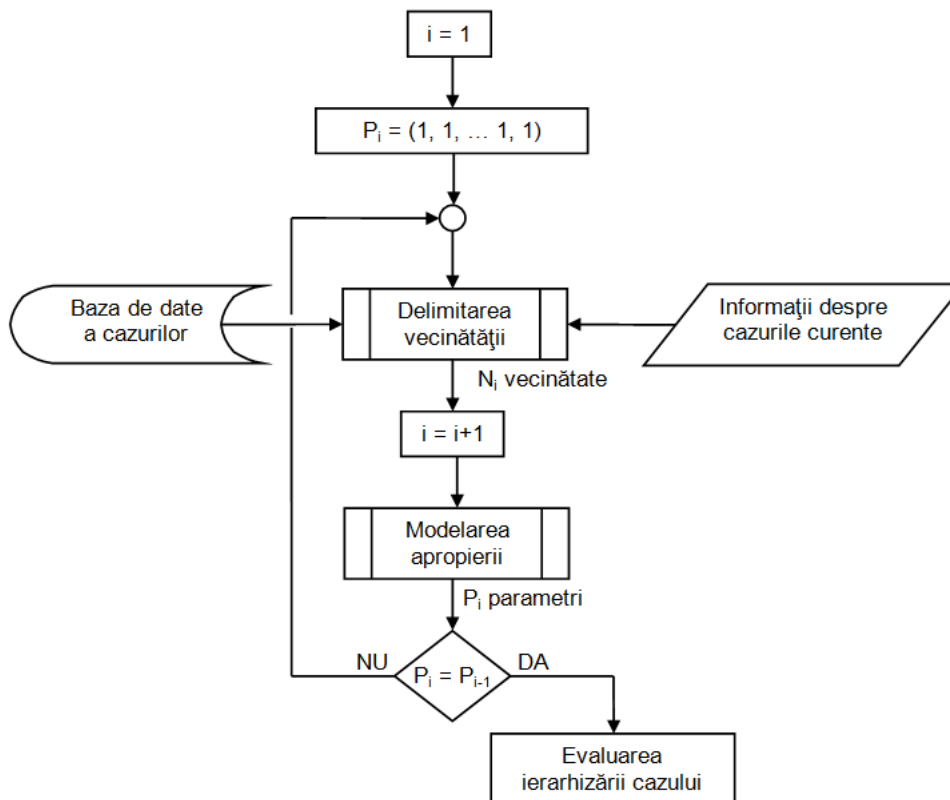


Figura 6.1. Algoritmul de evaluare a ierarhizării

Metoda de evaluare comparativă se bazează pe două proceduri: *i*) procedură pentru delimitarea vecinătății și *ii*) procedură pentru modelarea apropierii.

Un rol cheie în aplicarea metodei îl joacă o așa-numită “funcție de proximitate”, cu ajutorul căreia se evaluează apropierea dintre două cazuri. Forma funcției de proximitate este determinată prin modelarea unui set de cazuri din baza de date a cazurilor. În varianta propusă aici, identificarea funcției de proximitate se face pe baza unui set de cazuri din baza de date, prin determinarea valorilor a câte doi parametri pentru fiecare dintre cele  $n_p$  variabile-cauză luate în considerare. Selectarea din baza de date a unui astfel de set, însemnând o vecinătate a cazului curent, se face pe baza valorilor parametrilor rezultați la ultima identificare a funcției de proximitate.

Pentru a facilita înțelegerea funcționării algoritmului, se exemplifică aplicarea acestuia într-un caz definit de *variabila-efect* (variabila scalară  $T$ ) și de trei *variabile-cauză* (variabilele scalare  $x$ ,  $y$  și  $z$ ). În aceste condiții, baza de date a cazurilor înseamnă o mulțime formată din  $n$  linii:

$$\{(x_k, y_k, z_k, T_k) | k = 1 \dots n\}. \quad (6.1)$$

Baza de date a cazurilor este considerată aici ca o mulțime ordonată, liniile sale fiind sortate după valoarea ascendentă a lui  $T_k$  prin urmare, la fiecare rând, numărul său de ordine din această listă poate fi considerat ca parametru de ierarhizare. Cazul curent, pentru care se caută ierarhizarea, este definit prin valorile variabilelor-cauză  $x$ ,  $y$ , și  $z$ , cunoscute, în timp ce variabila-efect  $T$  este necunoscută. Valorile variabilelor înregistrate în baza de date sunt scalate separat pe coloane, prin urmare  $x_k, y_k, z_k, T_k \in [0, 1], \forall k = 1 \dots n$ . Valorile lui  $x$ ,  $y$ , și  $z$  sunt de asemenea scalate, împreună cu coloana corespunzătoare din baza de date.



### 6.3. Procedură pentru delimitarea vecinătății

De la început, trebuie precizat că, prin *cazuri similare*, se înțelege o mulțime de cazuri care au valori apropiate ale variabilelor-cauză, pentru acestea fiind de așteptat ca și variabila-efect să aibă valori apropiate. Un anumit număr de cazuri similare poate fi grupat în jurul unui *caz-pivot*  $(x_v, y_v, z_v, T_v)$ , formând astfel o vecinătate a acestuia.

Metodologia de delimitare a vecinătății urmărește găsirea unui profil al vecinătății definit de combinația specifică a *ferestrelor*  $x_v \pm \delta_x$ ,  $y_v \pm \delta_y$ ,  $z_v \pm \delta_z$  și  $T_v \pm \delta_T$  (vezi figura 6.2), care include toate seturile de coordonate  $(x_k, y_k, z_k, T_k)$ , ale cazurilor din vecinătate.

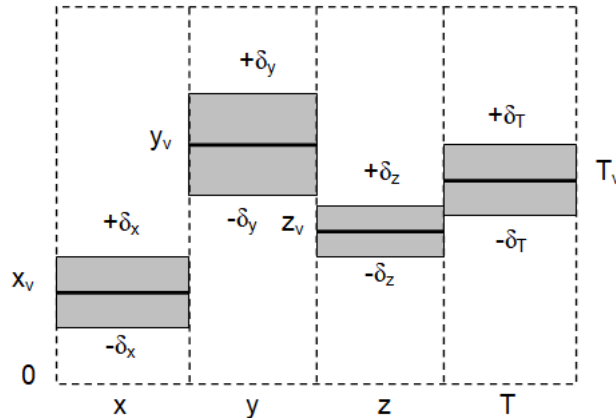


Figura 6.2. Profilul vecinătății

Valorile  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  și  $\delta_z$  sunt considerate interdependente, satisfăcând relația:

$$A \cdot \delta_x^\alpha = B \cdot \delta_y^\beta = C \cdot \delta_z^\gamma = \varepsilon \quad (6.2)$$

În relația (6.2),  $\varepsilon$  definește *gradul de apropiere* al cazurilor din vecinătate, (valoarea  $\varepsilon = \text{zero}$  corespunde cazurilor identice), în timp ce exponenții  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  și coeficienții  $A$ ,  $B$ ,  $C$  reprezintă parametrii funcției de proximitate  $d$ . Expresia funcției de proximitate, atunci când evaluează apropierea între cazul curent și cazul generic al bazei de date  $k$  este:

$$d_k = \text{sgn}(x - x_k) \cdot |x - x_k|^\alpha \cdot A + \text{sgn}(y - y_k) \cdot |y - y_k|^\beta \cdot B + \text{sgn}(z - z_k) \cdot |z - z_k|^\gamma \cdot C \quad (6.3)$$

În relația (6.3)  $\text{sgn}$  este cunoscuta funcție *signum* [70], [71]. Cei șase parametri pot fi considerați coordonatele vectorului  $P = P(\alpha, \beta, \gamma, A, B, C)$ , valorile lor rezultând prin modelarea setului de cazuri considerat.

Obiectivul procedurii de delimitare a vecinătății este de a selecta din baza de date a cazurilor setul de cazuri care corespund unui profil dat de vecinătate, definit printr-o valoare dată a gradului de apropiere,  $\varepsilon$  și un pivot  $(x_v, y_v, z_v, T_v)$ . Acest lucru se poate face prin calcularea, mai întâi, cu relația (6.2), a valorilor  $\delta_x$ ,  $\delta_y$  și  $\delta_z$ :

$$\delta_x = (\varepsilon / |A|)^{1/\alpha}, \quad \delta_y = (\varepsilon / |B|)^{1/\beta}, \quad \delta_z = (\varepsilon / |C|)^{1/\gamma} \quad (6.4)$$

urmată de extragerea din baza de date a cazurilor ale căror variabile-cauză satisfac:

$$x_k \in [x_v - \delta_x, x_v + \delta_x], \quad y_k \in [y_v - \delta_y, y_v + \delta_y], \quad z_k \in [z_v - \delta_z, z_v + \delta_z]. \quad (6.5)$$

Valoarea  $\varepsilon$  este un parametru al aplicării algoritmului, în funcție de dimensiunea și structura bazei de date, precum și de specificul problemei de evaluare comparativă destinată a fi rezolvată prin atribuirea unui clasament de caz.

La iterația  $i$  a procedurii, selecția care vizează delimitarea vecinătății  $N_i$  se face prin utilizarea expresiei funcției de proximitate rezultată prin înlocuirea în relația (6.3) a valorilor din forma curentă  $P_i$  a vectorului de parametri, așa cum au rezultat după modelarea apropierii pe vecinătatea  $N_{i-1}$ .

## 6.4. Procedură pentru modelarea apropierii

După delimitarea vecinătății curente  $N_i$  a cazului considerat, apropierea dintre cazurile incluse este modelată pentru a găsi o expresie mai precisă a funcției de proximitate, exprimată printr-un nou set de valori ale parametrilor,  $P(\alpha, \beta, \gamma, A, B, C)$ . În acest scop, la început, cazul din  $N_i$  care este cel mai apropiat de cazul curent este ales drept pivot. Apoi, diferențele de coordonate  $\Delta x_j = x_j - x_v$ ,  $\Delta y_j = y_j - y_v$ ,  $\Delta z_j = z_j - z_v$  și  $\Delta T_j = T_j - T_v$ , se calculează pentru fiecare dintre cele  $n_i$  cazuri  $(x_j, y_j, z_j, T_j)$  din  $N_i$ .

În cele din urmă, relația dintre  $\Delta T$ , pe o parte și  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  și  $\Delta z$ , pe de altă parte, este modelată printr-o *regresie multiplă neliniară*, forma acesteia fiind aleasă în legătură cu funcția de proximitate (6.3):

$$\Delta T = b_4 \cdot \text{sgn} \Delta x \cdot |\Delta x|^{b_1} + b_5 \cdot \text{sgn} \Delta y \cdot |\Delta y|^{b_2} + b_6 \cdot \text{sgn} \Delta z \cdot |\Delta z|^{b_3} \quad (6.6)$$

Valorile rezultate prin modelare pentru parametrii vectorului  $B = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6)$  sunt apoi transferate într-o formă nouă a vectorului parametrilor de proximitate  $P(\alpha, \beta, \gamma, A, B, C)$  urmând a fi utilizate în continuare pentru a delimita o nouă formă a vecinătății cazului curent.

Procedurile 6.3 și 6.4 sunt executate succesiv până când două forme consecutive ale vectorilor conținând setul de parametri ai funcției de proximitate  $P_{i-1}$  și  $P_i$  rezultă identice (figura 6.1). În acel moment, se poate concluziona că rezultatele aplicării algoritmului de evaluare a ierarhizării sunt stabile.

În consecință, valoarea variabilei-efect  $T$  al cazului curent poate fi calculată prin utilizarea ultimei forme identificate pentru relația (6.6) și ierarhizarea cazului curent se poate face prin inserarea acestuia, după valoarea rezultată a variabilei-efect  $T$ , în baza de date a cazurilor.

## 6.5. Concluzii privind metoda de evaluare comparativă a procesului de fabricație

1. În domeniului fabricației, atunci când se selectează cea mai bună alternativă dintre mai multe variante potențiale, diferența dintre două cazuri nu poate fi evaluată în funcție de un criteriu universal unic (cum ar fi distanța euclidiană sau, mai general, distanța Minkowski). În loc de aceasta, ar trebui folosit un criteriu adecvat, în funcție de specificul relației cauzale modelate.
2. Există o proporționalitate între apropierea dintre cazurile analizate și precizia cerută de evaluare: cu cât apropierea este mai mare, cu atât mai mare trebuie să fie și precizia.
3. Metoda prezentată aici și anume evaluarea comparativă bazată pe seturi de cazuri, permite să se facă diferența între cazurile analizate cu un minim atât de informație inițială, cât și de efort de calcul. Evaluarea sugerată este un proces iterativ, care se oprește atunci când sunt îndeplinite condițiile impuse de precizie.
4. Precizia maximă a metodei prezentate, pentru un anumit număr de variabile-cauză, este arătată de eroarea medie pătratică (RMSE) rezultată în procesul de modelare a cazurilor din vecinătate. Dacă această limită este atinsă și diferența dintre două sau mai multe cazuri încă nu poate fi făcută, atunci soluția este de a declara aceste cazuri echivalente sau de a mări numărul de variabile-cauză luate în considerare pentru descrierea variabilei rezultat.
5. După cum se va constata ulterior, aplicarea metodei de evaluare comparativă propusă este fezabilă și furnizează rezultate corespunzătoare.

## Capitolul 7

### Validare experimentală

Metoda de optimizare holistică a procesului de fabricație a fost validată prin intermediul unor experimente numerice, derulate sub formă de studii de caz, atât pentru metoda de identificare cauzală, cât și pentru metoda de evaluare comparativă. Aplicarea metodei de identificare structurală a fost, de asemenea, exemplificată într-un studiu de caz. În cadrul acestui capitol sunt prezentate toate aceste studii de caz.

Într-un prim studiu, este prezentată aplicarea metodei de identificare structurală în cazul fabricării unui rulment. În alte trei studii de caz au fost validate și evaluate corelat metoda de identificare cauzală și metoda de evaluare comparativă. În acest scop, au fost utilizate trei baze de date:

- o bază de date generată artificial, în cazul strunjirii unei piese cilindrice - în acest caz, funcția-obiectiv considerată a fost costul prelucrării;
- o bază de date reale, extrase din mediul industrial, în cazul strunjirii unui inel de rulment, adoptându-se ca funcție-obiectiv timpul de prelucrare;
- o bază de date reale, extrase din mediul industrial, în cazul fabricării unui rulment, funcția-obiectiv fiind costul acestuia.

#### 7.1. Identificare structurală în cazul fabricării unui rulment

Studiul de caz prezentat aici a fost dezvoltat pentru a exemplifica aplicarea metodei de identificare structurală (capitolul 4) prin integrarea acesteia în cadrul unui proces de optimizare holistică. În acest scop, a fost abordat procesul de fabricație a rulmenților. Acuratețea impusă pentru selectarea variantei optime a fost de 10%.

