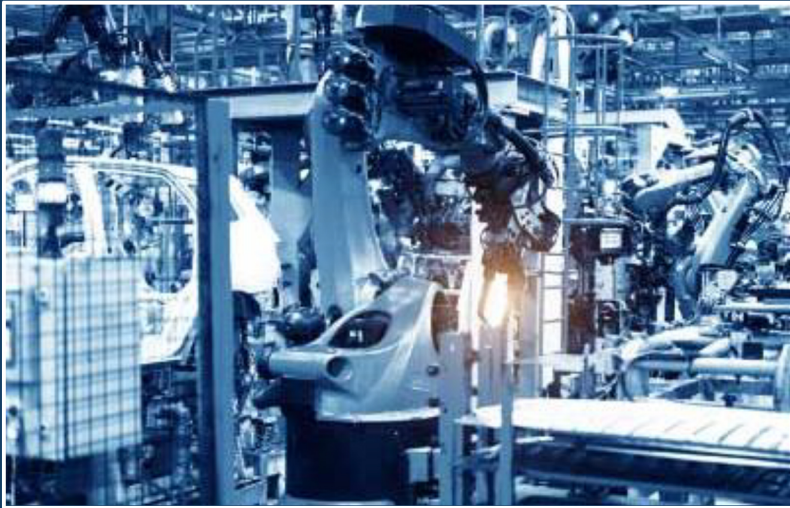


**George Drăghici**

# **SISTEME DE FABRICAȚIE INTELIGENTE ÎN INDUSTRIA 4.0**



Editura **POLITEHNICA**

Colecția "TEHNOLOGIE"

---

**SISTEME DE FABRICAȚIE INTELIGENTE  
ÎN INDUSTRIA 4.0**

Lucrarea reprezintă o contribuție relevantă în domeniul Industriei 4.0, adresându-se în special studenților de la ciclurile de master și doctorat în ingineria industrială. Autorul analizează evoluția sistemelor de fabricație, de la cele reconfigurabile la cele inteligente, oferind un cadru metodologic și aplicativ pentru dezvoltarea și integrarea acestora. Scopul este de a sprijini implementarea fabricației inteligente și personalizării individuale.

Cartea este remarcabilă prin integrarea metodologiei DRM (Design Research Methodology) și prin abordarea paradigmei Industriei 4.0 în contextul producției reconfigurabile și inteligente. Prezentarea este coerentă, susținută de referințe extinse la literatura internațională de specialitate. Graficele și tabelele oferă o înțelegere clară a relațiilor dintre conceptele abordate. Textul este bine structurat și include studii de caz detaliate, care ilustrează implementarea practică a conceptelor. Metodologia DRM este bine aplicată.

**Referent științific:** Prof. Dr. Ing. Titus SLAVICI  
Universitatea Politehnica Timișoara

Această carte este concepută ca o resursă esențială pentru profesioniștii din domeniul industrial, cercetătorii, studenții și toți cei interesați să înțeleagă complexitatea și potențialul sistemelor de fabricație inteligente. În paginile ei, vom explora cum convergența tehnologiilor avansate – precum Internet of Things (IoT), inteligența artificială (AI), robotică, simulare și realitate augmentată – redefinește nu doar fabricarea produselor, ci și lanțurile de aprovizionare, procesele decizionale și experiența utilizatorului final.

**Referent științific:** Acad. Dorel BANABIC  
Președintele Secției de Științe Tehnice a Academiei Române

GEORGE DRĂGHICI

**SISTEME DE FABRICAȚIE INTELIGENTE  
ÎN INDUSTRIA 4.0**

Colecția "TEHNOLOGIE"

EDITURA POLITEHNICA  
TIMIȘOARA – 2025



**Copyright © Editura Politehnica, 2025**

Nicio parte din această lucrare nu poate fi reprodusă, stocată sau transmisă prin indiferent ce formă, fără acordul prealabil scris al Editurii Politehnica.

**EDITURA POLITEHNICA**

Bd. Republicii nr. 9

300159 Timișoara, România

**Tel.** 0256.403.822

**E-mail:** editura@upt.ro

**Redactor:** Claudia MIHALI

**Bun de imprimat:** 09.01.2025

**ISBN** 978-606-35-0631-4

## Cuvânt înainte

Tehnologiile au evoluat disruptiv de la apariția lor până în prezent, putând fi definite patru mari revoluții industriale (denumite în literatură Industry 1.0 până la Industry 4.0). Revoluțiile industriale reprezintă transformarea radicală a structurii unei economii prin: schimbarea tipului de energie folosită, utilizarea unor noi sisteme de mașini și de forme de organizare a producției.

În era transformării digitale accelerate, Industry 4.0 reprezintă mai mult decât o simplă evoluție tehnologică – este o revoluție a modului în care producem, gestionăm și interacționăm cu sistemele de fabricație. Automatizarea avansată, integrarea cibernetică, analiza datelor în timp real și inteligența artificială au transformat fundamental industria, iar "Sisteme de fabricație inteligente în Industry 4.0" își propune să ofere o incursiune cuprinzătoare în această nouă paradigmă.

Această carte este concepută ca o resursă esențială pentru profesioniștii din domeniul industrial, cercetătorii, studenții și toți cei interesați să înțeleagă complexitatea și potențialul sistemelor de fabricație inteligente. În paginile ei, vom explora cum convergența tehnologiilor avansate – precum Internet of Things (IoT), inteligența artificială (AI), robotică, simulare și realitate augmentată – redefinește nu doar fabricarea produselor, ci și lanțurile de aprovizionare, procesele decizionale și experiența utilizatorului final. Sistemele de fabricație inteligente sunt nucleul Industry 4.0. Ele reprezintă o simbioză între mașini, oameni și date, capabile să răspundă rapid la schimbările din piață, să optimizeze resursele și să creeze produse personalizate. Această carte explorează nu doar principiile fundamentale, ci și aplicațiile practice, provocările și tendințele viitoare din acest domeniu. Exemplele concrete și studiile de caz oferite demonstrează cum implementarea acestor sisteme poate duce la o creștere a eficienței, sustenabilității și competitivității. Tranziția spre Industry 4.0 nu este lipsită de provocări: securitatea cibernetică, integrarea tehnologică, schimbările culturale și deficitul de competențe sunt doar câteva dintre barierele pe care organizațiile trebuie să le depășească. Totuși, beneficiile pe termen lung – de la

reducerea costurilor până la creșterea capacității de inovare – justifică investițiile în această direcție.

Această carte este un manifest pentru adoptarea gândirii inovatoare și a soluțiilor inteligente în contextul transformării industriale globale. Consider că publicarea cărții de față în Editura Politehnica din Timișoara este binevenită și va oferi instrumentele necesare pentru a naviga cu succes în complexitatea epocii digitale. Sunt convins că această carte va contribui la promovarea sistemelor de fabricație inteligente în universitățile din România și în industria românească. De aceea recomand cu căldură cartea tuturor colegilor și studenților din facultățile de profil din țară. Consider ca lucrarea este totodată utilă atât cercetătorilor cât și inginerilor tehnologi din fabricile din România.

Acad. Dorel Banabic

Președintele Secției de Științe Tehnice a Academiei Române

# CUPRINS

<b>NOTAȚII, ABREVIERI, ACRONIME.....</b>	<b>11</b>
<b>1. INTRODUCERE.....</b>	<b>15</b>
1.1. Considerații generale .....	15
1.2. Structura lucrării .....	17
<b>2. FABRICAȚIA ÎN CEA DE-A PATRA REVOLUȚIE INDUSTRIALĂ</b>	<b>21</b>
.....	<b>21</b>
2.1. Obiectivul capitolului .....	21
2.2. Cea de-a patra revoluție industrială .....	21
2.2.1. Evoluția tehnicii.....	21
2.2.2. Ce este Industria 4.0? .....	23
2.2.3. Tehnologiile Industriei 4.0 .....	26
2.2.4. Componentele Industriei 4.0 și principii de concepție .....	29
2.2.5. Paradigmele Industriei 4.0.....	31
2.3. Paradigmele producției .....	34
2.4. Cadrul Industriei 4.0 .....	39
2.4.1. Produsele inteligente.....	39
2.4.2. Fabricația inteligentă .....	41
2.4.3. Sistemele de fabricație inteligente .....	44
2.4.4. Fabrica inteligentă .....	48
2.4.5. Sistemele de fabricație reconfigurabile .....	52
2.4.6. Modele de arhitectură de referință pentru Industria 4.0 .....	58
2.5. Implementarea Industriei 4.0 .....	60
2.5.1. Modele de implementare în companiile producătoare.....	61
2.5.2. Provocări, oportunități și riscuri ale implementării Industriei 4.0	63
2.5.3. Limitele stadiului actual de implementare a Industriei 4.0.....	67

2.6. Sinteza capitolului .....	68
<b>3. DEZVOLTAREA SISTEMELOR DE FABRICAȚIE.....</b>	<b>69</b>
3.1. Obiectivul capitolului .....	69
3.2. Dezvoltarea sistemelor de fabricație inteligente.....	69
3.2.1. Cadrul conceptual al sistemelor de fabricație inteligente pentru Industria 4.0.....	69
3.2.2. Fabricația inteligentă bazată pe date.....	78
3.2.3. Metodologia generică pentru concepția, analiza și evaluarea sistemelor de fabricație inteligente.....	92
3.2.4. Concepția unui sistem de fabricație inteligent de tip flux .....	111
3.3. Dezvoltarea sistemelor de fabricație reconfigurabile .....	119
3.3.1. Reconfigurarea sistemului de fabricație .....	119
3.3.2. Sistem de fabricație reconfigurabil pentru individualizarea în masă.....	126
3.3.3. Sistem de fabricație inteligent auto-reconfigurabil .....	128
3.4. Sinteza capitolului.....	139
<b>4. INTEGRAREA UNUI SISTEM DE FABRICAȚIE INTELIGENT ...</b>	<b>141</b>
4.1. Obiectivul capitolului .....	141
4.2. Un cadru general și subsisteme pentru integrarea unui sistem de fabricație inteligent.....	141
4.2.1. Cadrul general.....	142
4.2.2. Subsistemul fizic.....	146
4.2.3. Subsistemul de integrare a informațiilor.....	149
4.2.4. Subsistemul de integrare în rețea.....	150
4.2.5. Subsistemul de integrare a datelor.....	152
4.2.6. Subsistemul de integrare a vizualizării .....	153
4.3. Calea de implementare pentru SMIS .....	155
4.4. Sinteza capitolului .....	158
<b>5. IMPLEMENTAREA UNUI SISTEM INTEGRAT DE FABRICAȚIE INTELIGENT .....</b>	<b>159</b>
5.1. Obiectivul capitolului .....	159