Pentru aplicarea metodei de optimizare holistică au fost identificate activitățile necesare pentru fabricația rulmenților și a componentelor acestora, pornind de la primirea comenzilor până la livrarea produselor către clienți.

Rulmentul ca produs finit este compus din următoarele elemente principale: inel exterior, inel interior, elemente de rulare (bile sau role) și colivie.

Conform metodei de optimizare propusă, identificarea structurală a procesului de fabricație a fost realizată de-a lungul traseului optimal. Astfel identificarea variantelor de fabricație de la fiecare nivel s-a realizat doar pentru punctul curent de la nivelul etapei respective (figura 7.1).

În tabelul 7.1 sunt prezentate rezultate ipotetice ale etapei "analiza activității anterioare", în tabelul 7.2 fiind prezentate cele ale etapei "instrumentarea evaluării".

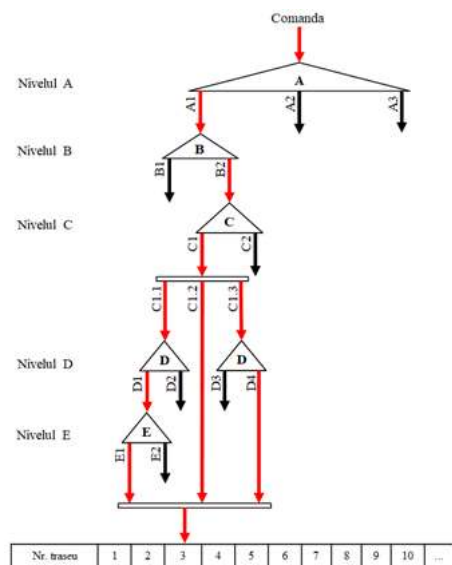


Figura 7.1. Traseul de fabricație optimal pentru studiul de caz considerat

## Validare experimentală

În cazul procesului considerat, sintagma “identifică și selectează” funcționează conform buclei de acțiuni următoare (prezentate sintetic în tabelul 7.3).

Tabelul 7.1. Analiza activităților anterioare

Nivel de identificare	Obiectul optimizării	Activități caracteristice
A	Comandă	A1 – Rulment axial; A2 – Rulment oscilant; A3 – Rulment radial
B	Asamblu	B1 – Corp de rulare (bilă); B2 – Corp de rulare (rolă)
C	Subansamblu	C1 – Rulment axial cu colivie din oțel; C2 – Rulment axial cu colivie din alamă
	Componente	C1.1 – Inel exterior; C1.2 – Inel interior; C1.3 – Role
D	Plan	D1 – Plan I inel exterior; D2 – Plan II inel exterior; D3 – Plan I role; D4 – Plan II role
E	Operație	E1 – Strunjire pe strunguri CNC; E2 – Strunjire pe strunguri clasice

Tabelul 7.2. Instrumentarea evaluării

Nivel de identificare	Obiectul optimizării	Caracteristici
P	Obiectiv	P1- Eficiență; P2 - Productivitate;
Q	Criteriu	Q1 - Cost/produs; Q2 - Cost/cantitate; Q3 – Timp de prelucrare; Q4 - Timp/cantitate;
R	Funcție	R1 - Cost [Euro/dm <sup>3</sup> ]; R2 - Timp [min/dm <sup>3</sup> ];
S	Argumente	(S1.1, S1.2, S1.3); (S2.1, S2.2); ... în funcție de modelul legăturii cauzale

Tabelul 7.3. Evaluarea procesului curent

Formularea problemei			Instrumentarea evaluării				Găsirea soluției		
“identifică”	“selectează”		“identifică”				“identifică & selectează”		
			P	Q	R	S			
			“selectează”						
Niveluri	Variable	Valori	Obiectiv	Criteriu	Funcții	Argumente	Rezultate	Delta	Mergi la
A	x <sub>A</sub>	A1, A3	P1	Q1	R1	S1.2	A1	35%	Nivel-B
B	x <sub>B</sub>	B1, B2	P2	Q3	R2	S2.1	B2	30%	Nivel-C
C	x <sub>C</sub>	C1, C2	P1	Q1	R1	S1.2	C1	25%	Nivel-C
	x <sub>C1</sub>	C1.1	P2	Q1	R1	S3.1	C1.1	17%	Nivel-D
	x <sub>C2</sub>	C1.2	P2	Q4	R2	S2.1	C1.2	8%	Stop
	x <sub>C3</sub>	C1.3	P2	Q4	R2	S2.2	C1.3	15%	Nivel-D
D	x <sub>D1</sub>	D1, D2	P1	Q1	R1	S1.1	D1	11%	Nivel-E
	x <sub>D4</sub>	D3, D4	P1	Q1	R1	S1.2	D4	8%	Stop
E	x <sub>E1</sub>	E1, E2	P1	Q2	R1	S1.2	E1	9%	Stop

Astfel, la nivelul A există trei activități potențiale: A1 – *Fabricația de rulmenți axiali*, A2 – *Fabricația de rulmenți oscilanți*, A3 – *Fabricația de rulmenți radiali*.

Potrivit criteriului de evaluare Q1 – *costul*, activitatea A1 având costul de 8 unități/bucată, activitatea A2 având costul de 12 unități/bucată și activitatea A3 având costul de 10 unități/bucată, au fost analizate două activități: A1 și A3. Dintre acestea, a fost selectată activitatea A1 (incertitudine 35%). În consecință, se acceptă comanda pentru *fabricația unor rulmenți axiali*.

Pentru aceasta, la nivelul B există două variante potențiale B1 – *Rulment axial cu bile*, B2 – *Rulment axial cu role*. Potrivit criteriului de evaluare Q3 – *timpul de fabricație*, în cazul rulmenților axiali cu bile, acesta este de 10 unități de timp, în timp ce pentru rulmenții axiali cu role este de 8 unități de timp. Ca urmare, se selectează activitatea B2 (incertitudine 30%).

**Optimizarea holistică a procesului de fabricație**

În continuare, la nivelul C există două activități potențiale C1 – *Fabricația unei colivii din oțel* și C2 – *Fabricația unei colivii din alamă*. Conform criteriului Q1, activitatea C1 (cost de 11 unități/bucată) și activitatea C2 (cost de 14 unități/bucată) au fost evaluate, fiind selectată activitatea C1, cu o incertitudine a evaluării de 25%, de asemenea mai mare decât nivelul de precizie urmărit.

În ceea ce privește componentele, la același nivel, au impact relevant asupra costului următoarele trei: C1.1 – *Inel exterior*, C1.2 – *Inel interior*, C1.3 – *Role*. Pentru acestea, se evaluează costul de fabricație pentru componenta C1.1 (cost de 2 unități/bucată) cu o incertitudine de 17%, pentru componenta C1.2 (cost de 2 unități/bucată) cu o incertitudine de 8% (în acest caz optimizarea se oprește) și pentru componenta C1.3 (cost de 3 unități/bucată) cu o incertitudine de 12%. Mai departe, pentru componentele rămase în discuție, la nivelul D există patru activități potențiale D1 – *Plan I - Inel exterior* și D2 – *Plan II - Inel exterior*, pentru C1.1, respectiv D3 – *Plan I - role* și D4 – *Plan II - role* pentru C1.3 (tabelul 7.4). Din cele patru activități, doar două activități sunt selectate, conform criteriului Q1, pentru fabricarea rulmentului și anume D1 și D4, ambele activități având un cost de 4 unități. În cazul activității D1 incertitudinea evaluării fiind de 11%, optimizarea este continuată, în timp ce pentru activitatea D4 incertitudine evaluării fiind de 8%, optimizarea se oprește.

Tabelul 7.4. Planuri de operații disponibile (a) *Inel exterior*, (b) *Role*

	Plan I	Plan II
(a) <i>Inel exterior</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forjare + Laminare (Linie);</li> <li>- Tratament termic primar;</li> <li>- Sablare;</li> <li>- Strunjire plan+interior+exterior (prin întoarcere);</li> <li>- Tratament termic secundar;</li> <li>- Rectificare plană;</li> <li>- Rectificare exterioară;</li> <li>- Rectificare interioară.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forjare;</li> <li>- Laminare;</li> <li>- Tratament termic primar;</li> <li>- Sablare;</li> <li>- Strunjire plan+interior+exterior (prin întoarcere);</li> <li>- Tratament termic secundar;</li> <li>- Rectificare plană;</li> <li>- Rectificare exterioară;</li> <li>- Rectificare interioară.</li> </ul>
(b) <i>Role</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presare la rece;</li> <li>- Tratament termic secundar;</li> <li>- Rectificare plană;</li> <li>- Rectificare exterioară.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Strunjire CNC - comandă numerică computerizată;</li> <li>- Tratament termic secundar;</li> <li>- Rectificare plană;</li> <li>- Rectificare exterioară.</li> </ul>

În final, pentru planurile de operații selectate, la nivelul E sunt identificate două activități potențiale E1 – *Strunjire pe strunguri CNC* și E2 – *Strunjire pe strunguri clasice*. Acestea sunt evaluate potrivit criteriului Q2 – *Cost/cantitate*, activitatea E1 având un cost de 4 unități și activitatea E2 un cost de 6 unități. Activitatea E1 a fost selectată ca optimă. În acest moment, întregul proces de optimizare este oprit, deoarece în toate cazurile nivelul de incertitudine rezultat scade sub 10%.

Astfel, în urma evaluărilor și selecțiilor succesive ale activităților de la diferitele niveluri ale procesului de fabricație, se obține un traseu de fabricație optimal pentru preluarea unei comenzi vizând fabricația de rulmenți, care include activitățile A1, B2, C1 – C1.1, C1.2, C1.3, D1, D4 și E1 (marcat cu roșu în figura 7.1).

## 7.2. Identificare cauzală și evaluare comparativă în cazul strunjirii unei piese cilindrice – baza de date generată artificial

Studiul de caz prezentat aici a fost dezvoltat pentru a valida și evalua corelat metoda de identificare cauzală (capitolul 5) și metoda de evaluare comparativă (capitolul 6) în cazul strunjirii unei piese cilindrice, pe o bază de date generată artificial.

## ▪ Identificare cauzală

Pentru aplicarea metodei de identificare cauzală în cazul unui proces de strunjire a unei piese cilindrice, au fost urmați pașii prezentați în capitolul 5.

### P1. Identificarea procesului

Următorul set de unsprezece variabile-cauză, a fost considerat ca având potențial pentru modelarea procesului de strunjire: lungimea piesei,  $L$ ; diametrul piesei,  $D$ ; nivelul de precizie al piesei,  $A$ ; proprietățile mecanice ale materialului piesei,  $M$ ; rigiditatea piesei,  $R$ ; viteza de așchiere,  $v$ ; avansul,  $s$ ; adâncimea de așchiere,  $t$ ; forța de așchiere,  $F$ ; puterea absorbită de strung,  $P$ ; volumul de așchii îndepărtate,  $V$ . Alți trei parametri au fost aleși ca variabile-efect: costul de prelucrare,  $C$ ; timpul de prelucrare,  $TS$ ; energia consumată,  $E$ .

Este necesar să fie făcute următoarele observații cu privire la parametri enunțați mai sus:

- Primele cinci variabile ( $L$ ,  $D$ ,  $A$ ,  $M$  și  $R$ ) sunt pur exogene (independente). Următoarele șase variabile ( $v$ ,  $s$ ,  $t$ ,  $F$ ,  $P$  și  $V$ ) sunt dependente de primele cinci, iar ultimele trei ( $C$ ,  $TS$  și  $E$ ), sunt pur endogene (dependente de toate celelalte unsprezece).
- Cei mai mulți dintre parametri au înțeles fizic clar, astfel încât aceștia pot fi exprimați direct prin valorile lor. Excepțiile ( $A$ ,  $M$  și  $R$ ) se exprimă prin valori convenționale adimensionale, de la 1 la 10, atribuite după analiza unor elemente caracteristice.

Relațiile folosite pentru calcularea  $v$ ,  $s$ ,  $t$ ,  $F$ ,  $P$  și  $V$  în funcție de  $L$ ,  $D$ ,  $A$ ,  $M$  și  $R$  sunt:

$$t = \frac{5.1 \cdot R - 0.1 \cdot A}{10} \text{ [mm]}, \quad (7.1)$$

$$s = \frac{4.4 - 0.4 \cdot A}{10} \text{ [mm/rot]}, \quad (7.2)$$

$$v = \frac{C_v}{s^{0.3} \cdot t^{0.2} \cdot T^m} \left( \frac{10}{M} \cdot x_v + \frac{R}{10} \cdot y_v \right) \text{ [m/min]}, \quad (7.3)$$

$$F = C_F \cdot s^{0.8} \cdot t \left( x_F + \frac{M}{10} \cdot y_F \right) \text{ [daN]}, \quad (7.4)$$

$$P = \frac{F \cdot v}{6000} \cdot \frac{1}{\eta} \text{ [kW]}, \quad (7.5)$$

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot t}{10^3} \text{ [cm}^3\text{]}. \quad (7.6)$$

În relațiile (7.3) și (7.4)  $C_v$ ,  $x_v$  și  $y_v$ , respectiv  $C_F$ ,  $x_F$  și  $y_F$  reprezintă constante. În relația (7.6), dimensiunile piesei  $L$  și  $D$  sunt exprimate în milimetri.

Relațiile folosite pentru calcularea  $C$ ,  $TS$  și  $E$  în funcție de  $v$ ,  $s$ ,  $t$ ,  $F$ ,  $P$  și  $V$  sunt:

$$C = \frac{V}{v \cdot s \cdot t} \left[ \left( 1 + k + \frac{\tau_{sr}}{T} \right) c_\tau + \frac{\tau_{sr} \cdot c_\tau + c_s}{T} + \frac{P \cdot c_e}{60} \right] \text{ [Euro]}, \quad (7.7)$$

$$TS = \frac{V}{v \cdot s \cdot t} \left( 1 + k + \frac{\tau_{sr}}{T} \right) \text{ [min]}, \quad (7.8)$$

$$E = \frac{P \cdot V}{v \cdot s \cdot t} \cdot \frac{1}{60} \text{ [kWh]}. \quad (7.9)$$

În relațiile de mai sus,  $\eta$  reprezintă randamentul energetic al strungului,  $k$  - raportul dintre timpul auxiliar și timpul de prelucrare,  $\tau_{sr}$  - timpul de schimbare a sculei,  $T$  - durabilitatea sculei [min],  $c_\tau$  - costul specific cu salariile [Euro/min],  $c_s$  - cheltuielile aferente utilizării sculei între două reascuțiri [Euro],  $c_e$  - prețul energiei [Euro/kWh].