---

5.2. Arhitectura generală de referință a sistemului integrat de fabricație inteligent.....	159
5.3. Implementarea SMIS .....	161
5.4. Studiu de caz al implementării SMIS în industria de autovehicule... 162	
5.4.1. Pasul 1: C1-L (Fabrica automatizată bazată pe resurse).....	162
5.4.2. Pasul 2: C2-L (Fabrica de interconectare bazată pe rețea) .....	167
5.4.3. Pasul 3: C3-L (Fabrica de partajare a datelor pe platformă) .....	167
5.4.4. Pasul 4: C4-L (Fabrica de integrare a sistemului informațional) 168	
5.4.5. Pasul 5: CP (Fabrica de modele noi pentru ciclul de viață al produsului).....	169
5.4.6. Pasul 6: LP (Fabrica de modele noi pentru personalizare individuală).....	171
5.4.7. Evaluarea și analiza SMIS .....	172
5.5. Studiu de caz al implementării unui sistem de fabricație inteligent pentru individualizare în masă .....	180
5.5.1. Modelul S-MMP.....	180
5.5.2. Caracteristica de bază a S-MMP .....	184
5.5.3. Tehnologia și metoda S-MMP.....	185
5.5.4. Planul și scenariile de aplicare a S-MMP.....	186
5.5.5. Calea de implementare a S-MMP.....	190
5.6. Sinteza capitolului .....	191
<b>6. EVOLUȚIA ȘI VIITORUL SISTEMELOR DE FABRICAȚIE ÎN CONTEXTUL INDUSTRIEI 5.0.....</b>	<b>193</b>
6.1. Obiectivul capitolului .....	193
6.2. Industria 5.0 .....	193
6.3. Evoluția și viitorul sistemelor de fabricație .....	197
<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>205</b>



## Notății, abrevieri, acronime

ACM	<i>Adaptive Cognitive Manufacturing</i> (Fabricație cognitivă adaptivă)
ACMS	<i>Adaptive Cognitive Manufacturing Systems</i> (Sisteme de fabricație cognitivă adaptivă)
ADT	<i>Axiomatic Design Theory</i> (Teoria de concepție axiomatică)
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Procesul de ierarhie analitică)
AI	<i>Artificial Intelligence</i> (Inteligență artificială)
AIoT	<i>Artificial Intelligence of Things</i> (Inteligența artificială a lucrurilor)
ALM	<i>Application Life Management</i> (Managementul vieții aplicației)
AM	<i>Additive Manufacturing</i> (Fabricație aditivă)
AMS	<i>Agile Manufacturing System</i> (Sisteme de fabricație agilă)
AR	<i>Augmented Reality</i> (Realitate augmentată)
BDA	<i>Big Data &amp; Analytics</i> (Date mari și analitice)
CAs	<i>Customer Attributes</i> (Atributele clientului)
CC	<i>Cloud Computing</i>
CMN	<i>Complex Manufacturing Network</i> (Rețea de fabricație complexă)
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Comandă numerică prin calculator)
CPPS	<i>Cyber-Physical Production System</i> (Sistem de producție ciber-fizic)
CPS	<i>Cyber-Physical System</i> (Sistem ciber-fizic)
CR	<i>Collaborative Robotics</i> (Roboți colaborativi)
CRM	<i>Customer Relationship Management</i> (Managementul relațiilor cu clienții)
DM	<i>Data Mining</i>
DML	<i>Dedicated Manufacturing Lines</i> (Linii de fabricație dedicate)
DMS	<i>Digital Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație digitală)
DPs	<i>Design Parameters</i> (Parametri de concepție)



DRM	<i>Design Research Methodology</i> (Metodologie de cercetare în concepție)
DSs	<i>Design Solutions</i> (Soluții de concepție)
DT	<i>Digital Twin</i> (Geamă digitală)
DT-II	<i>Digital Triad</i> (Triadă digitală)
DTVE	<i>Digital Twin Virtual Entity</i> (Entitate virtuală geamă digitală)
FMS	<i>Flexible Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație flexibilă)
FRs	<i>Functional Requirements</i> (Cerințe funcționale)
FrMS	<i>Fractal Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație fractal)
GA	<i>Genetic Algorithm</i> (Algoritm genetic)
HCPS	<i>Human Cyber-Physical System</i> (Sisteme ciber-fizice umane)
HMI	<i>Human Machine Interface</i> (Interfață om-mașină)
HMS	<i>Holoning Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație holonică)
IM	<i>Intelligent Manufacturing</i> (Fabricație inteligentă)
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i> (Internetul industrial al lucrurilor)
IoDTT	<i>Internet of Digital Triad Things</i> (Internetul triadei digitale a lucrurilor)
IoE	<i>Internet of Everything</i> (Internetul tuturor lucrurilor)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internetul lucrurilor)
IoS	<i>Internet of Services</i> (Internetului serviciilor)
KPIs	<i>Key Performance Indicators</i> (Indicatori cheie de performanță)
LES	<i>Logistics Execution System</i> (Sistem de execuție logistică)
LME	<i>Large Manufacturing Enterprises</i> (Întreprinderi mari de producție)
LMS	<i>Lean Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație „lină”)
MES	<i>Manufacturing Execution System</i> (Sistem de execuție al fabricației)
MIIS	<i>Manufacturing Intelligent Integrated System</i> (Sistem integrat inteligent de fabricație)
ML	<i>Machine Learning</i> (Învățarea automată)
MR	<i>Mixed Reality</i> (Realitatea mixtă)
MS	<i>Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație)

NB IoT	<i>Narrow Band Internet of Things</i> (Internetul lucrurilor în bandă îngustă)
NN	<i>Neural Network</i> (Rețea neuronală)
OAMT	<i>Open-Architecture Machine Tool</i> (Mașină-unealtă cu arhitectură deschisă)
PDM	<i>Product Data Management</i> (Managementul datelor de produs)
PDU	<i>Protocol Data Unit</i> (Unitate de date protocol)
PLC	<i>Controller Logic Programabil</i> (Controler logic programabil)
PLM	<i>Product Life cycle Management</i> (Managementul ciclului de viață al produsului)
PMs	<i>Performance metrics</i> (Metrici de performanță)
PMC	<i>Production Material Control</i> (Control material de producție)
PVs	<i>Process Variables</i> (Variabile de proces)
Q-DAS	<i>Quality-Direct Attached Storage</i> (Stocare atașată direct la calitate)
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> (Implementarea funcției de calitate).
RAMI 4.0	<i>Reference Architecture Model Industry 4.0</i> (Model de arhitectură de referință pentru Industria 4.0)
RDTMS	<i>Reconfigurable Digital Twin based Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație bazat pe geamă digital reconfigurabil)
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> (Identificare prin frecvență radio)
RMS	<i>Reconfigurable Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație reconfigurabil)
RMT	<i>Reconfigurable Machine Tool</i> (Mașină-unealtă reconfigurabilă)
SCM	<i>Supply Chain Management</i> (Managementul lanțului de aprovizionare)
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> (Sistem de monitorizare, control și achiziție de date)
SM	<i>Smart Manufacturing</i> (Fabricație inteligentă),
SMIS	<i>Smart Manufacturing Integrated System</i> (Sistem integrat de fabricație inteligent)

S-MMP	<i>Smart Manufacturing Intelligent System for Mass Personalization</i> (Sistem de fabricație inteligent pentru personalizare individuală în masă)
SMS	<i>Smart Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație inteligent)
SNC	<i>Supply Chain Network collaboration</i> (Colaborarea în rețeaua lanțului de aprovizionare)
SoS	<i>System of Systems</i> (Sistem de sisteme)
SRM	<i>Supplier Relationship Management</i> (Gestionarea relațiilor cu furnizorii)
SSRMS	<i>Smart Self-Reconfigurable Manufacturing System</i> (Sistem de fabricație inteligent auto-reconfigurabil)
VM	<i>Virtual Manufacturing</i> (Fabricație virtuală)
VR	<i>Virtual Reality</i> (Realitate virtuală)

# 1. INTRODUCERE

## 1.1. Considerații generale

În mileniul al treilea, în care ne aflăm, asistăm la schimbări profunde în mediul economic, social și geopolitic. Crizele alternează cu creșterile economice, pandemia Covid-19 a determinat un alt mod de a percepe relațiile de muncă și umane, conflictele regionale au provocat migrația umană și a forței de muncă, toate acestea și altele prefigurând o altă ierarhie mondială.

În acest context, sistemele de producție sunt într-o continuă evoluție, odată cu diversificarea cerințelor clienților și a pieței, trecându-se de la o producție în serie și masă, la personalizare și individualizare în masă, în care rolul clientului în luarea deciziilor a crescut. În prezent, personalizarea inteligentă încorporează date mari pentru a înțelege și mai bine cerințele clienților, pentru a îmbunătăți eficiența designului și productivitatea.

Produsele au devenit din ce în ce mai complexe, înglobând noi funcții și tot mai multă inteligență, de la o arhitectură modulară ajungând a avea o arhitectură deschisă.

În raport cu acestea se înregistrează și o evoluție a sistemelor de fabricație, de la sisteme flexibile, la cele reconfigurabile și inteligente, spre sisteme de fabricație cognitive adaptive.

Noile tehnologii, precum analiza bazată pe seturi mari de date (*Big Data and Analytics*, BDA), roboții autonomi colaborativi (*Autonomous Robots*), internetul industrial al lucrurilor (*Industrial Internet of Things*, IoT), tehnologia cloud (*Cloud Computing*, CC), securitatea cibernetică (*Cybersecurity*), metodele de fabricare aditivă (*Additive Manufacturing*, AM), sistemele ciber-fizice (*Cyber-Physical Systems*, CPS), realitatea augmentată (*Augmented Reality*, AR) definesc cea de-a patra revoluție industrială (*Industry 4.0*). La acestea se adaugă inteligența artificială (*Artificial Intelligence*, AI), învățarea automată (*Machine Learning*, ML), internetul tuturor lucrurilor (*Internet of Everything*, IoE) și

inteligența artificială a lucrurilor (*Artificial Intelligence of Things, AIoT*), gemenii digitali (*Digital Twin*), care conduc spre cea de-a cincea revoluție industrială (*Industry 5.0*).

Noul val în evoluția tehnologică a industriei impulsionează tot mai multe companii să răspundă noilor standarde stabilite de o piață aflată într-o continuă schimbare, prin transformarea unităților de producție în „fabrici inteligente”.

Industria 4.0 oferă o flexibilitate sporită, personalizare și individualizare în masă, viteză crescută, calitate îmbunătățită, productivitate sporită, permițând companiilor să facă față diferitelor provocări, cum ar fi produsele din ce în ce mai individualizate, scurtarea timpului de lansare pe piață și calitatea ridicată a produselor.

Principalele așteptări ale industriei, ca urmare a trecerii ei în faza a patra a evoluției (Industria 4.0) sunt (Banabic, 2016):

- mai multă flexibilitate și adaptabilitate;
- transformarea structurilor rigide în structuri de tip rețea;
- integrarea pe verticală a sistemelor de producție flexibile și reconfigurabile;
- modularizarea și autonomia sistemelor de producție;
- utilizarea unor sisteme de producție cu structură fractală;
- optimizarea resurselor prin conectarea echipamentelor în rețea;
- utilizarea inteligenței artificiale în comanda sistemelor de producție, în scopul luării unor decizii rapide și optime;
- dezvoltarea și utilizarea unor noi modele de afaceri;
- utilizarea aplicațiilor „app-store” și „cloud”, ca noi concepte în managementul cunoștințelor etc.

Toate acestea vor conduce la o creștere a eficienței fabricației prin reducerea duratei procesului tehnologic, reducerea rebuturilor în lanțul de proces, o mai mare adaptabilitate la necesitățile clienților, creșterea calității produselor și, în final, la reducerea costurilor produselor fabricate și a timpilor de așteptare pentru utilizatorul final.

Formarea prin cercetare a specialiștilor de care industria are nevoie în prezent și în viitorul apropiat este o cerință primordială, fiind **obiectivul principal** la care lucrarea de față încearcă să aducă o modestă contribuție,

adresându-se în special studenților la ciclul de master și doctoranzilor în domeniul ingineriei industriale, care vizează evoluția și viitorul sistemelor de fabricație.

## 1.2. Structura lucrării

Întreaga lucrare se bazează pe cercetarea literaturii de specialitate, realizată în principalele baze de date (Google Scholar, Web of Science, Scopus, ScienceDirect, Elsevier, SpringerLink, IEEE), folosind cuvintele cheie: *Industry 4.0*, *Mass customization*, *Mass individualization*, *Smart Manufacturing (SM)*, *Smart Factory*, *Smart Manufacturing Systems (SMS)*, *Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)*.

În demersul adoptat se folosește **Metodologia de cercetare în concepție** (*Design Research Methodology, DRM*) elaborată de Blessing și Chakrabarti (2009) și schematizată în figura 1.1. Metodologia presupune parcurgerea mai multor etape de analiză a elementelor de intrare (*Basic Means*), cu scopul clarificării elementelor cercetării și definirii obiectivelor operaționale, urmată fiind de studiile descriptive și aplicative necesare determinării finale a rezultatelor obținute în raport cu obiectivul principal propus.

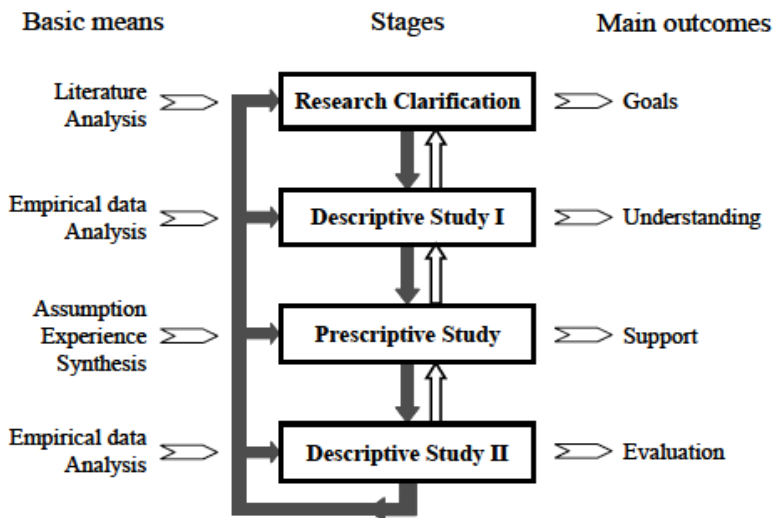


Fig. 1.1. Etapele DRM (Blessing și Chakrabarti, 2009).

**Clarificarea cercetării (RC)** urmărește identificarea obiectivelor realizabile, studierea modelelor de referință și de impact, identificarea unui set preliminar de criterii de succes și criterii de măsurare a succesului raportat la care să se evalueze rezultatele cercetării, identificarea factorilor care contribuie la riscul obținerii succesului, dezvoltarea de sprijin pentru factorii cu cea mai mare influență asupra succesului, trasarea unei direcții de evaluare a efectelor sprijinului în raport cu obiectivele cercetării.

**Studiul descriptiv I (DS-I)** urmărește obținerea unei înțelegeri mai bune a situației existente prin identificarea și clarificarea în detaliu a factorilor care influențează criteriile preliminare, pentru finalizarea modelului de referință, incluzând criteriile de succes și criteriile de măsurare a succesului, sugerarea de factori (posibili factori cheie) care ar putea conduce la o îmbunătățire a situației existente, oferirea unei baze pentru dezvoltarea eficientă a sprijinului, care se adresează acelor factori cu cea mai puternică influență asupra succesului și care pot fi evaluați în raport cu criteriile, furnizarea de detalii care pot fi utilizate pentru a evalua efectele dezvoltării de sprijin în etapa DS-II.

**Studiul prescriptiv (PS)** utilizează înțelegerea obținută în etapa DS-I, pentru a determina cei mai potriviți factori necesari a fi abordați în etapa PS (factorii cheie) în scopul de a îmbunătăți situația existentă, dezvoltă un model de impact bazat pe modelul de referință și pe modelul inițial de impact, care să descrie situația dorită și îmbunătățită, selectează partea modelului de impact ce urmează a fi abordată și determină criteriile de succes, dezvoltă sprijinul planificat ce vizează abordarea factorilor cheie, evaluează sprijinul real cu scopul de a determina dacă se trece la etapa DS-II, dezvoltă un plan de evaluare descriptiv.

**Studiul descriptiv II (DS-II)** determină dacă sprijinul poate fi utilizat pentru îndeplinirea sarcinii pentru care este destinat, identifică îmbunătățirile necesare pentru conceptul, elaborarea, realizarea, introducerea și contextul sprijinului, evaluează ipotezele din spatele situației existente reprezentate în modelul de referință, precum și situația dorită reprezentată în modelul de impact.

Aplicând această metodologie se formulează următoarele **obiective operaționale (OP)**, dezvoltate în capitolele lucrării:

**OP1** îl constituie studierea literaturii de specialitate referitoare la fabricație, în contextul celei de-a patra revoluții industriale.

**OP2** constă în cunoașterea în profunzime a sistemelor de fabricație inteligente și oferirea unei baze pentru dezvoltarea eficientă a acestora, în contextul Industriei 4.0.

**OP3** se axează pe definirea cadrului pentru integrarea sistemelor de fabricație inteligente, în contextul Industriei 4.0

**OP4** are în vedere implementarea unui sistem de fabricație inteligent integrat, cu aplicare în industria de autovehicule și pentru personalizare individuală în masă, în contextul Industriei 4.0.

Ultimul capitol, de încheiere și de trasare a perspectivelor de continuare a investigațiilor, prezintă evoluția și viitorul sistemelor de fabricație, în contextul Industriei 5.0.





## 2. FABRICAȚIA ÎN CEA DE-A PATRA REVOLUȚIE INDUSTRIALĂ

### 2.1. Obiectivul capitolului

Conform demersului adoptat, bazat pe *Design Research Methodology*, DRM (Blessing și Chakrabarti, 2009), acest capitol corespunde primei etape (fig. 1.1), **Clarificarea cercetării (RC)**, prin care se urmărește identificarea obiectivelor realizabile, studierea modelelor de referință și de impact, identificarea unui set preliminar de criterii de succes și criterii de măsurare a succesului raportat la care să se evalueze rezultatele cercetării, identificarea factorilor care contribuie la riscul obținerii succesului, dezvoltarea de sprijin pentru factorii cu cea mai mare influență asupra succesului, trasarea unei direcții de evaluare a efectelor sprijinului în raport cu obiectivele cercetării.

**Obiectivul operațional (OP1)** îl constituie studierea literaturii de specialitate referitoare la fabricație, în contextul celei de-a patra revoluții industriale.

### 2.2. Cea de-a patra revoluție industrială

#### 2.2.1. Evoluția tehnicii

Prima revoluție industrială este consemnată la sfârșitul secolului al XVIII-lea și este caracterizată de introducerea echipamentelor mecanice de producție acționate de forța apei sau a aburului. A doua revoluție industrială a debutat la sfârșitul secolului al XIX-lea și a reprezentat trecerea la producția de masă, cu ajutorul echipamentelor electrice și divizarea muncii. Cea de-a treia revoluție industrială a demarat în deceniul 8 al secolului al XX-lea, odată cu automatizarea echipamentelor de producție cu ajutorul calculatoarelor. A patra revoluție industrială, cel mai des întâlnită în Europa sub denumirea de „Industry 4.0”, presupune un set de avantaje din perspectiva dezvoltării unui produs nou cu

implicații și beneficii economice, pe tot lanțul valoric de distribuție. Caracteristicile revoluțiilor industriale sunt redată în figura 2.1.