**Optimizarea holistică a procesului de fabricație****P2. Concatenarea datelor**

Baza de date a cazurilor se obține prin concatenarea datelor referitoare la procesul de fabricație considerat. Este vorba de o bază de date artificială, obținută astfel:

- Intervale de variație [30, 300] și [20, 200], în milimetri, au fost alese pentru parametrii  $L$  și respectiv  $D$ . Așa cum am menționat deja, parametrii  $A$ ,  $M$  și  $R$  iau valori convenționale în intervalul [1, 10]. Diviziuni relativ uniforme compuse din  $n = 150$  de puncte au fost adoptate pentru fiecare dintre aceste cinci intervale.
- Ordinea punctelor pentru fiecare dintre cele cinci diviziuni a fost generată aleator, cu ajutorul facilităților Microsoft Excel, rezultând astfel primele cinci coloane ale bazei de date a cazurilor cu 150 de linii.
- Valorile parametrilor  $v$ ,  $s$ ,  $t$ ,  $F$ ,  $P$  și  $V$  au fost calculate cu formulele (7.1) - (7.6) pentru fiecare set de valori ale parametrilor  $L$ ,  $D$ ,  $A$ ,  $M$  și  $R$ , situați pe aceeași linie în baza de date.
- Valorile parametrilor  $C$ ,  $TS$  și  $E$  au fost calculați cu formulele (7.7) - (7.9), pe aceeași linie, pe baza valorilor găsite anterior pentru parametrii  $v$ ,  $s$ ,  $t$ ,  $F$ ,  $P$  și  $V$ .
- Valorile din fiecare dintre cele 14 coloane, generate așa cum s-a arătat mai sus, au fost scalate separat în intervalul [0, 1], cu ajutorul unei aplicații Matlab dedicate (Anexa 2).

Baza de date a cazurilor artificiale a fost stocată într-o filă a fișierului Microsoft Excel.

**P3. Combinarea cazurilor**

Baza de date pentru fascicule a fost obținută cu ajutorul unei alte aplicații MatLab (Anexa 3) scrisă în acest scop, prin combinarea bazei de date cu 150 de linii, așa cum se explică în capitolul 5, subcapitolul 5.5. Astfel, baza de date pentru fascicule a rezultat ca având  $N = C_{150}^2 = 11175$  linii (fascicule). Baza de date pentru fascicule a fost stocată într-o altă filă a fișierului Microsoft Excel. Secvența formată din fasciculele 4090 - 4094, extrase din baza de date pentru fascicule este exemplificată în tabelul 7.5.

Table 7.5. Baza de date pentru fascicule (fragmentare)

Fascicul nr. crt.	$\delta L$ 1	$\delta D$ 2	$\delta A$ 3	$\delta M$ 4	$\delta R$ 5	$\delta v$ 6	$\delta s$ 7	$\delta t$ 8	$\delta F$ 9	$\delta P$ 10	$\delta V$ 11	$\delta C$ 12	$\delta TS$ 13	$\delta E$ 14
...	.....													
4090	0.9185	0.0055	0.1490	0.4044	0.2866	0.1818	0.1490	0.2843	0.0392	0.1320	0.4571	0.8140	0.8134	0.9353
4091	0.0111	0.7222	0.7141	0.1911	0.0166	0.0484	0.7141	0.0026	0.2192	0.0856	0.0172	0.0908	0.0909	0.0621
4092	0.6777	0.1000	0.2091	0.2111	0.5822	0.2760	0.2091	0.5793	0.0801	0.2183	0.4904	0.6452	0.6439	0.9378
4093	0.4777	0.1444	0.0422	0.9700	0.8611	0.7809	0.0422	0.8620	0.3572	0.7621	0.4664	0.0088	0.0078	0.2509
4094	0.5666	0.4333	0.7174	0.9311	0.5500	0.3387	0.7174	0.5651	0.9094	0.8361	0.2392	0.0610	0.0614	0.0552
...	.....													

**P4. Identificarea legăturilor cauzale**

La început, pragul de referință (vezi 5.6.1) a fost setat la valoarea  $h_{ref} = 0.2097$ , deci  $h_{k-1} = h_6 = 0.2621$ .

**P4.1. Reducerea dimensionalității problemei**

Conform procedurii prezentate în subcapitolul 5.6.1, la pasul 1, ferestre având  $H = 0$  și  $h = h_{ref}$  au fost considerate pentru zece din cele unsprezece variabile-cauză, în timp ce pentru a unsprezecea se măsoară dimensiunea imaginii  $\Delta_i$  ( $i = 1, 2, 11$ , succesiv). Valorile obținute pentru  $\Delta_i$ , utilizând o aplicație MatLab (Anexa 4), sunt prezentate în tabelul 7.6.

După cum se poate observa,  $\Delta_{min} = 0.2036$ , corespunzător variabilelor  $A$  și  $s$ , prin urmare unul dintre ele (de exemplu,  $s$ ) poate fi eliminat.

La pasul 2, acțiunea din etapa anterioară se repetă pentru restul celor zece variabile-cauză, o altă variabilă fiind apoi eliminată și anume  $t$ , și așa mai departe.

## Validare experimentală

După pasul 5,  $\Delta_{min} = 0.3600 > h_6$ , deci cele șapte variabile-cauză rămase până aici pot fi considerate relativ independente și setul maxim de variabile-cauză fiind  $[L, D, A, M, R, v, F]$ .

Tabelul 7.6. Dimensiunea imaginii  $\Delta_i$ 

Variabile-cauză	Pașii succesivi de reducere a dimensionalității				
	Pasul 1	Pasul 2	Pasul 3	Pasul 4	Pasul 5
L	0.9333	0.9333	0.9333	0.9333	0.9333
D	0.7889	0.7889	0.7889	0.7889	0.9056
A	0.2036	0.8409	0.8409	0.8409	0.8409
M	0.7611	0.7611	0.7611	0.7611	0.7611
R	0.2078	0.2078	0.3278	0.3278	0.3600
v	0.4084	0.4084	0.4084	0.4084	0.4084
s	0.2036	-	-	-	-
t	0.2043	0.2043	-	-	-
F	0.3842	0.3842	0.3851	0.3851	0.3851
P	0.2050	0.2050	0.2050	-	-
V	0.2385	0.2385	0.2385	0.2385	-

Se poate observa că variabilele-cauză independente (primele cinci din tabelul 7.6) se regăsesc toate în setul maxim, ceea ce confirmă ceea ce era cunoscut încă de la început (când a fost construită baza de date generată artificial) și dovedește conformitatea metodei propuse.

O altă remarcă importantă este că, încă de la început, doar 7/11 variabile-cauză au fost găsite ca fiind relevante în modelarea variabilelor-efect, ceea ce înseamnă o simplificare semnificativă în modelarea problemelor care ar putea fi abordate.

#### P4.2. Evaluarea capacității de modelare

Cele trei caracteristici ale capacității de modelare au fost evaluate pentru fiecare dintre variabilele-cauză ale setului maxim, conform procedurii prezentate în subcapitolul 5.6.2 și considerând costul C ca variabilă-efect.

Rezultatele obținute cu ajutorul *Curve fitting tool* din MatLab sunt prezentate în tabelul 7.7.

Tabelul 7.7. Valorile caracteristicilor capacității de modelare

	L	D	A	M	R	v	F
a	0.2644	0.1895	0.0222	0.1273	0.0561	0.0650	0.0575
b	0.0269	0.0358	0.0475	0.0378	0.0486	0.0476	0.0437
RMSE	0.0021	0.0031	0.0010	0.3427	0.0029	0.0001	0.0002

### P5. Gruparea variabilelor

#### P5.1. Generarea de seturi cu mai puține variabile

Pentru a desena arborele legăturilor cauzale, trebuie pornit de la setul maxim și stabilit, pentru început, din ce seturi derivate va fi alcătuit arborele. În legătură cu aceasta, trebuie să fie alese variabilele-cauză care trebuie păstrate atunci când se generează succesiv seturile mai mici.

Criteriul care stă la baza acestei alegeri trebuie să fie unul dintre cele trei atribute ale capacității de modelare (MP, MC, MU).

În studiul de caz considerat, au fost selectate variabilele-cauză după criteriul MC (deci, după valorile lui  $b$ ). Mai precis, variabilele cu cea mai mare valoare MC (cele mai mici valori ale lui  $b$ ) sunt adecvate pentru a fi păstrate. Selecția variabilelor-cauză și a seturilor rezultate este prezentată în tabelele 7.8-a, 7.8-b și 7.8-c.



**Optimizarea holistică a procesului de fabricație**

Tabelul 7.8-a. Generarea setului cu 6 variabile

Variabile	L	D	A	M	R	v	F
b	0.0269	0.0358	0.0475	0.0378	0.0486	0.0476	0.0437
Setul rezultat	[L, D, M, R, v, F]		[L, D, A, M, v, F]		[L, D, A, M, R, F]		

Tabelul 7.8-b. Generarea setului cu 5 variabile

Variabile	L	D	M	R	v	F
b	0.0289	0.0352	0.0415	0.0557	0.0492	0.0332
Setul rezultat	[L, D, M, v, F]			[L, D, M, R, F]		
Variabile	L	D	A	M	v	F
b	0.0244	0.0313	0.0519	0.0474	0.0532	0.0601
Setul rezultat	[L, D, A, M, F]			[L, D, A, M, v]		
Variabile	L	D	A	M	R	F
b	0.0278	0.0375	0.0486	0.0427	0.0493	0.0444
Setul rezultat	[L, D, M, R, F]			[L, D, A, M, F]		

Tabelul 7.8-c. Generarea setului cu 4 variabile

Variabile	L	D	M	v	F
b	0.0276	0.0303	0.0456	0.0619	0.0487
Setul rezultat	[L, D, M, F]			[L, D, M, v]	
Variabile	L	D	M	R	F
b	0.0278	0.0375	0.0474	0.0557	0.0601
Setul rezultat	[L, D, M, F]			[L, D, M, R]	
Variabile	L	D	A	M	F
b	0.0284	0.0291	0.0446	0.0507	0.0604
Setul rezultat	[L, D, A, F]			[L, D, A, M]	
Variabile	L	D	A	M	v
b	0.0358	0.0411	0.0522	0.0554	0.0649
Setul rezultat	[L, D, A, v]			[L, D, A, M]	

În cele trei tabele de mai sus, variabilele cu cea mai mare valoare a parametrului  $b$  au fost marcate cu roșu. Trebuie remarcat faptul că, din cauza eliminării aceluiași variabile în succesiuni diferite, s-au obținut de două ori seturi cu aceeași structură. Astfel, arborele legăturilor cauzale va include  $1 + 3 + 4 + 6 = 14$  seturi de variabile.

**P5.2. Evaluarea capacității de modelare a seturilor de variabile**

Caracteristicile capacității de modelare trebuie evaluate pentru fiecare set, prin găsirea, cu ajutorul instrumentului *Curve fitting tool* din MatLab, a valorilor pentru  $a_c$ ,  $b_c$  și  $RMSE$ , prin aplicarea procedurii specifice definită în 5.7.2. Aceste valori sunt prezentate în tabelul 7.9.

Tabelul 7.9. Evaluarea seturilor de variabile-cauză

Setul variabilelor-cauză	$a_c$	$b_c$	RMSE
[L, D, A, M, R, v, F]	0.5051	0.0163	0.0040
[L, D, M, R, v, F]	0.5110	0.0217	0.0086
[L, D, A, M, v, F]	0.4800	0.0227	0.0032
[L, D, A, M, R, F]	0.4923	0.0116	0.0032
[L, D, M, v, F]	0.4510	0.0382	0.0046
[L, D, M, R, F]	0.4954	0.0166	0.0076
[L, D, A, M, F]	0.4657	0.0180	0.0031
[L, D, A, M, v]	0.4769	0.0235	0.0035
[L, D, M, v]	0.3654	0.0641	0.0045
[L, D, M, F]	0.3879	0.0472	0.0011
[L, D, M, R]	0.3114	0.0730	0.0054
[L, D, A, F]	0.3818	0.0453	0.0033
[L, D, A, M]	0.4522	0.0197	0.0031
[L, D, A, v]	0.4275	0.0398	0.0026

## P6. Arborele legăturilor cauzale

Poziția fiecărui set este determinată în arborele legăturilor cauzale pe direcția înălțimii (așa cum s-a menționat deja) după valoarea unuia dintre caracteristicile sale de modelare  $MP_c$ ,  $MC_c$  sau  $MU_c$  (prin urmare, în legătură cu valorile  $a_c$ ,  $b_c$  respectiv  $RMSE$ ). Arborii de legături cauzale trasați după valorile lui  $a_c$  și  $b_c$  sunt reprezentați în figura 7.2 (a) și (b).

După examinarea celor doi arbori de legături cauzale din figura 7.2, se poate observa că ierarhizarea seturilor este identică sau similară în ambele variante. În condiții normale de precizie a modelării, nu este relevant care dintre cei doi arbori de legături cauzale este desenat și utilizat pentru a alege variabilele-cauză care urmează să fie folosite pentru modelarea variabilei-efect.

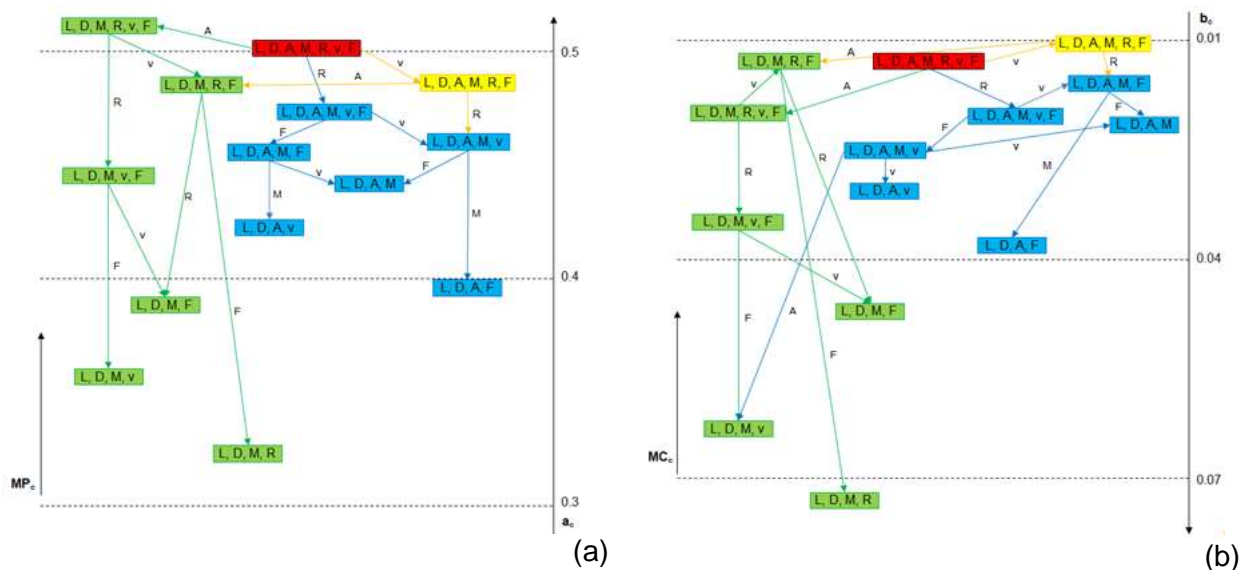


Figura 7.2. Arborele legăturilor cauzale în funcție de valorile parametrilor  $a_c$  (a) și  $b_c$  (b)

Este foarte important să remarcăm că trasarea arborilor legăturilor cauzale confirmă ceea ce știm de la bun început: seturile care includ toate cele cinci variabile condiționale pur exogene, folosite pentru a genera celelalte variabile, prezintă legături cauzale mai bune cu efectul considerat. Așa cum era de asemenea de așteptat, seturile cu mai multe variabile-cauză demonstrează o capacitate de modelare mai bună decât cele cu mai puține variabile-cauză. În fine, setul  $[L, D, A, M]$  are o capacitate rezonabilă de modelare în comparație cu setul maxim, acest lucru demonstrând că se poate obține o reducere semnificativă a dimensiunii modelului (4 în loc de 7) prin aplicarea metodei prezentate, în condițiile unei precizii bune de modelare.