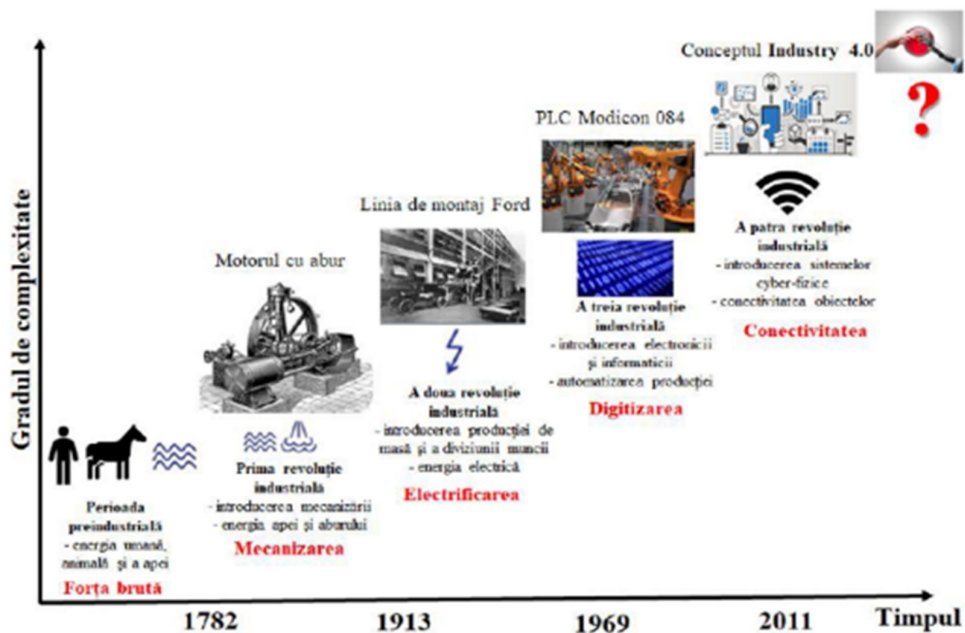


Fig. 2.1. Evoluția tehnicii de la prima la a patra revoluție industrială (Banabic, 2018)

Caracteristica de bază a celei de-a treia revoluții industriale este utilizarea sistemelor electronice și tehnologiei informației, precum și a roboților în automatizarea producției. Începând cu deceniile 8 și 9 ale secolului XX s-au făcut progrese semnificative în domeniul calculatoarelor, sensoristicii și telecomunicațiilor. Aceste realizări, împreună cu apariția și generalizarea în masă a internetului, au condus la cea de-a patra revoluție industrială - Industria 4.0 (Banabic, 2018). Aceasta este caracterizată de utilizarea sistemelor ciber-fizice în procesele de producție și în conectivitatea acestora. Conceptul de Industrie 4.0 a fost introdus de cancelarul Germaniei Angela Merkel în anul 2011, cu ocazia deschiderii Târgului de la Hanovra (Schwab, 2016).

O ilustrare sugestivă a evoluției tehnicii este redată și în figura 2.2 (Raja Santhi și Muthuswamy, 2023). Ca și o particularitate, în comparație cu celelalte revoluții industriale, Industria 4.0 a fost pentru prima dată menționată de către cercetători înainte de a se implementa. Motivul îl reprezintă tocmai numărul mare de noi tehnologii dezvoltate care, asamblate într-un mod corespunzător, pot

revoluționa atât modul convențional de producție, cât și modelul de business actual.

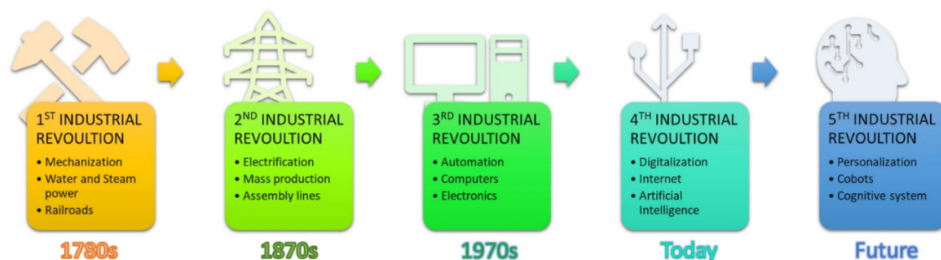


Fig. 2.2. Diferitele etape ale revoluției industriale (Raja Santhi și Muthuswamy, 2023)

În timp ce lumea încă încearcă să se adapteze și să realizeze potențialul Industriei 4.0, unii industriași și oameni de știință au început să imagineze și să discute despre următoarea revoluție industrială, Industria 5.0. Dacă Industria 4.0 se referă la conectarea digitală a mașinilor pentru a permite un flux continuu de date și cea mai înaltă optimizare posibilă, se crede că Industria 5.0 aduce oamenii înapoi în joc, pentru colaborare, și introduce atingerea umană în produsele fabricate, concentrându-se simultan pe fabricația durabilă (Raja Santhi și Muthuswamy, 2023).

Comisia Europeană a numit Industria 5.0 ca „viziunea industriilor de a gândi dincolo de creșterea productivității și eficienței și de a contribui la societate prin plasarea lucrătorilor în centrul procesului de producție. Accentul a fost pus pe cercetare și inovare, care este durabilă, centrată pe om și rezistentă.” ([https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50\\_en](https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en))

### 2.2.2. Ce este Industria 4.0?

În Europa, conceptul a fost lansat și e susținut de Germania prin programe guvernamentale și firme de top, ca Siemens sau Bosch. În America, demersul e numit „Smart Manufacturing”, în China se discută despre „Made in China 2025”, iar în Japonia „Innovation 25”. Toți își propun dezvoltarea unei industrii care să lanseze mai repede produse noi, să crească flexibilitatea și să sporească eficiența utilizării resurselor prin digitalizare.

Dacă în ultimii 15 ani varietatea produselor s-a dublat, în timp ce ciclul de viață s-a redus cu 25%, e ușor de imaginat că procesul de dezvoltare și fabricație are o complexitate în creștere și necesită noi modele și soluții tehnologice, pentru a putea răspunde nevoilor clienților. Din acest punct de vedere se poate spune că Industria 4.0 a apărut ca o necesitate pentru eficientizarea proceselor de producție. Avansului tehnologic exponențial, manifestat prin puterea de procesare, capacitatea de memorare și multitudinea de aplicații dezvoltate au făcut ca industria să evolueze până la acest nivel.

Din punct de vedere economic, Industria 4.0 reprezintă o șansă de relansare, de re tehnologizare a producției și de evoluție a modelelor de afaceri pentru servicii și produse. Din punct de vedere politic și social se urmărește reindustrializarea Europei, pentru o dezvoltare durabilă, după două decenii în care producția a fost transferată în Asia și s-a ajuns ca numai una din 10 companii la nivelul UE să și fabrice. Comisia Europeană a elaborat un plan numit „European Industrial Renaissance”. În anul 2014 valoarea adăugată în producție reprezenta numai 14,5% la nivelul UE, iar planul de creștere prevedea 20% până în 2020.

Industria 4.0 reprezintă o transformare semnificativă a întregii producții industriale, prin unificarea tehnologiilor digitale și a internetului cu industria convențională. Părerile sunt împărțite în privința folosirii termenilor de revoluție sau evoluție.

Industria 4.0 este multifuncțională. Include interfețe care comunică cu roboți de asamblare, stivuitoare autonome care stochează mărfuri în rafturi înalte și mașini inteligente care coordonează în mod independent procese de producție aflate în desfășurare. În Industria 4.0, oamenii, utilajele și produsele sunt interconectate direct fiecare cu fiecare.

Potrivit lui Armengaud ș.a. (2017), a patra revoluție industrială are un impact crucial, cu efecte pe parcursul întregului ciclu de viață al produsului, începând din faza de dezvoltare și continuând cu fabricația, utilizarea și mentenanța. Scopul Industriei 4.0 este găsirea unor soluții inovatoare pe tot lanțul valoric de distribuție. Conform aceluiași autori, printre contribuțiile notabile ale Industriei 4.0 se pot enumera introducerea modelelor de business bazate pe managementul datelor, introducerea unor metode eficiente de gestionare și previziune a costurilor, optimizând astfel produsele, pentru a satisface cerințele clienților, atât din punct de vedere funcțional, cât și al costurilor. O altă

contribuție ar fi digitalizarea proceselor care au loc de-a lungul întregii vieți a produsului, cu scopul de a favoriza un control mai bun al variantelor și deci, o flexibilitate mai mare a produselor, producția de masă personalizată devenind astfel accesibilă.

Într-un articol realizat de compania PwC Austria (Geissbauer ș.a., 2015), „Industria 4.0 presupune un grad mare de digitalizare, menit să aducă beneficii pe tot lanțul valoric”. Aici, digitalizarea este prezentată ca răspuns la provocările precum reducerea costurilor, reducerea timpului de dezvoltare, produse personalizate, chiar individualizate, reducerea consumului de energie și a consumului de materii prime în timpul procesului de fabricație.

Pentru o înțelegere profundă a principiilor care stau la baza celei de-a patra revoluții industriale se vor analiza unele definiții enunțate în lucrări de specialitate.

Astfel, Industria 4.0 este definită ca „un termen colectiv pentru tehnologii și concepte de organizare a lanțului valoric” (Hermann ș.a., 2016). În cadrul structurii modulare inteligente, fabricile Industriei 4.0, sistemele ciber-fizice (*Cyber-Physical Systems*, CPS) monitorizează procesele fizice, creează o copie virtuală a lumii fizice și iau decizii descentralizate. Peste internetul lucrurilor (*Internet of Things*, IoT), CPS comunică și cooperează între ele și cu oamenii, în timp real. Prin intermediul internetului serviciilor (*Internet of Service*, IoS) sunt oferite atât servicii interne, cât și inter-organizaționale, utilizate de participanții la lanțul valoric.

O altă definiție este potrivit căreia „Industria 4.0 înseamnă introducerea tehnologiei informației și a comunicațiilor (ICT) și conectarea acesteia cu internetul lucrurilor (IoT), al serviciilor (IoS) și al datelor mari și analitice (*Big Data and Analytics*, BDA), ceea ce permite ca procesul de fabricație să se desfășoare în timp real” (Gissler ș.a., 2016). Astfel, adaptarea la cerințele clientului se realizează mai ușor printr-un număr mare de variante și un grad mai mare de personalizare și individualizare a produselor.

Așa cum este definită de Schlund ș.a. (2014), „Industria 4.0 reprezintă integrarea inteligentă a proceselor și produselor în lanțul valoric industrial”. Conform aceluiași autori, ea se bazează pe cinci piloni: sisteme integrate, fabrici inteligente, rețele stabile, tehnologie cloud și securitate cibernetică.