### ▪ Evaluarea fezabilității

Fezabilitatea metodei sintetizată în formă grafică prin arborele legăturilor cauzale din figura 7.2, a fost testată prin găsirea și evaluarea modelelor NN ale variabilei-efect construite pe baza celor 14 seturi a variabilelor-cauză care compun fiecare arbore. Instrumentul pentru modelare cu rețelele neuronale NN-tool (eng. neural network, NN) din MATLAB a fost utilizat în acest scop. S-a urmărit evaluarea calității modelelor rezultate precum și concordanța dintre aceasta și poziția setului de variabile-cauză aferent în arborele legăturilor cauzale.

Modele NN care au două straturi (stratul ascuns fiind compus din 10 neuroni) au fost găsite pornind de la setul de date artificiale cu 150 de linii prezentat la 7.2 (au fost utilizate 104 linii pentru formarea rețelei, 23 pentru validare și 23 pentru testarea modelului). Calitatea modelului a fost evaluată prin valorile coeficientului de corelație dintre valorile de ieșire și cele țintă ( $R$ , a se vedea figura 7.3) și prin histograma erorilor (figura 7.4).

Optimizarea holistică a procesului de fabricație

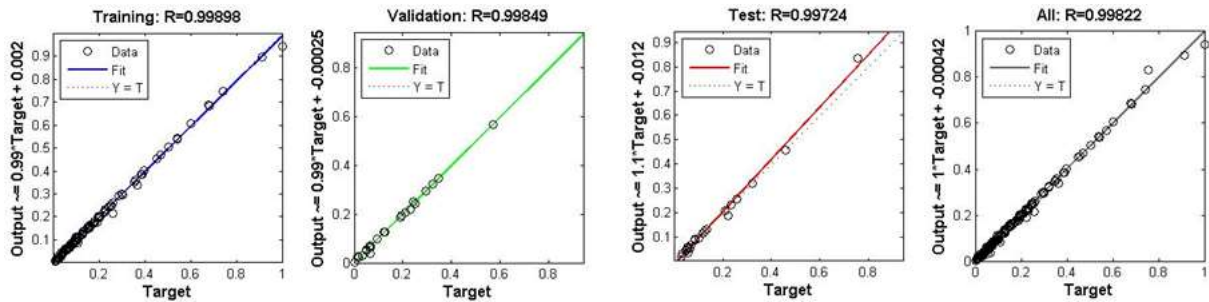


Figura 7.3. Valoarea coeficientului R corespunzătoare setului maxim

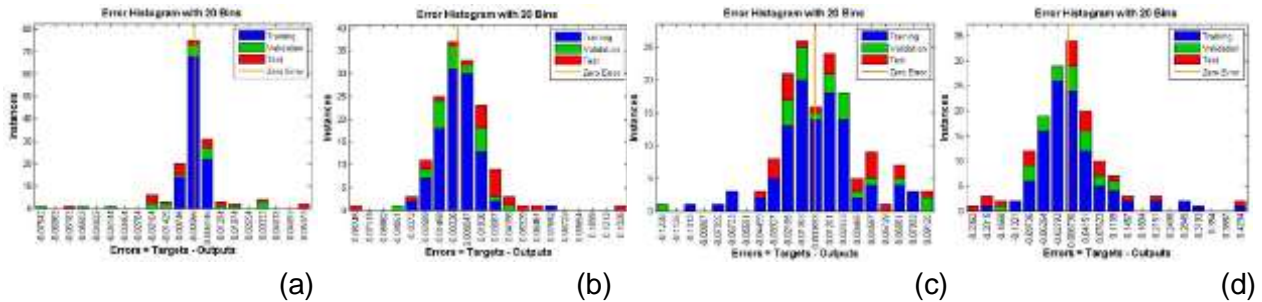


Figura 7.4. Exemple de histograme ale erorilor: (a) set [L, D, A, M, R, v, F], (b) set [L, D, M, R, F], (c) set [L, D, A, M] și (d) set [L, D, M, R]

Tabelul 7.10. Valorile coeficientului R

Nr. crt.	Set variabile-cauză	Coeficientul R			
		Antrenare	Validare	Testare	Global
1	[L, D, A, M, R, v, F]	0.9990	0.9985	0.9972	0.9982
2	[L, D, M, R, v, F]	0.9973	0.9857	0.9874	0.9872
3	[L, D, A, M, v, F]	0.9990	0.9897	0.9910	0.9953
4	[L, D, A, M, R, F]	0.9999	0.9980	0.9885	0.9962
5	[L, D, M, v, F]	0.9938	0.9338	0.9477	0.9751
6	[L, D, M, R, F]	0.9992	0.9787	0.9808	0.9917
7	[L, D, A, M, F]	0.9992	0.9938	0.9878	0.9944
8	[L, D, A, M, v]	0.9829	0.9339	0.9181	0.9697
9	[L, D, M, v]	0.9393	0.7560	0.9202	0.9124
10	[L, D, M, F]	0.9311	0.8369	0.9277	0.9164
11	[L, D, M, R]	0.8879	0.8058	0.7182	0.8389
12	[L, D, A, F]	0.9443	0.8997	0.8315	0.9176
13	[L, D, A, M]	0.9500	0.9531	0.8456	0.9374
14	[L, D, A, v]	0.9997	0.9932	0.9926	0.9977

Pentru a permite compararea capacității de modelare a seturilor variabilelor-cauză și a performanțelor modelelor NN corespunzătoare, la început s-au adus valorile pentru  $a_c$ ,  $1-b_c$  (tabelul 7.9) și  $R$  (toate, tabelul 7.10) în același interval de variație,  $[0, 1]$ , prin scalare. Apoi, cele trei seturi de valori calculate au fost reprezentate în funcție de numărul curent al setului (a se vedea tabelul 7.10), prin asocierea fiecărui set de puncte rezultate într-o poli-linie. Rezultatul este prezentat în figura 7.5.

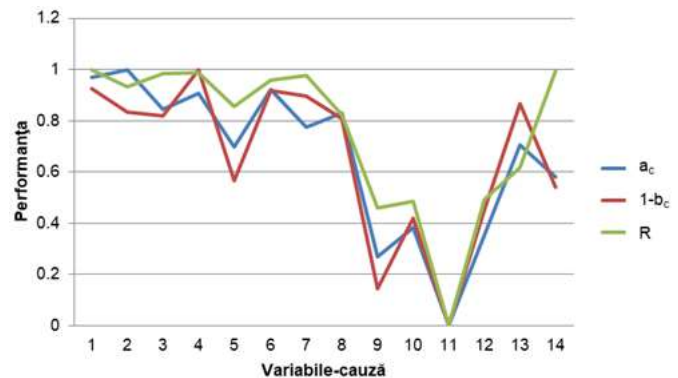


Figura 7.5. Comparație între capacitatea de modelare și performanța modelului NN

## Validare experimentală

După examinarea diagramelor din figura 7.5, putem trage următoarele concluziile:

- Profilul celor trei poli-linii este similar, atât în ceea ce privește aspectul general, cât și relativ la cele mai multe dintre tendințele de variație între punctele succesive.
- Cele trei poli-linii au puncte comune (8 și 11) sau foarte apropiate (1, 6, 10 și 12).
- Există o grupare evidentă a punctelor pe domenii (de exemplu, între 0.8 și 1 sau sub 0.6), care arată fie o capacitatea de modelare/performanță a modelului foarte bună, fie scăzută.

Acest lucru ne permite să considerăm pozitiv rezultatul validării metodei. Diferențele care apar în cazul unor seturi pot fi explicate prin diferența dintre dimensiunile domeniilor de aplicare: pentru metoda propusă setul de date are 11175 fascicule, în timp ce pentru găsirea modelelor NN, au fost doar 150 de cazuri.

**Notă:** Procedura de reducere a dimensiunilor problemelor (vezi subcapitolul 5.6.1) poate fi aplicată și variabilelor-efect  $C$ ,  $TS$  și  $E$ . Dacă ferestre care au  $H = 0$  și  $h = h_{ref} = 0.2097$  sunt impuse succesiv celor două dintre ele, atunci imaginea celui de-al treilea rezultat este:  $\Delta_{12} = 0.2094$ ,  $\Delta_{13} = 0.2099$  și  $\Delta_{14} = 0.7800$ . Acest lucru conduce la concluzia că variabilele  $C$  și  $TS$  sunt foarte dependente și ar trebui să aibă arborii de legături cauzale similari, în timp ce  $E$  este relativ independent față de celelalte două și un arbore de legături cauzale distincte trebuie să fie trasat în cazul său.

#### ▪ **Aplicabilitatea metodei în cazul unei baze de date restrânsă**

Un aspect important a fi demonstrat este capacitatea metodei de identificare a legăturilor cauzale de a furniza rezultate veridice și în cazul unei baze de date a cazurilor semnificativ mai mică. În acest scop, aplicarea metodei a fost reluată pe o bază de date incluzând doar 50 de cazuri (în loc de cele 150 de mai sus), rezultată, de fapt, preluând prima treime din baza de date a cazurilor generată la etapa *Concatenarea datelor* de mai sus.

În acest caz, prin combinarea cazurilor rezultă un set de  $N' = C_{50}^2 = 1225$  fascicule. Trebuie observat faptul că numărul de fascicule scade mai accentuat decât numărul de cazuri (de la  $N = 11175$  la  $N' = 1225$ ), mai exact de aproximativ zece ori.

În ceea ce privește etapa *Identificarea legăturilor cauzale*, pragul de referință a fost setat la  $h_{ref} = h_5 = 0.3277$ , în funcție de numărul de fascicule disponibile pentru focalizare. Rezultatele obținute în ceea ce privește reducerea dimensionalității conduc la același set maxim ca în cazul utilizării întregii baze de date, și anume [L, D, A, M, R, v, F] prezentat în tabelul 7.11.

Tabelul 7.11. Dimensiunea imaginii  $\Delta_i'$

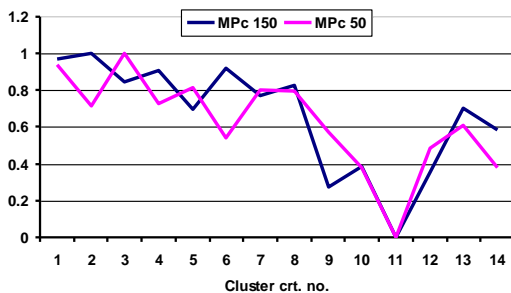
Variabile-cauză	Pașii succesivi de reducere a dimensionalității				
	Pasul 1	Pasul 2	Pasul 3	Pasul 4	Pasul 5
L	0.8037	0.8444	0.8444	0.8444	0.8444
D	0.7167	0.9056	0.9056	0.9056	0.9056
A	0.3192	0.3192	0.3192	0.7197	0.7197
M	0.7800	0.7800	0.9189	0.9189	0.9189
R	0.3278	0.3278	0.3278	0.3278	0.6001
v	0.4535	0.4535	0.4535	0.4535	0.4535
s	0.3192	0.3192	0.3192	-	-
t	0.3240	0.3240	0.3240	0.3240	-
F	0.5849	0.5849	0.5849	0.5849	0.5849
P	0.2661	0.2661	-	-	-
V	0.2066	-	-	-	-

**Optimizarea holistică a procesului de fabricație**

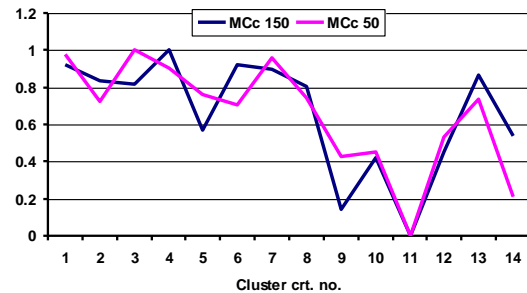
Tabelul 7.12. Evaluarea seturilor de variabile-cauză

Setul variabilelor-cauză	$a_c$	$b_c$	RMSE
[L, D, A, M, R, v, F]	0.2995	0.0167	0.0049
[L, D, M, R, v, F]	0.2717	0.0243	0.0029
[L, D, A, R, v, F]	0.2596	0.0291	0.0035
[L, D, A, M, v, F]	0.3072	0.0159	0.0068
[L, D, R, v, F]	0.2576	0.0299	0.0030
[L, D, M, v, F]	0.2841	0.0232	0.0053
[L, D, A, v, F]	0.2801	0.0251	0.0038
[L, D, A, M, v]	0.2818	0.0237	0.0050
[L, D, v, F]	0.2969	0.0217	0.0042
[L, D, R, F]	0.2332	0.0310	0.0019
[L, D, M, v]	0.2543	0.0334	0.0052
[L, D, A, F]	0.2436	0.0301	0.0040
[L, D, A, v]	0.2304	0.0400	0.0012

În cele din urmă, rezultatele obținute după etapa *Identificarea legăturilor cauzale* sunt prezentate în tabelul 7.12, unde liniile care conțin seturi diferite de cele rezultate în cazul setului de date cu 150 de cazuri sunt umbrite în gri. Au fost evaluate aceleași seturi (cele rezultate din prima versiune a setului de date și cele prezentate în tabelul 7.9) prin implementarea algoritmului specific bazat pe ambele seturi de date. Valorile rezultate pentru  $MP_c$  și respectiv  $MC_c$  sunt prezentate în figura 7.6.