În literatura de specialitate există un consens în ceea ce privește importanța Industriei 4.0, a cărei tendință de digitalizare a ciclului de viață al

produselor și pe tot lanțul de aprovizionare permite creșterea competitivității și generarea de noi oportunități de afaceri (Gissler ș.a., 2016), (Wee ș.a., 2016), (Geissbauer ș.a., 2016). Aceiași autori sunt de acord că identificarea propunerilor care aduc valoare este dificilă, pentru că impune colaborarea între experți din diferite domenii, cum ar fi tehnic, IT, business. Scopul acestei colaborări este să identifice propuneri care aduc valoare, având în centru un produs fizic îmbunătățit de interfețe digitale și servicii de baze de date (Geissbauer ș.a., 2016).

### 2.2.3. Tehnologiile Industriei 4.0

Noile tehnologii avansate, asociate Industriei 4.0, ilustrate în figura 2.3, reprezintă o oportunitate pentru a redefini modul de concepție și fabricație al noilor produse.



Fig. 2.3. Tehnologiile specifice Industriei 4.0 (Ruessmann ș.a., 2015)

Analiza bazată pe seturi mari de date (*Big Data and Analytics*, BDA) a apărut abia recent în lumea producției, unde optimizează calitatea producției, economisește energie și îmbunătățește serviciul echipamentelor.

Roboții autonomi colaborativi (*Autonomous Robots*) interacționează unul cu celălalt și lucrează în siguranță, cot la cot cu oamenii și învață de la ei.

Simularea (*Simulation*) folosește date în timp real pentru a oglindi lumea fizică într-un model virtual, care poate include mașini, produse și oameni.

Integrarea sistemului orizontal și vertical (*Horizontal and vertical system integration*), odată cu Industria 4.0, permite ca funcțiile și capacitățile companiilor și departamentelor să devină mult mai coezive, pe măsură ce rețelele universale de integrare a datelor evoluează și permit lanțuri valorice cu adevărat automatizate.

Internetul industrial al lucrurilor (*Industrial Internet of Things*, IoT) permite dispozitivelor de teren să comunice și să interacționeze atât între ele cât și cu controlere mai centralizate, după cum este necesar.

Securitatea cibernetică (*Cybersecurity*) exprimă nevoia de a proteja sistemele industriale critice și liniile de producție de amenințările de securitate cibernetică, odată cu creșterea conectivității și utilizarea protocoalelor de comunicații standard.

Tehnologia cloud (*Cloud Computing*, CC) permite mai multe servicii bazate pe date pentru sistemele de producție, mai multe întreprinderi legate de producție necesitând un schimb sporit de date între site-uri și granițele companiei.

Metodele de fabricație aditivă (*Additive Manufacturing*, AM) vor fi utilizate pe scară largă pentru a produce loturi mici de produse personalizate, care oferă avantaje de construcție, cum ar fi modele complexe și ușoare.

Sistemele bazate pe realitate augmentată (*Augmented Reality*, AR) acceptă o varietate de servicii, cum ar fi selectarea pieselor într-un depozit și trimiterea instrucțiunilor de reparații pe dispozitive mobile. Aceste sisteme sunt în prezent la început, dar vor avea o utilizare mult mai largă, pentru a oferi informații în timp real, necesare pentru a îmbunătăți luarea deciziilor și procedurile de lucru.

La toate acestea se adaugă inteligența artificială (*Artificial Intelligence*, AI), care este o inteligență bazată pe algoritmi, furnizată mașinilor pentru a oferi



abilități de rezolvare a problemelor, de luare a deciziilor și pentru a îndeplini misiuni asemănătoare omului.

Învățarea automată (*Machine Learning*, ML) este un subset de inteligență artificială care utilizează date, algoritmi și software, pentru a prezice rezultatul cu precizie prin învățarea statistică.

Sistemele ciber-fizice (*Cyber-Physical Systems*, CPS) sunt sisteme informatice inteligente care integrează capacitățile de detectare, calcul, control și rețea în obiecte fizice și le conectează la Internet și între ele.

Modelul fundamental al Industriei 4.0 poate fi împărțit în tehnologii digitale sau de calcul, care sunt cuplate cu sistemele lumii fizice. În timp ce AI, ML, BDA, CC și securitatea cibernetică fac parte din tehnologiile de calcul de bază, alte tehnologii precum automatizarea și robotica, IoT, CPS și AM formează partea fizică. Aceste tehnologii realizează împreună beneficiile sistemelor Industriei 4.0, pentru a permite fabricația agilă, flexibilă și care este o parte esențială a fabricației inteligente sau a fabricilor inteligente (Raja Santhi și Muthuswamy, 2023).

În viziunea experților consultanți de la Roland Berger Strategy Consultants ([https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_digital\\_transformation\\_of\\_industry\\_20150315.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_digital_transformation_of_industry_20150315.pdf)), digitalizarea industriei este susținută de patru piloni:

- folosirea datelor digitale, prin capacitatea de colectare, gestionare și analiză a lor;
- automatizarea, pentru a obține produse cognitive care să interacționeze cu mediul și care au capacitatea să se auto-organizeze;
- conectivitatea, care să sincronizeze lanțurile de aprovizionare cu scopul de a scurta ciclurile de inovație;
- transparența, asigurată de accesul digital al clienților.

Marea revoluție industrială depinde de mici revoluții tehnologice în diverse domenii:

- aplicarea tehnologiei informației și comunicațiilor pentru a digitaliza informația și a integra sistemele la concepție, dezvoltare, fabricație și utilizarea produselor;
- noi tehnologii software pentru modelare, simulare, virtualizare și fabricație digitală;

- dezvoltarea sistemelor ciber-fizice pentru a monitoriza și controla procesele fizice;
- evoluția imprimantelor 3D și altor procedee de fabricație aditivă pentru a simplifica fabricația;
- suport pentru decizie la operatorii umani, apariția uneltelor inteligente și asistență folosind realitatea augmentată;
- noi forme de interacțiune om-mașină.

Multe din aceste tehnologii sunt disponibile de câțiva ani, iar altele nu sunt încă pregătite pentru a fi folosite la scară largă.

#### 2.2.4. Componentele Industriei 4.0 și principii de concepție

Componentele Industriei 4.0 au fost considerate inițial ca sisteme ciber-fizice (*Cyber-Physical Systems*, CPS), fabrici inteligente (*Smart Factory*) și produse inteligente (*Smart Products*). Au fost incluse, de asemenea, subiecte precum *Cloud Computing* (CC), *Data Mining* (DM), interfețe *Machine to Machine* (M2M), *Enterprise Resource Planning* (ERP), *Internet of Things* (IoT), *Virtual Manufacturing* (VM) și robotica inteligentă (Oztemel și Gursev, 2020).

Definițiile componentelor Industriei 4.0 determină principiile și scenariile de proiectare pentru Industria 4.0. Cele șase principii de proiectare, care pot fi derivate din cele patru componente (sistemele ciber-fizice CPS, internetul obiectelor IoT, internetul serviciilor IoS și fabrica inteligentă) sunt redată în tabelul 2.1 (Hermann ș.a., 2016).

Tab. 2.1. Principii de concepție a componentelor Industriei 4.0, după (Hermann ș.a., 2016).

Principii de concepție	Sistemele ciber-fizice (CPS)	Internetul obiectelor (IoT)	Internetul serviciilor (IoS)	Fabrica inteligentă
Interoperabilitate	x	x	x	x
Virtualizare	x	-	-	x
Descentralizare	x	-	-	x
Capacitate în timp real	-	-	-	x
Orientarea serviciului	-	-	x	-
Modularitate	-	-	x	-

**Interoperabilitatea** reprezintă un instrument important al Industriei 4.0, care presupune că toate CPS din cadrul unei celule de fabricație sau producție (roboți, stație de asamblare produse, echipamente auxiliare) sunt capabile să comunice într-o rețea complexă și asigură decizii autonome și descentralizate.

**Virtualizarea.** Prin virtualizare, CPS sunt capabile să monitorizeze procesele fizice. Datele senzorilor sunt legate de modele virtuale și modele de simulare, creând o copie virtuală a lumii fizice. În SmartFactoryKL, modelul virtual include starea tuturor CPS. În caz de eșec, un om poate fi notificat.

În plus, sunt furnizate toate informațiile necesare, cum ar fi următorii pași de lucru sau modalitățile de siguranță. Astfel, oamenii sunt sprijiniți în gestionarea creșterii complexității tehnice (Hermann ș.a., 2016).

**Descentralizarea.** Cererea în creștere pentru produse individuale face din ce în ce mai dificil controlul sistemelor la nivel central. Calculatoarele încorporate permit CPS să ia decizii pe cont propriu. Numai în cazurile de eșec sunt sarcini delegate la un nivel superior. Cu toate acestea, pentru asigurarea calității și trasabilitate este necesar de urmărit în permanență întregul sistem. În contextul SmartFactoryKL, descentralizarea înseamnă că etichetele de identificare prin frecvență radio (*Radio Frequency Identification*, RFID) spun care sunt etapele de lucru necesare. Prin urmare, planificarea și controlul central nu mai sunt necesare (Schlick ș.a., 2014).

**Capacitate în timp real.** Pentru sarcinile organizaționale, datele trebuie colectate și analizate în timp real. În SmartFactoryKL, starea instalației și a tuturor echipamentelor sale este permanent urmărită și analizată. Astfel, se poate reacționa la eșecul unei mașini și reutilizarea produselor către o altă mașină (Schlick ș.a., 2014).

**Orientarea serviciilor.** Serviciile companiilor, CPS și oamenilor sunt disponibile prin intermediul IoS și pot fi utilizate de către alte părțile interesate. Acestea pot fi oferite atât intern cât și peste granițele companiei.

Uzina SmartFactoryKL se bazează pe o arhitectură orientată către servicii, în care toate CPS își oferă funcționalitățile într-un serviciu web încapsulat (Hermann ș.a., 2016). Ca urmare, operația de proces specifică produsului poate fi bazată pe cerințele specifice clienților furnizate de eticheta RFID (Schlick ș.a., 2014).

**Modularitatea.** Sistemele modulare se pot adapta flexibil la cerințele de schimbare, prin înlocuirea sau extinderea individuală a modulelor. Prin urmare,

sistemele modulare pot fi ușor ajustate pentru a se adapta fluctuațiilor sezoniere sau modificarea caracteristicilor produsului. În SmartFactoryKL, noi module pot fi adăugate folosind principiul *plug-and-play*. Pe baza interfețelor software și hardware standard (Schlick ș.a., 2014), noile modulele sunt identificate automat și pot fi utilizate imediat prin IoS (Hermann ș.a., 2016).