(a)



(b)

Figura 7.6. Comparație între valorile criteriilor obținute pentru seturile de date cu 150 respectiv 50 de cazuri: (a) Puterea de modelare ( $MP_c$ ); (b) Capacitatea de modelare ( $MC_c$ )

În urma aplicării metodei pentru setul cu 50 de cazuri, pot fi făcute următoarele observații:

- același set maxim rezultă după aplicarea algoritmului de reducere a dimensionalității;
- cele mai multe seturi de variabile (aproximativ 2/3) au compoziția identică în ambele cazuri;
- valorile criteriilor de evaluare a capacității de modelare a seturilor sunt diferite în câteva cazuri față de cele obținute din baza de date extinsă, dar monotonia poli-liniilor din figura 7.6 este aceeași, cum aceleași sunt și seturile cu comportament extrem.

În ciuda numărului redus de cazuri din al doilea exemplu de aplicare, putem concluziona că metoda funcționează cu rezultate satisfăcătoare și atunci când informațiile referitoare la procesul de fabricație care urmează să fie modelat nu sunt (foarte) consistente.

### ▪ Evaluare comparativă

Soluționarea problemei de evaluare comparativă prin aplicarea algoritmului pentru evaluarea ierarhizării (clasării) cazurilor a fost testat, mai întâi, într-un caz simplificat, urmând pașii prezentați în capitolul 6. Astfel, baza de date include patru coloane, după cum urmează: primele trei pentru variabilele-cauză  $x$ ,  $y$ , și  $z$ ; ultima pentru variabila-efect,  $T$ ;  $n = 150$  linii, vezi relația (6.1).

Valorile pentru fiecare variabilă-cauză au fost considerate ca o diviziune neuniformă a intervalului  $[0,1]$ , distribuite aleator, separat pentru fiecare coloană.

Valorile variabilei-efect au fost calculate cu relația:

$$T(x, y, z) = 2 \cdot x^3 + 3 \cdot y^2 + 2.5 \cdot z + 0.5 \quad (7.10)$$

## Validare experimentală

## 1. Evaluarea ierarhizării cazului

Presupunem cazul curent ( $x_1 = 0.6$ ,  $y_1 = 0.2$ ,  $z_1 = 0.7$ ), care trebuie să fie ierarhizat în raport cu baza de date a cazurilor de mai sus. La început, se selectează un pivot ( $x_{v1} = 0.58889$ ,  $y_{v1} = 0.18333$ ,  $z_{v1} = 0.72859$ ,  $T_{v1} = 0.35724$ ), ales din baza de date a cazurilor. Apoi, algoritmul de evaluare a ierarhizării cazului a fost rulat iterativ, rezultatele fiind prezentate în tabelele 7.13 și 7.14. Modelarea prin regresie multiplă neliniară a fost efectuată în MatLab (pachetul *Optimization tools*).

Tabelul 7.13. Rezultatele aplicării algoritmului de evaluare a ierarhizării (parametri)

Repetare	A	B	C	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\epsilon$	$\delta_x$	$\delta_y$	$\delta_z$	RMSE
1	1	1	1	1	1	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.015
2	0.6210	0.0929	0.1942	1.149	0.6059	0.6014	0.006	0.144	0.582	0.170	0.017
3	2.002	0.7133	0.198	1.705	1.686	0.6311	0.008	0.159	0.287	0.271	0.016
4	1.540	0.438	0.1804	1.534	1.397	0.5410	0.008	0.153	0.314	0.259	0.016
5	1.540	0.438	0.1804	1.534	1.397	0.5410	0.008	0.153	0.314	0.259	0.016

Tabelul 7.14. Rezultatele aplicării algoritmului de evaluare a ierarhizării (vecinătăți)

	Liniiile din baza de date a cazurilor care compun vecinătatea curentă											
$N_1$	11	19	20	35	36	38	64	72	105	109	123	141
$N_2$	11	19	20	35	36	38	64	89	105	124	125	141
$N_3$	11	19	20	23	35	36	38	64	105	109	125	141
$N_4$	11	19	20	23	35	36	38	64	105	109	125	141
$N_5$	11	19	20	23	35	36	38	64	105	109	125	141

Calitatea modelării vecinătăților de cazuri prin regresie multiplă neliniară este evaluată prin calcularea parametrului *eroare medie pătratică* (RMSE). După cum se poate observa cu ușurință, algoritmul se stabilizează rapid, după doar patru iterații - a cincea iterație dă aceleași rezultate ca și cea precedentă. În consecință, relația (6.6) poate fi utilizată (în forma rezultată după ultima modelare prin regresie multiplă neliniară) pentru calcul  $\Delta T_1 = T_1 - T_{v1}$ . Valoarea obținută este  $\Delta T_1 = -0.02339$ , prin prezenta  $T_1 = 0.33385$  și ierarhizarea cazului considerat este  $R_1 = 47$ .

## 2. Evaluarea comparativă propriu-zisă

Pentru a exemplifica evaluarea comparativă bazată pe ierarhizarea cazurilor, se iau în considerare două cazuri diferite: primul este cel definit deja în paragraful precedent, în timp ce al doilea este ( $x_2 = 0.25$ ,  $y_2 = 0.15$ ,  $z_2 = 0.45$ ). Problema de rezolvat este selectarea, dintre cele două cazuri, a celui care are cea mai mică valoare a variabilei-efect.

Algoritmul de evaluare a ierarhizării cazurilor se aplică încă o dată, pentru al doilea caz, la care pivotul ( $x_{v2} = 0.26296$ ,  $y_{v2} = 0.13333$ ,  $z_{v2} = 0.44271$ ,  $T_{v2} = 0.16722$ ) este ales din aceeași bază de date a cazurilor. De data aceasta, algoritmul se stabilizează după numai trei iterații și oferă următoarele rezultate:  $A = 6.4576$ ,  $B = 0.57096$ ,  $C = 0.33746$ ,  $\alpha = 3.644$ ,  $\beta = 1.563$ ,  $\gamma = 0.89287$ , cu  $RMSE = 0.00742$ . În același mod ca mai sus, găsim  $\Delta T_2 = 0.00511$ ,  $T_2 = 0.17233$  și ierarhizarea cazului este  $R_2 = 17$ . În condițiile problemei abordate, avem  $R_2 < R_1$  deci soluția problemei constă în selectarea celui de-al doilea caz.

În ciuda faptului că lucrurile pot părea simple, există încă o problemă care trebuie clarificată: ce se întâmplă când diferența dintre valorile variabilei-efect este prea mică. De exemplu, să presupunem că alternativa trebuie aleasă dintre cazul potențial și alte două cazuri potențiale: ( $x_3 = 0.15$ ,  $y_3 = 0.25$ ,  $z_3 = 0.8$ ) și ( $x_4 = 0.75$ ,  $y_4 = 0.15$ ,  $z_4 = 0.55$ ).

Aplicând din nou algoritmul pentru atribuirea ierarhizării cazului, găsim  $T_3 = 0.33147$  ( $RMSE = 0.0127$ ) și  $R_3 = 46$ , respectiv  $T_4 = 0.34991$  ( $RMSE = 0.0136$ ) și  $R_4 = 48$ , care trebuie comparat cu  $T_1 = 0.33385$  ( $RMSE = 0.0166$ ),  $R_1 = 47$ . Deoarece diferențele dintre valorile  $T_1$ ,  $T_3$  și  $T_4$  sunt de același ordin de mărime ca  $RMSE = (0.01...0.02)$ , aceasta înseamnă că ierarhizările rezultate sunt incerte și cele trei cazuri ar putea fi considerate echivalente. În acest caz, o soluție se va putea găsi prin creșterea numărului de descriptori luați în calcul la definirea variabilei-efect.

### 3. Condiții de aplicare a algoritmului

Studiul prezentat abordează o situație favorabilă: variabila-efect depinde exclusiv de cele trei variabile-cauză  $x$ ,  $y$  și  $z$ . În problemele practice, uneori este greu de găsit cu exactitate variabilele-cauză necesare pentru modelarea corectă a variabilei-efect.

În legătură cu aceasta, există două posibilități:

- una sau mai multe variabile-cauză luate în considerare pentru modelare nu au, de fapt, o influență semnificativă asupra variabilei-efect;
- una sau mai multe variabile-cauză care au impact asupra variabilei-efect sunt ignorate.

Întrebarea este „Cum se poate realiza, atunci când se aplică algoritmul de evaluare a ierarhizării cazurilor, că ne aflăm într-una din cele două situații nedorite de sus?”

Pentru găsirea răspunsului, ambele situații au fost simulate pe rând, în cele ce urmează.

#### a) Variabila-cauză cu nici o influență

Presupunem că variabila-cauză  $y$  nu are nici o influență asupra variabilei-efect  $T$ , prin urmare relația (7.10) coeficientul termenului, inclusiv  $y$ , a fost anulat înainte de generarea bazei de date artificiale. Totuși, algoritmul a fost aplicat în forma prezentată în subcapitolul 6.2, care presupune că  $T = T(x, y, z)$ , pentru a evalua ierarhizarea cazului potențial ( $x_1 = 0.6$ ,  $y_1 = 0.2$ ,  $z_1 = 0.7$ ). Același pivot a fost ales din baza de date a cazurilor, și anume ( $x_{v1} = 0.58889$ ,  $y_{v1} = 0.18333$ ,  $z_{v1} = 0.72859$ ,  $T_{v1} = 0.35724$ ). La prima iterație, modelarea prin regresie multiplă neliniară aplicată vecinătății  $N_1$  a furnizat rezultate anormale pentru parametrii care se referă la al doilea termen din relația (6.6) și, prin urmare, din relația (6.3):  $\beta = 82249$  și  $B = -64684$ , în timp ce la a doua iterație modelarea  $N_2$  nu a reușit să mai găsească niciun rezultat.

Deoarece al doilea termen este cel care implică variabila-cauză  $y$ , putem afirma că valorile rezultate prin modelare pentru parametrii aferenți unui termen din relația (6.6) arată posibilitatea ca variabila din acest termen să nu aibă un impact semnificativ asupra variabilei-efect.

#### b) Variabila-cauză ignorată

De această dată s-a generat baza de date a cazurilor prin adăugarea unei a patra variabilă-cauză  $w$ , ale cărei valori au fost generate în același mod ca și pentru  $x$ ,  $y$  și  $z$ , și prin calcularea valorii variabilei-efect  $T$  după luarea în considerare a unui termen suplimentar în relația (7.10):

$$T(x, y, z, w) = 2 \cdot x^3 + 3 \cdot y^2 + 2.5 \cdot z + 1.5 \cdot w^{1.5} + 0.5 \quad (7.11)$$

Algoritmul de evaluare a ierarhizării unui caz a fost de asemenea aplicat în forma prezentată în subcapitolul 6.2, care presupune că  $T = T(x, y, z)$ . Același caz potențial și pivot ca mai sus au fost luate în considerare. La prima iterație, pentru modelarea efectuată, am obținut  $RMSE = 0.0697$ , valoare care este de câteva ori mai mare decât cea normală (în jur de 0,01). Acest lucru arată că rezultatul modelării este necorespunzător, o cauză posibilă fiind absența a cel puțin unei variabile-cauză din relația (7.11).

În continuare, este prezentată aplicarea metodei de evaluare comparativă în cazul unui set de 4 variabile selectat dintre seturile generate prin aplicarea metodei de identificare cauzală pe baza de date generată artificial (după cum s-a arătat mai sus). Astfel, se consideră setul de variabile-cauză  $[L, D, A, M]$ , deoarece are o capacitate de modelare bună (figura 7.4). Ca variabilă-efect se alege costul  $C$ . Prin urmare, în situația prezentată, baza de date utilizată include cinci coloane, după cum urmează: primele patru pentru variabilele-cauză,  $L, D, A$  și  $M$ ; ultima pentru variabila-efect,  $C$ ;  $n = 150$  linii.

### 1. Evaluarea ierarhizării cazului

Presupunem cazul curent ( $L_1 = 0.85$ ,  $D_1 = 0.3$ ,  $A_1 = 0.6$ ,  $M_1 = 1$ ), care trebuie să fie ierarhizat în raport cu baza de date a cazurilor de mai sus. La început, se selectează un pivot ( $L_{v1} = 0.840741$ ,  $D_{v1} = 0.327778$ ,  $A_{v1} = 0.58287$ ,  $M_{v1} = 1$ ,  $C_{v1} = 0.250209$ ), ales din baza de date a cazurilor. Apoi, algoritmul de evaluare a ierarhizării cazului a fost rulat iterativ. Modelarea prin regresie multiplă neliniară a fost efectuată în MatLab (pachetul *Optimization tools*). Algoritmul se stabilizează după opt iterații - a noua iterație dă aceleași rezultate ca și cea precedentă.

În consecință, relația (6.6) poate fi utilizată (în forma rezultată după ultima modelare prin regresie multiplă neliniară) pentru calcul  $\Delta C_1 = C_1 - C_{v1}$ . Valoarea obținută este  $\Delta C_1 = -0.00367$ , prin prezenta  $C_1 = 0.24653$  și ierarhizarea cazului considerat este  $R_1 = 117$ .

## Validare experimentală

## 2. Evaluarea comparativă

Se iau în considerare două cazuri: primul este cel definit deja în paragraful precedent, în timp ce al doilea este ( $L_2 = 0.65$ ,  $D_2 = 0.55$ ,  $A_2 = 0.4$ ,  $M_2 = 0.3$ ). Problema de rezolvat este selectarea, dintre cele două cazuri, a celui care are cea mai mică valoare a variabilei-efect.

Algoritmul de evaluare a ierarhizării cazurilor se aplică încă o dată, pentru al doilea caz potențial, la care pivotul ( $L_{v2} = 0.65185$ ,  $D_{v2} = 544444$ ,  $A_{v2} = 414905$ ,  $M_{v2} = 0.25888$ ,  $C_{v2} = 0.12446$ ) este ales din aceeași bază de date a cazurilor. De data aceasta, algoritmul se stabilizează după numai șase iterații și oferă următoarele rezultate:  $A = 6.4576$ ,  $B = 0.57096$ ,  $C = 0.33746$ ,  $D = \alpha = 3.644$ ,  $\beta = 1.563$ ,  $\gamma = 0.89287$ , cu  $RMSE = 0.071$ . În același mod ca mai sus, găsim  $\Delta C_2 = 0.004455$ ,  $C_2 = 0.12892$  și ierarhizarea cazului este  $R_2 = 84$ . În condițiile problemei abordate, avem  $R_2 < R_1$  deci soluția problemei constă în selectarea celui de-al doilea caz.