### 2.2.5. Paradigmele Industriei 4.0

Industria 4.0 poate fi defalcată în următoarele mari paradigme: produsul inteligent, mașina inteligentă, sistemele inteligente legate în rețea, rețelele inteligente, producția în rețea și operatorul augmentat (Weyer ș.a., 2015).

Ideea călăuzitoare de **produs inteligent** este extinderea rolului unui produs, astfel încât acesta să devină mai degrabă activ, decât o parte pasivă a sistemului. Produsele au memorie, în care datele și cerințele operaționale sunt stocate astfel încât produsul să solicite resursele necesare și să orchestreze producției procesele necesare finalizării sale. Scopul final este crearea autoconfigurării proceselor în sisteme de producție modulare.

În paradigma **mașină inteligentă**, mașinile devin sisteme ciber-fizice (*Cyber-Physical Systems*, CPS). Tradiționala ierarhie de producție este înlocuită de o autoorganizare descentralizată, activată de CPS. Componentele autonome, cu informații de control local, pot comunica cu alte componente din dispozitivele din câmpul/aria de lucru, module de producție și produse, prin rețele deschise și descrieri semantice. În acest fel, mașinile sunt capabile să se autoorganizeze în cadrul rețelei de producție. Liniile de producție sunt atât flexibile, cât și modulare, încât chiar și cea mai mică dimensiune a lotului poate fi obținută în condițiile unei producții de masă extrem de flexibile.

O linie de producție modulară bazată pe CPS permite o integrare ușoară de tip *plug-and-play* sau înlocuire a unei linii de producție cu o nouă unitate de producție, de exemplu, în cazul reconfigurării.

Esența Industriei 4.0 este reprezentată de introducerea de **sisteme inteligente legate în rețea**, pentru a se autoregla fabricația. În acest nou loc de muncă, oamenii, mașinile, echipamentele și produsele vor comunica unele cu altele. Scopul este asigurarea unei producții flexibile, economice și eficiente. Toate părțile procesului de producție vor comunica cu toate celelalte interfețe printr-un sistem central de control al producției. De fapt, produsele își vor controla propria producție, iar realitatea virtuală și reală se vor contopi în timpul

producției. Programarea va fi controlată și de unitățile de comunicare. Fabricile se vor autoregla și își vor optimiza propria funcționare.

Industria 4.0 se referă la **rețelele inteligente** de mașini și procese din industrie, cu ajutorul tehnologiei informației și comunicării (ICT). Există multe modalități prin care companiile pot utiliza rețelele inteligente. Astfel, Industria 4.0 include Plattform Industrie 4.0 (<https://www.plattform-i40.de/>), care promovează dezvoltarea Industriei 4.0 în Germania:

- Producția flexibilă - multe companii folosesc un proces pas cu pas pentru a dezvolta un produs. Fiind parte dintr-o rețea digitalizată, acești pași pot fi mai bine coordonați și încărcarea utilajelor mai bine planificată.

- Fabrica convertibilă - liniile de producție viitoare pot fi construite în module și asamblate rapid pentru diverse sarcini. Productivitatea și eficiența vor fi îmbunătățite; se pot fabrica produse individualizate sau personalizate în cantități mici la prețuri accesibile.

- Soluții orientate către clienți - consumatorii și producătorii se vor apropia și mai mult. Clienții, ei înșiși, pot proiecta produse în funcție de dorințele lor. De exemplu, pantofii sport (Adidas) proiectați și adaptați la forma unică a piciorului clientului. În același timp, produse inteligente, care sunt deja livrate și în curs de utilizare, pot trimite date producătorului. Prin utilizarea acestor date, producătorul poate îmbunătăți produsele sale și poate oferi clientului servicii noi.

- Logistică optimizată - algoritmi pot calcula rutele ideale de livrare; utilajele raportează independent atunci când au nevoie de material nou. Rețelele inteligente permit un flux optim de bunuri.

- Utilizarea datelor - se pot combina și analiza date despre procesul de producție și starea unui produs. Analiza datelor va oferi îndrumări cu privire la modul în care un produs poate fi mai eficient. Mult mai important este că există o bază pentru modelele și serviciile de afaceri complet noi. De exemplu, producătorii de ascensoare pot oferi clienților lor mentenanță predictivă - ascensoare echipate cu senzori care trimit continuu date despre starea lor. Se poate detecta uzura produsului și corecta înainte de a duce la o defecțiune a sistemului de ascensor.

- Eficiența resurselor în economia circulară - întregul ciclu de viață al unui produs poate fi luat în considerare cu suportul datelor. Faza de concepție va putea determina ce materiale pot fi reciclate.

Prin **producția în rețea**, procesul de fabricație se poate adapta flexibil la solicitarea clienților, la activitatea celorlalte părți ale lanțului de aprovizionare și la schimbarea rapidă a mediului economic.

Cele cinci elemente principale ale producției în rețea sunt:

- Piese de lucru digitale. Fiecare piesă va cunoaște dimensiunile, cerințele de calitate și ordinea procesării proprii.

- Mașini inteligente. Mașinile inteligente vor comunica simultan cu sistemul de control al producției și piesa de prelucrat, astfel încât mașina să se coordoneze, să se controleze și să se optimizeze.

- Conexiuni de rețea verticală. După procesarea specificațiilor unice ale clientului pentru produsul care urmează să fie fabricat, sistemul de control al producției înaintează reguli automate către echipamente. În esență, produsele își controlează propriul proces de fabricație pe măsură ce comunică cu echipamentele, dispozitivele și alte piese de lucru privind condițiile de producție.

- Conexiuni de rețea orizontale. Comunicarea se realizează nu numai într-o singură fabrică, ci pe întregul lanț de aprovizionare, între furnizori, producători și furnizori de servicii. Scopul principal este îmbunătățirea eficiența a producției și utilizarea resurselor într-un mod mai economic.

- Piese de lucru inteligente. Produsul care urmează să fie fabricat percepe mediul de producție cu senzori interni și controlează, respectiv își monitorizează propriul proces de producție pentru a îndeplini standardele de producție. Aceasta se poate face pentru că poate comunica cu echipamentul, precum și cu componentele deja încorporate sau pe cale de a fi încorporate.

**Operatorul augmentat** vizează sprijinul tehnologic al lucrătorilor din mediul provocator al sistemelor de producție extrem de modulare. Industria 4.0 nu gravitează spre o producție fără lucrători digitalizați (spre deosebire de abordarea *Computer Integrated Manufacturing*, CIM, din anii '80-90). Operatorii umani sunt recunoscuți ca fiind cele mai flexibile părți ale unui sistem de producție, așa cum pot fi adaptați la medii de lucru provocatoare. Ca entitatea cea mai flexibilă în producție, lucrătorii se confruntă cu o varietate de locuri de muncă, de la specificare și monitorizare până la verificarea strategiilor de producție. În același timp, dacă este necesar, ei vor interveni manual în sistemul de producție. Asistența optimă poate fi furnizată prin telefonie mobilă, sensibilă în context de interfețe utilizator - sisteme de asistență orientate spre utilizator.

Interacțiunea stabilită cu tehnologiile oferă soluții prospective, inclusiv unele de pe piața bunurilor de larg consum (de exemplu: tablete, ochelari și ceasuri inteligente). Desigur, acestea din urmă trebuie adaptate la condițiile industriale. Prin sprijinul tehnologic, lucrătorii/operatorii pot demonstra întregul potențial, devenind astfel factori de decizie strategici și soluții flexibile la probleme. Astfel, vor fi capabili să se ocupe de creșterea constantă a complexității tehnice.

### 2.3. Paradigmele producției

În secolul XXI, ciclul de viață al produselor este mai scurt, iar consumatorii cer produse mai complexe, personalizate sau individualizate, în cantități mai mari. Acestea reprezintă provocări pentru procesele de fabricație.

Există multe indicii că practicile actuale de utilizare a resurselor nu sunt sustenabile, cu efect consecvent asupra producției. Sectorul industrial se confruntă cu o schimbare de paradigmă, care va schimba drastic producția. Produsele complexe, cu funcții multiple și individualizate, presupun un grad ridicat de inovare în faza de concepție și un grad ridicat de flexibilizare în producție.

În ultimii ani se observă o trecere de la o producție de masă și personalizată, către o producție individualizată (Koren ș.a., 2015), (Gu și Koren, 2022). Figura 2.4 prezintă o cronologie care arată evoluția paradigmelor de producție de la producția artizanală la individualizarea în masă. Cinci elipse ilustrează obiectivele diferitelor paradigme de producție, inclusiv costul, calitatea, varietatea, capacitatea de reacție și piața unuia, precum și factorii de sprijin corespunzători acestora.

În producția artizanală fiecare produs este unic, dar scump, față de individualizarea în masă, în care tendința „volum de produs pe varietate vs. varietate de produs” se îndreaptă către un cerc complet, apropiindu-se de „*Market-of-One*”. Cu toate acestea, în comparație cu costul produsului în paradigma producției artizanale, costul produsului individualizat în masă este redus dramatic, iar produsele de astăzi pot fi mai avansate și mai sofisticate. Numai oamenii bogați ar putea cumpăra produse artizanale, în timp ce produsele obișnuite individualizate în masă vor fi accesibile pentru majoritatea oamenilor.

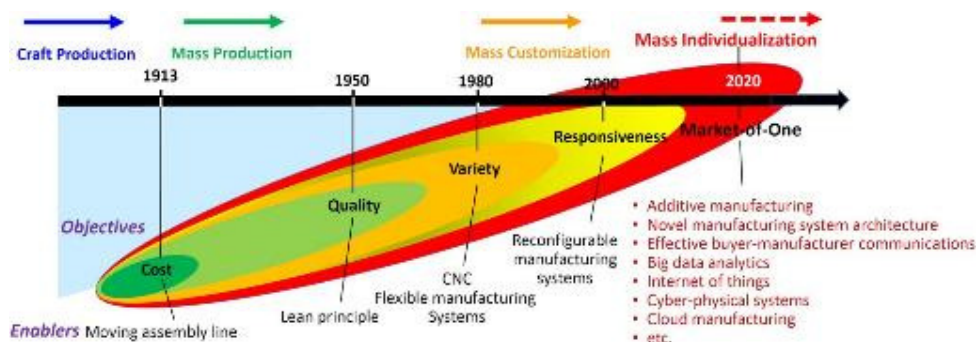


Fig. 2.4. Evoluția paradigmelor de producție, obiectivele și factorii lor (Gu și Koren, 2022)

Figura 2.5 arată relația dintre varietatea produsului și volumul produsului, în diferite paradigme de producție.