### 7.3. Identificare cauzală și evaluare comparativă în cazul strunjirii unui inel de rulment – bază de date colectate din mediul industrial

Studiul de caz prezentat aici a fost dezvoltat pentru a valida și evalua corelat metoda de identificare cauzală (capitolul 5) și metoda de evaluare comparativă (capitolul 6) în cazul strunjirii unui inel de rulment, utilizând o bază de date reale, colectate din mediul industrial.

#### ▪ Identificare cauzală

Pentru aplicarea metodei de identificare cauzală în cazul unui proces de strunjire a unui inel de rulment, au fost urmați pașii prezentați în capitolul 5.

#### P1. Identificarea procesului

Pentru identificarea procesului s-a utilizat o bază de date conținând informații despre strunjirea mai multor tipuri de inele de rulment. Pentru acestea, următorul set de zece variabile-cauză, a fost considerat ca având potențial pentru modelarea procesului de strunjire: diametrul exterior și interior al inelului,  $D_e$ ,  $D_i$ ; lățimea inelului,  $L$ ; viteza de așchiere,  $v$ ; avansul,  $s$ ; adâncimea de așchiere,  $t$ ; volumul de așchii îndepărtate,  $V$ ; forța de așchiere,  $F$ ; puterea absorbită de strung,  $P$ ; indice de complexitate,  $I_c$  (în legătură cu profilul inelului). Ca variabilă-efect a fost ales timpul de prelucrare  $TS$ .

#### P2. Concatenarea datelor

Baza de date colectate are 155 de linii, unele dintre ele fiind prezentate, spre exemplificare, în tabelele 7.15-a și 7.15-b, înainte și respectiv după scalare.

Tabelul 7.15-a. Baza de date cazuri reale (valori reale, extras)

Cazuri nr. crt.	$D_e$ [mm]	$D_i$ [mm]	$L$ [mm]	$v$ [m/min]	$f$ [mm/rot]	$t$ [mm]	$V$ [mm <sup>3</sup> ]	$F$ [N]	$P$ [kW]	$I_c$ [-]	$TS$ [min]
1	89.18	69.46	31.2	259.69	0.35	0.82	48.399	970.876	5.502	3.75	3.599
2	125.12	108.64	31.22	261.81	0.17	0.76	40.333	523.539	3.371	2.5	3.791
3	170.02	139.96	39.24	277.05	0.304	0.19	144.046	205.594	1.888	7.7	2.52
4	215.14	181.86	47.24	300.08	0.32	0.17	217.414	188.196	1.879	2.21	3.841
5	190	157.45	36.2	286.53	0.34	0.11	167.733	127.438	1.509	4.2	2.792
...	.....										

Tabelul 7.15-b. Baza de date cazuri reale (valori scalate, extras)

Cazuri nr. crt.	$D_e$	$D_i$	$L$	$v$	$f$	$t$	$V$	$F$	$P$	$I_c$	$TS$
1	0.222	0.235	0.320	0.274	0.861	0.470	0.110	0.493	0.431	0.310	0.306
2	0.368	0.407	0.320	0.291	0.361	0.433	0.091	0.252	0.220	0.169	0.322
3	0.551	0.545	0.432	0.416	0.733	0.084	0.332	0.080	0.073	0.757	0.214
4	0.735	0.729	0.543	0.605	0.777	0.070	0.503	0.070	0.073	0.136	0.327
5	0.633	0.621	0.390	0.494	0.833	0.033	0.387	0.038	0.036	0.361	0.237
...	.....										

#### P3. Combinarea cazurilor

De această dată, baza de date pentru fascicule obținută cu aceeași aplicație Matlab (Anexa 3) a rezultat ca având  $N = C_{155}^2 = 11935$  linii (fascicule).



**Optimizarea holistică a procesului de fabricație****P4. Identificarea legăturilor cauzale****P4.1. Reducerea dimensionalității problemei**

Procedura a fost aplicată în aceleași condiții ca în cazul bazei de date cu cazuri artificiale:  $h_{ref} = h_7 = 0.2097$ ,  $h_{k-1} = h_6 = 0.2621$ . Rezultatele sunt prezentate în tabelul 7.16.

Tabelul 7.16. Dimensiunea imaginii  $\Delta_i$  și  $\Delta_{min}$ 

Variabile cauză	Pași succesivi de reducere a dimensionalității			
	Pasul 1	Pasul 2	Pasul 3	Pasul 4
$D_e$	0.2445	0.2445	-	-
$D_i$	0.2353	0.2626	0.5183	0.5183
L	0.7234	0.7234	0.7234	0.7234
v	0.6407	0.6407	0.6407	0.6407
f	0.7322	0.7322	0.7322	0.9155
t	0.5643	0.5643	0.5643	0.8818
V	0.6152	0.6152	0.7088	0.7088
F	0.2288	0.3099	0.25305	-
P	0.2225	-	-	-
$I_c$	0.9491	0.9491	0.9491	0.9491

Trei variabile-cauză ( $D_e$ , F și P) au fost considerate ca fiind dependente de celelalte și eliminate. Cele șapte variabile-cauză rămase conduc la setul maxim: [ $D_i$ , L, v, f, t, V,  $I_c$ ].

**P4.2. Evaluarea capacității de modelare**

Cele trei caracteristici ale capacității de modelare au fost evaluate pentru fiecare dintre variabilele-cauză ale setului maxim și considerând timpul de prelucrare TS ca variabilă-efect. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 7.17.

Tabelul 7.17. Valorile caracteristicilor capacității de modelare

	$D_i$	L	v	f	t	V	$I_c$
a	0.1272	0.2241	0.05765	0.0041	0.02191	0.3234	0.01558
b	0.04458	0.03765	0.04864	0.05269	0.04961	0.03479	0.05466
RMSE	0.00116	0.00058	0.00176	0.00112	0.00185	0.00171	0.00269

**P5. Gruparea variabilelor****P5.1. Generarea de seturi cu mai puține variabile**

Drept criteriu pentru selectarea variabilelor-cauză, care urmează să fie eliminate când se generează seturi mai mici, a fost adoptat MC (evaluat prin valorile lui b). Trei seturi cu șase variabile-cauză au fost generate, fiecare din setul maxim, la prima ramificare. Apoi, două seturi cu cinci variabile au rezultat din fiecare din acestea trei, la al doilea nivel al ramificării. În final, au fost obținute două seturi de patru variabile din fiecare set cu cinci variabile. După evaluarea seturilor potențiale în scopul identificării capacității de modelare, procesul de generare de seturi mai mici a trebuit să fie oprit la nivelul de seturi cu 4 variabile. Selecția variabilelor-cauză și a seturilor rezultate este prezentată în tabelele 7.18-a, 7.18-b și 7.18-c.

Tabelul 7.18-a. Generarea setului cu 6 variabile

Variabile	$D_i$	L	v	f	t	V	$I_c$
b	0.0445	0.0376	0.04864	0.05269	0.04961	0.03479	0.05466
Set rezultat	[ $D_i$ , L, v, t, V, $I_c$ ]		[ $D_i$ , L, v, f, V, $I_c$ ]		[ $D_i$ , L, v, f, t, V]		

Tabelul 7.18-b. Generarea setului cu 5 variabile

Variabile	$D_i$	L	v	t	V	$I_c$
b	0.05314	0.03771	0.0521	0.0541	0.03757	0.05427
Set rezultat	[ $D_i$ , L, v, V, $I_c$ ]			[ $D_i$ , L, v, t, V]		
Variabile	$D_i$	L	v	f	V	$I_c$
b	0.04535	0.04114	0.05046	0.05362	0.02285	0.0541
Set rezultat	[ $D_i$ , L, v, V, $I_c$ ]			[ $D_i$ , L, v, f, V]		
Variabile	$D_i$	L	v	f	t	V
b	0.05295	0.04771	0.05579	0.06024	0.05769	0.04001
Set rezultat	[ $D_i$ , L, v, t, V]			[ $D_i$ , L, v, f, V]		

## Validare experimentală

Tabelul 7.18-c. Generarea setului cu 4 variabile

Variabile	$D_i$	$L$	$v$	$V$	$I_c$
b	0.05281	0.04195	0.05341	0.03541	0.05556
Set rezultat	[ $D_i, L, V, I_c$ ]		[ $D_i, L, v, V$ ]		
Variabile	$D_i$	$L$	$v$	$t$	$V$
b	0.05777	0.05241	0.05879	0.06036	0.0438
Set rezultat	[ $D_i, L, t, V$ ]		[ $D_i, L, v, V$ ]		
Variabile	$D_i$	$L$	$v$	$f$	$V$
b	0.05826	0.05323	0.06101	0.0638	0.03906
Set rezultat	[ $D_i, L, f, V$ ]		[ $D_i, L, v, V$ ]		

În final, au rezultat 3 seturi distincte (în loc de 6) cu 5 variabile și 4 (în loc de 6) seturi cu 4 variabile. Astfel, arborele legăturilor cauzale va include  $1 + 3 + 3 + 4 = 11$  seturi.

**P5.2. Evaluarea capacității de modelare a seturilor de variabile**

Criteriile de evaluare a capacității de modelare a seturilor rămase au fost evaluate prin valorile lui  $a_c$ ,  $b_c$  și  $RMSE$ , prezentate în tabelul 7.19.

Tabelul 7.19. Evaluarea seturilor de variabile-cauză

Setul variabilelor-cauză	$a_c$	$b_c$	RMSE
[ $D_i, L, v, f, t, V, I_c$ ]	0.4058	0.0261	0.0034
[ $D_i, L, v, t, V, I_c$ ]	0.4013	0.0266	0.0030
[ $D_i, L, v, f, V, I_c$ ]	0.4263	0.0240	0.0030
[ $D_i, L, v, f, t, V$ ]	0.4178	0.0287	0.0041
[ $D_i, L, v, V, I_c$ ]	0.4167	0.0263	0.0028
[ $D_i, L, v, t, V$ ]	0.4064	0.0314	0.0048
[ $D_i, L, v, f, V$ ]	0.4253	0.0310	0.0044
[ $D_i, L, V, I_c$ ]	0.3722	0.0344	0.0023
[ $D_i, L, v, V$ ]	0.4339	0.0314	0.0047
[ $D_i, L, t, V$ ]	0.3774	0.0365	0.0365
[ $D_i, L, f, V$ ]	0.3919	0.0372	0.0039

- **Evaluare comparativă**

În continuare, este prezentată aplicarea metodei de evaluare comparativă în cazul unui set de 4 variabile selectat dintre seturile generate prin aplicarea metodei de identificare cauzală pe baza de date reale (după cum s-a arătat mai sus). Astfel, se consideră setul de variabile-cauză [ $D_i, L, v, V$ ], deoarece are o capacitate de modelare bună. Ca variabilă-efect se alege timpul de prelucrare  $TS$ . Baza de date utilizată include  $n = 155$  linii.

**1. Evaluarea ierarhizării cazului**

Presupunem cazul curent ( $D_{i1} = 0.3$ ,  $L_1 = 0.7$ ,  $v_1 = 0.5$ ,  $V_1 = 0.45$ ), care trebuie să fie ierarhizat în raport cu baza de date a cazurilor de mai sus. La început, se selectează un pivot ( $D_{i1} = 0.27903$ ,  $L_{v1} = 0.69646$ ,  $v_{v1} = 0.48360$ ,  $V_{v1} = 0.47986$ ,  $TS_{v1} = 0.42490$ ), ales din baza de date a cazurilor. Apoi, algoritmul de evaluare a ierarhizării cazului a fost rulat iterativ.

Algoritmul se stabilizează rapid, după trei iterații - a patra iterație dă aceleași rezultate ca și cea precedentă. În consecință, relația (6.6) poate fi utilizată (în forma rezultată după ultima modelare) pentru calcul  $\Delta TS_1 = TS_1 - TS_{v1}$ . Valoarea obținută este  $\Delta TS_1 = 0.00391$ , prin prezenta  $TS_1 = 0.42881$  și ierarhizarea cazului considerat este  $R_1 = 145$ .

**2. Evaluarea comparativă propriu-zisă**

Pentru a exemplifica evaluarea comparativă bazată pe ierarhizarea cazurilor, se iau în considerare două cazuri diferite: primul este cel definit deja în paragraful precedent, în timp ce al doilea este ( $D_{i2} = 0.6$ ,  $L_2 = 0.3$ ,  $v_2 = 0.75$ ,  $V_2 = 0.25$ ). Problema de rezolvat este selectarea, dintre cele două cazuri, a celui care are cea mai mică valoare a variabilei-efect.

Algoritmul de evaluare a ierarhizării cazurilor se aplică încă o dată, pentru al doilea caz potențial, la care pivotul ( $D_{i2} = 0.59238$ ,  $L_{v2} = 0.27930$ ,  $v_{v2} = 0.73795$ ,  $V_{v2} = 0.25873$ ,  $TS_{v2} = 0.23477$ ) este a din aceeași bază de date a cazurilor. De data aceasta, algoritmul se stabilizează după patru iterații. În același mod ca mai sus, găsim  $\Delta TS_2 = 0.00147$ ,  $TS_2 = 0.23330$  și ierarhizarea cazului este  $R_2 = 100$ . În condițiile problemei abordate, avem  $R_2 < R_1$  deci soluția problemei constă în selectarea celui de-al doilea caz.

## Capitolul 8

---

### Concluzii finale și contribuții originale

Activitatea de cercetare cuprinsă în teza de doctorat intitulată "Optimizarea holistică a procesului de fabricație" a fost realizată în decursul unei perioade de trei ani, în Departamentul de Ingineria Fabricației, al Facultății de Inginerie, din cadrul Universității "Dunărea de Jos" din Galați, abordând o tematică actuală și foarte captivantă: cercetarea în vederea elaborării unui nou concept referitor la optimizarea procesului de fabricație – *optimizarea holistică*, precum și a dezvoltării unor metode originale care să permită implementarea acestui concept în practică.

În cadrul acestui capitol sunt evidențiate contribuțiile originale ale autoarei tezei, sunt prezentate concluziile finale ale tezei de doctorat și sunt identificate perspective viitoare de valorificare și dezvoltare a rezultatelor cercetărilor prezentate în teză.

#### Contribuții originale

În cadrul tezei de doctorat pot fi identificate următoarele contribuții originale:

- În urma studierii literaturii tehnice, a lucrărilor științifice și a tezelor de doctorat din acest domeniu, a fost realizată documentarea stadiului actual privind abordări ale problemelor de optimizare a performanței proceselor de fabricație.
  - Analiza bibliografiei a fost dezvoltată ținând cont de criteriile următoare:
    - ✓ formatul problemei de optimizare (de ex. uni-criterială sau multi-criterială);
    - ✓ funcția obiectiv (spre ex. productivitatea, costurile de producție, rugozitatea suprafeței fabricate, mărimea forței de așchiere, consumul de energie, etc.);
    - ✓ metodele de rezolvare (spre ex. GA, ANN, PSO, ACO, LF, metode de tip combinatoric, etc.).
- Conform cercetărilor existente au fost evidențiate câteva neajunsuri în tratarea problemei optimizării procesului de fabricație, a fost propusă o reconsiderare a conceptului de optimizare a procesului de fabricație prin direcții de cercetare și au fost prezentate obiectivele cercetării.
- În legătură directă cu cerințele de optimizare a proceselor de fabricație a fost dezvoltat conceptul de „optimizare holistică”, au fost identificate trăsăturile-cheie care descriu optimizarea holistică prin referire la optimizarea convențională.
- Conform conceptului de optimizare holistică a fost propusă o metodă originală pentru optimizarea procesului de fabricație.
- Dezvoltarea unei metode de identificare structurală a procesului de fabricație, metodă care permite o structurare a activităților aferente acestuia, la toate nivelurile implicate (contractare, planificarea producției, proiectarea produselor, planificarea proceselor și prelucrarea produselor), prin elaborarea arborelui de activități specifice (evidențiind relațiile între etapele procesului de fabricație și circuitul informațional aferent) și identificarea variantelor de desfășurare a procesului de fabricație de la nivelul fiecărei activități de fabricație.
- Dezvoltarea unei metode de identificare a legăturilor cauzale, metodă care permite furnizarea unor forme multiple pentru una și aceeași relație cauzală. Metoda a fost concepută cu scopul de a fi aplicată în cazul optimizării holistice a procesului de fabricație, înainte de evaluarea comparativă a rezultatelor activităților care pot fi selectate la nivelul unui punct de decizie din graful aferent unui proces de fabricație. Metoda permite identificarea celui mai potrivit set de variabile-cauză, pe baza căruia poate fi evaluată o variabilă-efect, în funcție de condițiile specifice unui proces de fabricație anume. Aplicarea metodei are ca finalitate elaborarea *arborelui de legături cauzale*.

---

**Concluzii finale și contribuții originale**

---

- Dezvoltarea unei metode de evaluare comparativă a variantelor procesului de fabricație, metodă care propune o abordare inovativă în analiza soluțiilor potențial optime, bazată pe ierarhizarea acestora. Metoda de evaluare comparativă a fost concepută pentru a asista selectarea variantei optime de continuare a unui proces de fabricație, la un anumit nivel de decizie. Aplicarea metodei de evaluare comparativă se face după identificarea cauzală aferentă, respectiv după adoptarea unui set de variabile-cauză care descriu variabila-efect de interes în momentul curent.
- Exemplificarea aplicării metodei de identificare structurală în cazul fabricării unui rulment. S-a urmărit realizarea grafului procesului de fabricație, incluzând structurarea activităților aferente, pentru toate etapele implicate, anume: contractare, planificarea producției, proiectarea proceselor, planificarea proceselor și prelucrarea produselor. Au fost identificate, de asemenea, variantele de desfășurare a procesului de la nivelul fiecărei activități de fabricație.
- Validarea atât a metodei de identificare cauzală, cât și a metodei de evaluare comparativă, prin intermediul unor experimente numerice, derulate sub forma a trei studii de caz, utilizând diferite baze de date:
  - o bază de date generată artificial, în cazul strunjirii unei piese cilindrice, în acest caz, funcția-obiectiv considerată a fost costul prelucrării  $C$ ;
  - o bază de date reale, colectate din mediul industrial, în cazul strunjirii unui inel de rulment, adoptându-se ca funcție-obiectiv timpul de prelucrare  $TS$ ;
  - o bază de date reale, colectate din mediul industrial, în cazul în care trebuie luată o decizie pentru acceptarea unei comenzi de fabricare a unui rulment, funcția-obiectiv fiind costul de fabricație  $C$ .

**Concluzii finale**

La finalul tezei, se pot sintetiza o serie de concluzii generale, după cum urmează:

1. Ca urmare a unei analize sistemice cu privire la formularea și rezolvarea problemelor de optimizare în general și a celor referitoare la procesul de fabricație, în special, așa cum sunt acestea reflectate în cercetările publicate până în prezent, se pot evidenția o serie de neajunsuri:
  - Domeniul de optimizare nu acoperă întregul ciclu de viață al obiectului optimizat. Când acest obiect este procesul de fabricație, ciclul de viață este cuprins între comanda produselor (de către client) și livrarea produsului (către client).
  - Scopul optimizării este definit unilateral/în mod restrâns, referindu-se doar la cea mai bună soluție a problemei de optimizare, conform unui criteriu/set de criterii predefinit.  
Optimizarea convențională nu este suficient adaptată cerințelor specifice proceselor de fabricație, deoarece *i*) deși un proces trebuie optimizat în integralitatea sa, adesea acest lucru nu este fezabil de la bun început, decizii la niveluri succesive trebuind luate pe parcursul procesului, *ii*) sarcinile îndeplinite pe parcursul unui proces de fabricație au naturi diferite, ca și exigențe diferite, *iii*) variabilele-efect care ar trebui utilizate pentru a descrie îndeplinirea unei anumite sarcini de fabricație, nu sunt precizate cu exactitate, *iv*) relațiile cauzale fie dintre variabilele descriptorie, fie dintre un set de variabile descriptorie și o variabilă-efect, nu sunt apriori cunoscute.
  - Existența unui număr adesea mare de sarcini de fabricație ce trebuiesc îndeplinite pentru obținerea unui produs conduce la un număr foarte mare de variabile care trebuie monitorizate, dimensionalitatea problemei de optimizare fiind, astfel, prea mare pentru resursele computaționale disponibile în mod curent.
2. Neajunsurile evidențiate mai sus pot fi înlăturate prin reconsiderarea conceptului de optimizare a procesului de fabricație și elaborarea suportului metodologic necesar pentru implementarea optimizării holistice în practică.

**Optimizarea holistică a procesului de fabricație**

---

3. Pornind de la tehnicile clasice aferente optimizării (optimizarea multi-etapă, analiza predictivă, optimizarea combinatorică), din care optimizarea holistică preia elemente specifice, a fost dezvoltat conceptul de optimizare holistică, în legătură directă cu cerințele de optimizare a proceselor de fabricație. Au fost identificate trăsăturile-cheie care descriu optimizarea holistică, prin referire la optimizarea convențională.
4. A fost dezvoltată o metodă originală pentru optimizarea procesului de fabricație. Cele mai importante acțiuni, pe baza cărora se face evaluarea activității curente sunt: *i*) identificare structurală; *ii*) identificare cauzală; *iii*) evaluare comparativă.
5. Metoda de identificare structurală a procesului de fabricație permite structurarea principalelor activități care compun un proces de fabricație, la toate nivelurile sale (contractare, planificarea producției, proiectarea produselor, planificarea proceselor și prelucrarea produselor), prin *i*) elaborarea arborelui de activități specifice, evidențiind relațiile între etapele procesului de fabricație și circuitul informațional aferent, *ii*) identificarea variantele de desfășurare a procesului de fabricație de la nivelul fiecărei activități de fabricație, *iii*) selectarea celor mai bune variante în funcție de criterii diferite de optimizare (cum ar fi, spre exemplu costul, timpul de prelucrare consumul de energie, alt consum critic, sau combinații ale acestora). Prin aplicarea metodei de identificare structurală, integrată cu metoda de optimizare holistică, se poate reduce semnificativ numărul de activități potențiale care trebuie evaluate.
6. Metoda de indentificare cauzală a procesului de fabricație permite furnizarea unor multiple seturi de variabile cu potențial de aplicare în modelarea procesului de fabricație, pentru descrierea aceleiași variabile-efect, dintre care utilizatorul poate alege cea mai potrivită soluție pentru rezolvarea unei probleme de evaluare comparativă. Astfel, este posibilă selectarea variabilelor, celor mai influente, ușor de măsurat și cât mai puține posibil, astfel încât modelul rezultat să aibă cea mai mică complexitate, în conformitate cu precizia de estimare urmărită. Modul de reprezentare sub formă arborescentă a multiplelor legături cauzale este intuitiv și permite o orientare ușoară a utilizatorului cu privire la performanțele potențiale de modelare ale diferitelor seturi de variabile-cauză. Utilizarea metodei de identificare cauzală propusă permite o reducere semnificativă a dimensionalității problemei abordate, ceea ce are un impact favorabil asupra elaborării ulterioare a modelului necesar pentru realizarea evaluării comparative.
7. Metoda de evaluare comparativă a procesului de fabricație propune o abordare inovativă în analiza soluțiilor potențial optimale, bazată pe ierarhizarea pentru două sau mai multe alternative de proces, după un anumit criteriu (costul, timpul de prelucrare, energia consumată). Această ierarhizare facilitează selectarea variantei optime de continuare a unui proces de fabricație, la un anumit nivel de decizie, prin înlocuirea comparației directe a alternativelor potențiale cu comparații succesive între fiecare dintre acestea și cazurile din baza de date, pe baza variabilelor cu valori cunoscute.
8. Metoda de optimizare holistică a procesului de fabricație a fost validată prin intermediul unor experimente numerice, derulate sub formă de studii de caz: *i*) exemplificarea aplicării metodei de de identificare structurală și integrarea acesteia în cazul unui proces de optimizare holistică, în cazul fabricării unui rulment, *ii*) identificare cauzală si evaluare comparativă pentru costul unei operații de strunjire (cu ajutorul unei baze de date generată artificial), *iii*) identificare cauzală si evaluare comparativă pentru timpul de prelucrare a unui inel de rulment (cu ajutorul unei baze de date colectate din mediul industrial) și *iv*) identificare cauzală și evaluare comparativă pentru costul de fabricație a unui rulment (cu ajutorul unei baze de date colectate din mediul industrial).
9. Exemplificarea aplicării metodei de identificare structurală, integrată în cadrul unui proces de optimizare holistică, în cazul fabricării unui rulment, a permis evaluarea și selectarea succesivă a activităților optimale de la diferitele niveluri ale procesului de fabricație, obținându-se astfel traseul de fabricație optimal pentru preluarea unei comenzi vizând fabricația de rulmenți.

---

**Concluzii finale și contribuții originale**

---

10. Cel de-al doilea studiu de caz, validează metoda de identificare cauzală aplicată integrat cu metoda de evaluare comparativă. Astfel, prin identificare cauzală, numărul de variabile-cauză necesare pentru evaluarea costului operației de strunjire se poate reduce substanțial: în locul celor unsprezece variabile utilizate pentru generarea bazei de date, s-a identificat un set maximal format din șapte variabile-cauză (lungimea, diametrul, precizia, materialul, rigiditatea, viteza și forța de așchiere); au fost identificate chiar și seturi de patru variabile-cauză care modelează suficient de bine costul (spre exemplu, lungimea, diametrul, precizia și materialul). De asemenea, s-a dovedit că metoda funcționează satisfăcător chiar și în cazul unei baze de date cu număr substanțial mai redus de cazuri. Metoda de evaluare comparativă funcționează foarte eficient, rezultatele furnizate stabilizându-se după un număr redus de iterații (4 ... 8). Mai mult, prin analiza acestor rezultate se pot evidenția situațiile în care variabilele-cauză alese pentru evaluarea comparativă nu au fost corect selectate.
11. Cel de-al treilea studiu de caz, validează încă o dată metodele propuse; prin identificare cauzală, numărul de variabile-cauză necesare pentru evaluarea timpului de prelucrare a unui inel de rulment se reduce substanțial: în locul celor zece variabile s-a identificat un set maximal format din șase variabile-cauză (diametrul interior al inelului, lățimea inelului, viteza și forța de așchiere, volumul de așchii îndepărtate și indicele de complexitate); au fost identificate chiar și seturi de patru variabile-cauză care modelează suficient de bine timpul de prelucrare (spre exemplu, diametrul interior al inelului, lățimea inelului, viteza de așchiere și volumul de așchii îndepărtate). Metoda de evaluare comparativă funcționează foarte bine, rezultatele sunt veridice, după un număr redus de iterații ale algoritmului (3).
12. În cel de-al patrulea studiu, au fost obținute, de asemenea rezultate veridice, care validează metodele propuse, numărul de variabile-cauză necesare pentru evaluarea costului de fabricație în cazul în care trebuie luată o decizie pentru acceptarea unei comenzi de fabricare a unui rulment se reduce substanțial: în locul celor zece variabile s-a identificat un set maximal format din șase variabile-cauză (diametrul interior al rulmentului, lățimea și masa rulmentului, capacitatea dinamică și statică); au fost identificate chiar și seturi de trei variabile-cauză care modelează costul de fabricație cu rezultate rezonabile (spre exemplu, masa rulmentului, capacitatea dinamică și turația limită). Evaluare comparativă a costului furnizează rezultate plauzibile, după un număr foarte redus de iterații (2).

**Perspective viitoare de cercetare**

Pornind de la rezultatele cercetărilor prezentate în cadrul tezei, se pot contura câteva direcții viitoare de valorificare a acestora și de aprofundare a cercetărilor:

1. Analiza posibilităților de aplicare a metodei de optimizare holistică în toate etapele procesului de fabricație.
2. Validarea fezabilității metodei în cazul aplicării pentru alte procedee de fabricație decât așchieria (deformare plastică, sudare, injectare a maselor plastice etc.).
3. Dezvoltarea, pe baza metodelor de identificare structurală, identificare cauzală și evaluare comparativă, a unui produs soft integrat de tip "Decision Support System".

**LISTA DE LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE****A. Lucrări științifice publicate pe parcursul stagiului doctoral****Volume ale conferințelor indexate ISI:**

1. **C. Afteni**, G. Frumușanu & A. Epureanu, **“Instance-based comparative assessment with application in manufacturing”**, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 400, art. no. 042001, pp. 0-8, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/400/4/042001.
2. G. Frumușanu, **C. Afteni**, N. Badea, & A. Epureanu, **„Energy-efficiency based classification of the manufacturing workstation”**, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol 227, art. no. 012047, pp. 0-9, 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/227/1/012047.