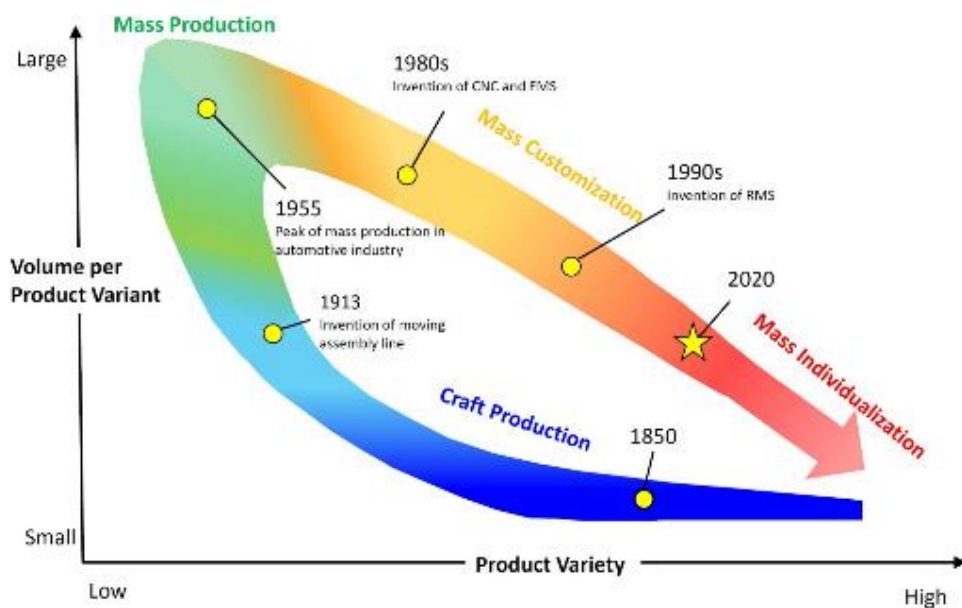


Fig. 2.5. Relația dintre varietatea produsului și volumul produsului, în diferite paradigme de producție, adaptat după (Koren ș.a., 2015)

Tabelul 2.2 exprimă paradigmele producției și caracteristicile lor, corespunzătoare arhitecturii produsului, tipului de produs construit și rolul clientului în schimbare (Koren ș.a., 2015).



Tab. 2.2. Caracteristicile paradigmelor producției, după (Koren ș.a., 2015).

Paradigmă	Arhitectura produsului	Tip produs	Rolul clientului
Producție artizanală	Unic	Produsele cerute de cumpărător	Furnizare cerințe
Producție în masă	Unificat	Produse identice	Alegere un produs
Personalizare în masă	Modular	Produs cu opțiuni	Alegere o opțiune oferită
Individualizarea în masă	Arhitectură deschisă	Produsul proiectat de cumpărător	Implicat în designul unic al produsului

În producția artizanală produsul este unic. La producția în masă, arhitectura produsului este unificată. La personalizarea în masă, arhitectura produsului este modulară, în timp ce la individualizarea în masă, arhitectura produsului este deschisă, secvența celor trei operații fiind mai complexă, așa cum este descrisă în figura 2.6 (Koren ș.a., 2015).

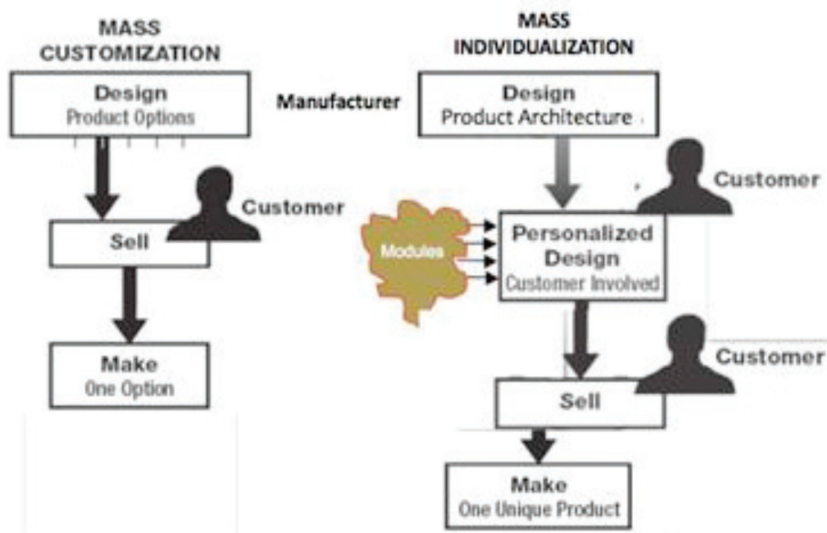


Fig. 2.6. Organigrama personalizării și individualizării în masă (Koren ș.a., 2015).

Principala diferență dintre paradigma individualizării în masă și paradigma personalizării în masă constă în relația cumpărător-producător. Produsele din paradigma personalizării în masă sunt concepute în primul rând de producător, în timp ce în paradigma individualizării în masă, caracteristicile și stilurile produsului sunt definite de client, care creează un produs unic, individualizat.

Mourtzis (2016) consideră că cele trei paradigme *Mass Production*, *Mass Customization* și *Mass Personalization (Individualization)* sunt diferențiate prin obiective, implicarea clienților, sistemul de producție și structura produsului (fig. 2.7).




	Mass production	Mass customization	Personalization
<b>Goal</b>	Economy of Scale	Economy of scope	Value differentiation
<b>Customer involvement</b>	Buy	Choose	Design
<b>Production System</b>	Dedicated Manufacturing System (DMS)	Reconfigurable Manufacturing System (RMS)	On Demand Manufacturing System
<b>Product Structure</b>			

Fig. 2.7. Diferențele dintre paradigmele de producție (Mourtzis, 2016)

Figura 2.8 prezintă tranzițiile între cele trei mari paradigme de fabricație din ultimii 100 de ani, arhitectura produselor și sistemele de fabricație asociate (Koren ș.a., 2015).

Deși conceptul de producție de masă personalizată a fost introdus de mai mulți ani, aplicarea eficientă reprezintă o mare provocare din punct de vedere al flexibilității și al capacității producătorilor de a schimba rapid variantele produselor fabricate (Zawadzki și Żywicki, 2016).

În cazul produselor personalizate, clientul este direct implicat în dezvoltarea produsului, de aceea șansele ca produsul finit să satisfacă nevoile clientului sunt foarte mari. De asemenea, relația cu clientul este consolidată, deoarece există comunicare directă între cele două părți încă din stadiile

incipiente ale procesului de concepție a produsului. Clientul înțelege exact pentru ce caracteristici ale produsului plătește și, în acest mod, atenția sa nu mai este îndreptată exclusiv către prețul plătit, ci și către beneficiile aduse de alegerile sale. Pe lângă avantaje, al căror beneficiar direct este clientul, acest tip de produse reduce repetitivitatea sarcinilor la locul de muncă și crește gradul de creativitate.

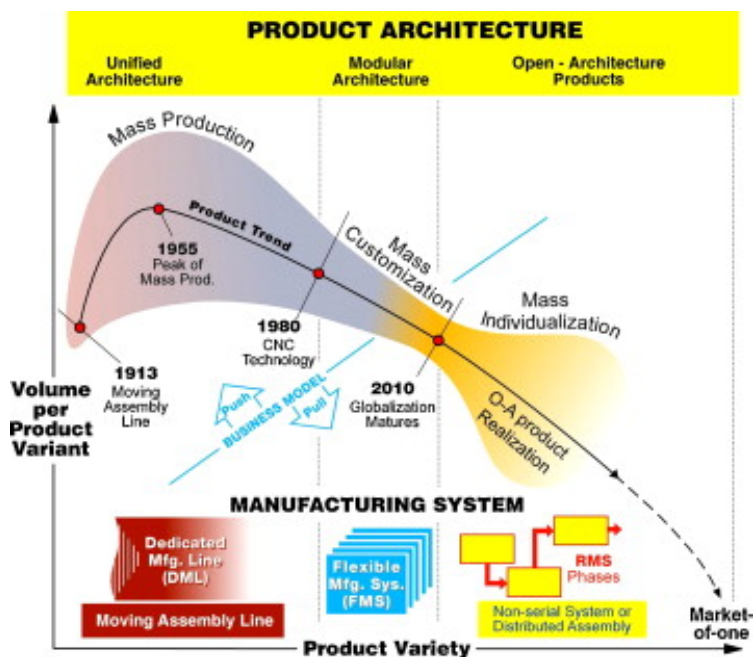


Fig. 2.8. Arhitectura produselor și sistemele de fabricație în funcție de volumul producției și varietatea produselor (Koren ș.a., 2015).

Printre dezavantajele produselor personalizate se numără costurile mari cu investițiile inițiale, timp îndelungat de concepție și dezvoltare, volume reduse și productivitate scăzută în comparație cu producția în serie mare și masă. Totodată, piața de desfacere se restrânge, deoarece produsele personalizate satisfac nevoile specifice unui anumit client.

În contextul Industriei 4.0, în ultimul timp se vorbește de paradigma emergentă a personalizării inteligente bazate pe date (Wang ș.a., 2021). Personalizarea inteligentă (*Smart personalization*) se referă la paradigma de personalizare care încorporează date mari pentru a înțelege mai bine cerințele clienților, pentru a îmbunătăți eficiența designului și productivitatea.

Disponibilitatea tot mai mare a datelor de la clienți poate duce la o mai bună identificare a cerințelor clienților. După cum se arată în tabelul 2.3, trei caracteristici diferențiază personalizarea inteligentă de personalizarea în masă.