**Reviste indexate BDI:**

1. **C. Afteni**, G. Frumușanu & A. Epureanu, **„Method for Holistic Optimization of the Manufacturing Process”**, International Journal of Modeling and Optimization, vol. 9, art. no. 5, pp. 139-144, 2019. DOI: 10.7763/IJMO.2019.V9.721.
2. **C. Afteni** & G. Frumușanu, **„Comparative assessment by neural networks modeling”**, Annals of University „Dunarea de Jos” of Galati, Fascicle V, Technologies in machine building, pp. 35-40, 2018, ([http://www.cmrs.ugal.ro/TMB/2018/L05\\_Anale2018-Afteni\\_1.pdf](http://www.cmrs.ugal.ro/TMB/2018/L05_Anale2018-Afteni_1.pdf)).
3. **C. Afteni** & G. Frumușanu, **„A Review on Optimization of Manufacturing Process Performance”**, International Journal of Modeling and Optimization, vol. 7, art. no. 3, pp. 139-144, 2017. DOI: 10.7763/IJMO.2017.V7.573.
4. G. Frumușanu, N. Badea, **C. Afteni** & A. Epureanu, **„Method for energy-efficient planning of the industrial processes”**, MATEC Web Conf., vol. 112, art. no. 09003, pp. 1-8, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201711209003.
5. M. Afteni, I. Terecoasa, **C. Afteni** & V. Păunoiu, **“Study on hard turning process versus grinding in bearing components process flow”**, International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies (NEWTECH 2017), pp. 95-111, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-56430-2\_8.
6. M. Afteni, I. Terecoasa, V. Păunoiu, G. Frumușanu & **C. Afteni**, **„Study on lead time improvement for production of bearing components”**, Annals of University „Dunarea de Jos” of Galati, Fascicle V, Technologies in machine building, pp. 41-46, 2016, ([http://www.cmrs.ugal.ro/TMB/2016/L\\_06\\_MA.pdf](http://www.cmrs.ugal.ro/TMB/2016/L_06_MA.pdf)).

---

**B. Lucrări prezentate în cadrul unor manifestări științifice**

1. **C. Afteni & G. Frumușanu**, „*Estimation of roller bearings manufacturing cost by causal identification and comparative assessment – Case study performed on industrial data*”, Scientific Conference of Doctoral Schools of “Dunarea de Jos” University (CSSD-UDJG 2019), Galați, ediția a-VII-a, 13.06.2019 - 14.06.2019. (prezentare orală).
2. **C. Afteni & G. Frumușanu**, „*New trends in Manufacturing Process Optimization – Integrated Process Planning and Scheduling*”, Scientific Conference of Doctoral Schools of “Dunarea de Jos” University (CSSD-UDJG 2017), Galați, ediția a-V-a, 08.06.2017 - 09.06.2017. (prezentare poster).

**C. Lucrare elaborată în vederea publicării într-un jurnal ISI**

1. G. Frumușanu, **C. Afteni** & A. Epureanu, „*Causal identification of the manufacturing system*”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019 – in submission paper MANU-19-1677.



**Bibliografie (selectivă)**

- [1] C. Afteni și G. Frumușanu, „A Review on Optimization of Manufacturing Process Performance”, *Int. J. Model. Optim.*, vol. 7, nr. 3, pp. 139-144, 2017.
- [2] Lucian Tudose; Dumitru Pop, „Proiectare optimală cu Algoritmi Genetici”, în *Editura Mediamira*, Cluj-Napoca, 2002, pp. 5-336.
- [3] P. C. Priarone, „Quality-conscious optimization of energy consumption in a grinding process applying sustainability indicators”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 86, nr. 5-8, pp. 2107-2117, 2016.
- [4] L. Feng, L. Mears, C. Beaufort, și J. Schulte, „Energy, economy, and environment analysis and optimization on manufacturing plant energy supply system”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 117, pp. 454-465, 2016.
- [5] W. W. and K. Hamacher, „A Stochastic tunneling approach for global minimization”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, pp. 3003-3007, 1999.
- [6] L. Miguel și R. Nikolaos, „Derivative-free optimization: a review of algorithms and comparison of software implementations”, *J. Glob. Optim.*, vol. 56, pp. 1247-1293, 2013.
- [7] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto\\_efficiency](https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_efficiency)”.
- [8] L. N. Vin, „Fundamente ale optimizării multi-obiectiv a sistemelor complexe de calcul”, *Bul. AGIR*, nr. 4, pp. 77-84, 2016.
- [9] T. E. and S. V. Utyuzhnikov, „Directed Search Domain: A Method for Even Generation of Pareto Frontier in Multiobjective Optimization”, *J. Eng. Optim.*, vol. 43, pp. 1-18, 2011.
- [10] T. Jagtap și H. Mandave, „Experimental Investigation and Optimization of Cutting Parameters on Surface Roughness and Material Removal Rate in Turning of Nylon 6 Polymer”, vol. 4, nr. 3, pp. 236-246, 2016.
- [11] S. A. Mansouri et al., „Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 248, nr. 3, pp. 772-788, 2016.
- [12] K. P. B. et al., „Bilevel optimization and machine learning”, *Lect. Notes Comput. Sci.*, vol. 5050, pp. 25-47, 2008.
- [13] H. I. Calvete, C. Galé, și J. A. Iranzo, „An efficient evolutionary algorithm for the ring star problem”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 231, nr. 1, pp. 22-33, 2013.
- [14] M. T. S. Ahmed și N. Sahinidis, „A finite branch-and-bound algorithm for two-stage stochastic”, *Math. Program.*, vol. 100, pp. 355-377, 2004.
- [15] J. F. Benders, „Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems”, *Numer. Math.*, vol. 4, pp. 238–252, 1962.
- [16] J. Yan et al., „A multi-level optimization approach for energy-efficient flexible flow shop scheduling”, *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1543-1552, 2016.
- [17] F. Kübler et al., „Resource efficiency optimization of manufacturing processes using evolutionary computation: A turning case”, *Procedia CIRP*, vol. 29, pp. 822-827, 2015.
- [18] D. Tang și M. Dai, „Energy-efficient approach to minimizing the energy consumption in an extended job-shop scheduling problem”, *Chinese J. Mech. Eng.*, vol. 28, nr. 5, pp. 1048-1055, 2015.
- [19] Y. Liu et al., „A multi-objective genetic algorithm for optimisation of energy consumption and shop floor production performance”, vol. 179, pp. 259-272, 2016.
- [20] X. Li et al., „Total Energy Consumption Optimization via Genetic Algorithm in Flexible Manufacturing Systems”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 104, pp. 188-200, 2016.
- [21] D. Sreeramulu et al., „Integration of Process Planning and Scheduling of a Manufacturing Systems using Petri nets and Genetic Algorithm”, *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, nr. 41, 2016.
- [22] L. Zhang et al., „Production scheduling oriented to energy consumption optimization for process industry based on self-adaptive DE algorithm”, *Int. J. Control Autom.*, vol. 8, nr. 2, pp. 31-42, 2015.

- [23] C. Natarajan et al., „Investigation of cutting parameters of surface roughness for a non-ferrous material using artificial neural network in CNC turning”, *J. Mech. Eng. Res.*, vol. 3, nr. 1, pp. 1-14, 2011.
- [24] R. Pugazhenthii și M. Anthony Xavier, „A genetic algorithm applied heuristic to minimize the Makespan in a flow shop”, *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 1735-1744, 2014.
- [25] S. Wang, X. Lu, X. X. Li, și W. D. Li, „A systematic approach of process planning and scheduling optimization for sustainable machining”, *J. Clean. Prod.*, vol. 87, nr. C, pp. 914-929, 2015.
- [26] N. Yusup, A. M. Zain, și S. Z. M. Hashim, „Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007-2011)”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, nr. 10, pp. 9909-9927, 2012.
- [27] G. Zhang, M. Liu, J. Li, W. Ming, X. Shao, și Y. Huang, „Multi-objective optimization for surface grinding process using a hybrid particle swarm optimization algorithm”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 71, nr. 9-12, pp. 1861-1872, 2014.
- [28] K. T. Fang și B. M. T. Lin, „Parallel-machine scheduling to minimize tardiness penalty and power cost”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 64, nr. 1, pp. 224-234, 2013.
- [29] M. Petrović, N. Vuković, M. Mitić, și Z. Miljković, „Integration of process planning and scheduling using chaotic particle swarm optimization algorithm”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 64, pp. 569-588, 2016.
- [30] P. S. Srinivas, V. R. Raju, și C. S. P. Rao, „Optimization of Process Planning and Scheduling using ACO and PSO Algorithms”, vol. 2, nr. 10, pp. 343-354, 2012.
- [31] M. Chandrasekaran, M. Muralidhar, C. M. Krishna, și U. S. Dixit, „Application of soft computing techniques in machining performance prediction and optimization: A literature review”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 46, nr. 5-8, pp. 445-464, 2010.
- [32] Z. H. Jia, C. Wang, și J. Y. T. Leung, „An ACO algorithm for makespan minimization in parallel batch machines with non-identical job sizes and incompatible job families”, *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 38, pp. 395-404, 2016.
- [33] C. W. Leung, T. N. Wong, K. L. Mak, și R. Y. K. Fung, „Integrated process planning and scheduling by an agent-based ant colony optimization”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 59, nr. 1, pp. 166-180, 2010.
- [34] V. B. Pansare, M. V Kavade, și S. D. Sangali, „Optimization of cutting parameters in multipass turning operation using ant colony algorithm”, nr. 4, pp. 955-960, 2012.
- [35] A. Seker, S. Erol, și R. Botsali, „A neuro-fuzzy model for a new hybrid integrated Process Planning and Scheduling system”, *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, nr. 13, pp. 5341-5351, 2013.
- [36] A. Iqbal, H. C. Zhang, L. L. Kong, și G. Hussain, „A rule-based system for trade-off among energy consumption, tool life, and productivity in machining process”, *J. Intell. Manuf.*, vol. 26, nr. 6, pp. 1217-1232, 2015.
- [37] G.-S. Liu, Y. Zhou, și H.-D. Yang, „Minimizing energy consumption and tardiness penalty for fuzzy flow shop scheduling with state-dependent setup time”, *J. Clean. Prod.*, vol. 147, pp. 470-484, mar. 2017.
- [38] A. S. William J. Cook, William H. Cunningham, William R. Pulleyblank, „Combinatorial Optimization”, *Comput. Handbook, Third Ed. Comput. Sci. Softw. Eng.*, pp. 1-346, 2014.
- [39] A. Lihu, „Diferendul - Un nou concept social în Inteligență Colectivă și Calculul Evoluționist”, Politehnica din Timișoara, 2012.
- [40] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial\\_neural\\_network](https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_neural_network)”.
- [41] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Particle\\_swarm\\_optimization](https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_swarm_optimization)”.
- [42] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Ant\\_colony\\_optimization\\_algorithms](https://en.wikipedia.org/wiki/Ant_colony_optimization_algorithms)”.
- [43] „[https://ro.wikipedia.org/wiki/Logica\\_fuzzy](https://ro.wikipedia.org/wiki/Logica_fuzzy)”.
- [44] „<https://ro.wikipedia.org/wiki/Combinatorica>”.
- [45] G. Frumușanu, N. Badea, C. Afteni, și A. Epureanu, „Method for energy-efficient planning of the industrial processes”, *MATEC Web Conf.*, vol. 09003, pp. 1-8, 2017.
- [46] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Scheduling\\_\(production\\_processes\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Scheduling_(production_processes))”.

**Optimizarea holistică a procesului de fabricație**

- [47] A. M. A. et al. Alwaise, „Optimization of Machine Tools by Using the Maximum Productivity Rate 1”, vol. 5, nr. 11, pp. 543-548, 2011.
- [48] H. Ganesan, G. Mohankumar, K. Ganesan, și K. R. Kumar, „Optimization of Machining Parameters in Turning Process Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization”, *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 3, nr. 2, pp. 1091-1102, 2011.
- [49] D. Petkovic și M. Radovanovic, „Using Genetic Algorithms for Optimization of Turning Machining Process”, *J. Eng. Stud. ...*, vol. 19, nr. 1, pp. 47-55, 2013.
- [50] A. Costa, G. Celano, și S. Fichera, „Optimization of multi-pass turning economies through a hybrid particle swarm optimization technique”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 53, nr. 5-8, pp. 421-433, 2011.
- [51] S. Neşeli, et al., „Determining the optimum process parameter for grinding operations using robust process”, *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 26, nr. 11, pp. 3587-3595, 2012.
- [52] T. H. Bhuiyan și I. Ahmed, „Optimization of cutting parameters in turning process”, *J. Prod. Eng.*, vol. 16, nr. 2, pp. 11-19, 2013.
- [53] R. Rentsch, C. Heinzl, și E. Brinksmeier, „Artificial Intelligence for an Energy and Resource Efficient Manufacturing Chain Design and Operation”, *Procedia CIRP*, vol. 33, pp. 139-144, 2015.
- [54] C. Camposeco-Negrete, et al., „Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1018 steel at constant material removal rate using robust design”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, nr. 5-8, pp. 1341-1347, 2016.
- [55] J. Yan și L. Li, „Multi-objective optimization of milling parameters-the trade-offs between energy, production rate and cutting quality”, *J. Clean. Prod.*, vol. 52, pp. 462-471, 2013.
- [56] W. Lin et al., „Multi-objective optimization of machining parameters in multi-pass turning operations for low-carbon manufacturing”, *J. Eng. Manuf.*, pp. 1-12, 2016.
- [57] N. Kundakçı și O. Kulak, „Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 96, pp. 31-51, 2016.
- [58] Z. Uruk, H. Gultekin, și M. S. Akturk, „Two-machine flowshop scheduling with flexible operations and controllable processing times”, *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, nr. 2, pp. 639-653, 2013.
- [59] M. Dai, D. Tang, Y. Xu, și W. Li, „Energy-aware integrated process planning and scheduling for job shops”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 229, nr. January, pp. 0954405414553069-, 2014.
- [60] Q. Lihong și L. Shengping, „An improved genetic algorithm for integrated process planning and scheduling”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 58, nr. 5-8, pp. 727-740, 2012.
- [61] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Predictive\\_analytics#cite\\_note-17](https://en.wikipedia.org/wiki/Predictive_analytics#cite_note-17)”.
- [62] „<http://www.asecib.ase.ro/virginia/cursCO3/capitolul2.pdf>”.
- [63] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Decision\\_support\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Decision_support_system)”.
- [64] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Instance-based\\_learning](https://en.wikipedia.org/wiki/Instance-based_learning)”.
- [65] M. Bagge, *Process planning for precision manufacturing: An approach based on methodological studies*. 2014.
- [66] P. Denno, C. Dickerson, și J. A. Harding, „Dynamic production system identification for smart manufacturing systems”, *J. Manuf. Syst.*, nr. March, pp. 1-11, 2018.
- [67] R. Corne, C. Nath, M. El Mansori, și T. Kurfess, „Study of spindle power data with neural network for predicting real-time tool wear/breakage during inconel drilling”, *J. Manuf. Syst.*, vol. 43, pp. 287-295, 2017.
- [68] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Feature\\_selection](https://en.wikipedia.org/wiki/Feature_selection)”.
- [69] „<https://ro.scribd.com/document/372584754/Metoda-Diferentelor-Finite-Generalitati-Analiza1D-bare>”.
- [70] „<http://mathworld.wolfram.com/Sign.html>”.
- [71] „[https://en.wikipedia.org/wiki/Sign\\_function](https://en.wikipedia.org/wiki/Sign_function)”.