Tab. 2.3. Comparație între personalizarea în masă și personalizarea inteligentă, după (Wang ș.a., 2021)

	<b>Personalizare în masă</b>	<b>Personalizare inteligentă</b>
Forța motrice a procesului decizional	Experiența designerilor și cunoștințele domeniului	Date mari
Răspunsul la incertitudinea cererii	Pasiv, care impune presiune furnizorilor	Previzibil și proactiv, îmbunătățind coordonarea
Relația cu clienții	Opțiuni limitate de personalizare, participare limitată a clienților	Interacțiunea cu utilizatorul, inovație deschisă

În primul rând, personalizarea inteligentă este o abordare bazată pe date, în timp ce personalizarea în masă este condusă de cunoștințele de domeniu ale designerului. Abordarea bazată pe date nu numai că are ca rezultat o definiție mai rapidă a preferințelor clienților și a tendințelor pieței, dar face mai eficient și mai reprezentativ și procesul de luare a deciziilor.

În al doilea rând, personalizarea inteligentă este mai predictivă și mai proactivă. Disponibilitatea în creștere a datelor permite producătorilor să anticipeze mai bine cerințele clienților și fluctuațiile cererii.

În al treilea rând, personalizarea inteligentă facilitează monitorizarea reciprocă între clienți și producători și implică îndeaproape clienții în întregul proces de personalizare.

## **2.4. Cadrul Industriei 4.0**

### **2.4.1. Produsele inteligente**

Produsele dezvoltate în ultimii ani au devenit din ce în ce mai complexe, și în cele mai multe cazuri ele nu se mai limitează la o funcție de bază. Noile produse tind să satisfacă mai multe cerințe și specificații pentru utilizator sau pentru sistemul în care activează. Complexitatea produselor a crescut progresiv, ele înglobează sisteme mecanice, electrice, electronice și IT. Mai mult, ele sunt

integrate în rețele în care comunică cu alte entități. Noile produse tind să fie capabile să comunice cu alte echipamente, asta presupunând sisteme electronice și software încorporate. Astfel de produse, cu funcții multiple, capabile să comunice și să schimbe informații în timp real, sunt considerate produse inteligente sau dispozitive conectate la *Internet of Things* (IoT).

Produsele inteligente sunt integrate în procesul de fabricație și participă activ la procesul de fabricație, controlând fiecare pas al procesului de producție. Totodată, produsele inteligente își cunosc parametrii normali de funcționare și pot oferi informații despre starea în care se află pe tot parcursul ciclului de viață (Lopes Nunes ș.a., 2017).

Cu toate că termenul de produs inteligent este vast folosit, nu există încă o definiție exactă a acestuia. Se pot însă trasa câteva caracteristici esențiale ale unui produs inteligent. Potrivit lui Maass și Janzen (2007), cele trei caracteristici esențiale pe care un produs trebuie să le aibă pentru a fi considerat inteligent sunt:

1. Capacitatea de adaptare la contextul situațional;
2. Capacitatea de adaptare la beneficiarii acestuia sau la cei care îl manipulează;
3. Capacitatea de adaptare la constrângerile modelului de business în care sunt dezvoltate.

Unul dintre cele mai importante avantaje ale produselor inteligente este că stochează și oferă informații în timp real despre ele, despre cum și în ce mediu sunt utilizate. Nu numai că pot oferi informații de identificare a produsului, ci și date din timpul funcționării și date cu privire la evenimentele care au avut loc pe parcursul ciclului de viață a produsului.

Până la urmă, integrarea produselor inteligente în sisteme de fabricație inteligente, prin intermediul IoT, este unul dintre pilonii celei de-a patra revoluții industriale.

Dezvoltarea produselor inteligente necesită tehnologii avansate, atât pentru concepție, cât și pentru fabricație, dar în aceste condiții, atât din perspectiva complexității, cât și din perspectiva costurilor inițiale de investiții, prețul produselor riscă să crească peste puterea de cumpărare a pieței de desfacere. În cazul produselor care se fabrică în serii mari, prin prisma volumelor mari, costurile sunt distribuite și prețul produsului rămâne competitiv. Dar, în cazul seriilor reduse de fabricație, este nevoie de o abordare diferită încă din faza

de concepție a produsului, iar succesiunea etapelor de concepție trebuie reevaluată.

Produsele inteligente, dezvoltate cu tehnologii avansate asociate Industriei 4.0, presupun interacțiunea lumii fizice cu lumea virtuală, cu scopul de a crește performanța produselor, respectiv a proceselor de fabricație, crescând astfel productivitatea și profitabilitatea companiilor.

### **2.4.2. Fabricația inteligentă**

Fabricația inteligentă utilizează cele mai noi tehnologii și analize avansate de date pentru a facilita performanța sistemului și capacitatea sa de a lua decizii. Wang ș.a. (2018) promulgă faptul că, datorită răspândirii senzorilor și a IoT, este resimțită o creștere imensă a datelor de fabricație, a volumului de date, precum și viteza datelor, iar analiza datelor ajută la gestionarea acestora prin evaluare și prelucrare. Fabricația inteligentă îmbrățișează o mulțime din cele mai noi tehnologii de informare și comunicare, plus facilități inteligente, și ajută la crearea și răspândirea un impact pozitiv în cadrul întregii structuri organizaționale. Datele colectate prin intermediul senzorilor diferă în ceea ce privește sursa, semantica și chiar formatul. De exemplu, datele pot fi colectate prin sisteme de fabricație, proces, gama de produs sau oameni.

În (Wang ș.a., 2021) se face o analiză comparativă a două terminologii diferite folosite pentru fabricația inteligentă: *Smart Manufacturing* (SM) și *Intelligent Manufacturing* (IM). SM și IM par a fi două paradigme paralele care au evoluat independent. Literatura studiată dezvăluie că SM apare mai frecvent cu conceptele de Industrie 4.0. Tehnologiile emergente comune pentru SM și IM includ Industria 4.0: sistemele ciber-fizice (*Cyber-Physical Systems*, CPS), internetul lucrurilor (*Internet of Things* – IoT), datele mari (*Big Data*, BD), geamănul digital (*Digital Twin*, DT), *Cloud Computing* (CC), inteligența artificială (*Artificial Intelligence*, AI) și învățarea automată (*Machine Learning*, ML).

Kusiak (2018) definește fabricația inteligentă astfel: „o formă emergentă de producție, care integrează activele de producție de astăzi și de mâine, cu senzori, platforme de calcul, tehnologie de comunicare, control, simulare, modelare intensivă de date și inginerie predictivă. Aceasta utilizează conceptele de sisteme ciber-fizice (CPS), internetul lucrurilor (IoT), cloud computing (CC), calculul orientat spre servicii, inteligența artificială (AI) și știința datelor. Odată

implementate, aceste concepte și tehnologii ar face din producția inteligentă semnul distinctiv al următoarei revoluții industriale. Esența producției inteligente este surprinsă în șase piloni: tehnologie și procese de fabricație, materiale, date, inginerie predictivă, durabilitate și partajarea resurselor și crearea de rețele.”

Bi ș.a. (2021-1) definește fabricația inteligentă (SM) ca „un tip de paradigmă de producție pentru îmbunătățirea inteligenței sistemelor, în care tehnologiile digitale sunt utilizate pentru a împuternici lucrurile fizice din produsele de fabricație, pentru a accesa active virtuale prin rețele pentru capacități de producție extinse, pentru a sprijini luarea deciziilor bazate pe date, în orice domeniu și la orice nivel al operațiunilor de producție și reconfigurează sistemele pentru a se adapta la schimbările nevoilor clienților la realizarea produselor”.

Kusiak, (2017) atribuie modelării și analizei datelor rolul de a fi o parte importantă a fabricației inteligente, ceea ce permite mai ușor gestionarea unui volum mare de date, precum și suport la prelucrarea de date în timp real.

Fabricația inteligentă include baze de date mari (*Big Data*, BD), caracteristici, tehnologii suport, piloni de implementare (fig. 2.9, 2.10, 2.11).

Fabricația inteligentă abordează aceste preocupări prin combinația de capacități avansate de fabricație și tehnologii digitale introduse în fiecare fază a ciclului de viață al produsului (Helu ș.a., 2015). Tehnologiile digitale au permis dezvoltarea de sisteme ciber-fizice care promovează interoperabilitatea între sistemele din întreprindere (Lee, 2018).

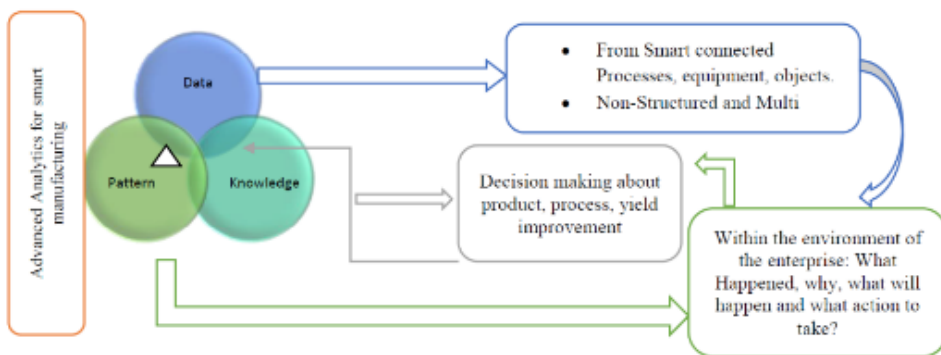


Fig. 2.9. Triumvirat al fabricației inteligente (El Hamdi, 2019).

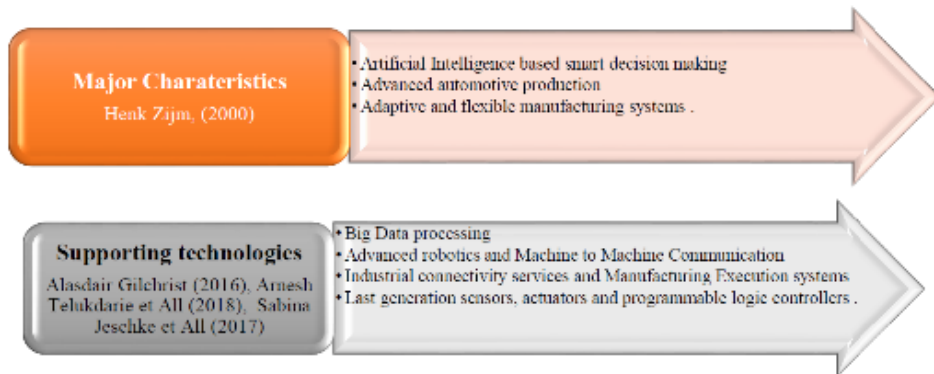


Fig. 2.10. Caracteristicile fabricației inteligente (El Hamdi, 2019).

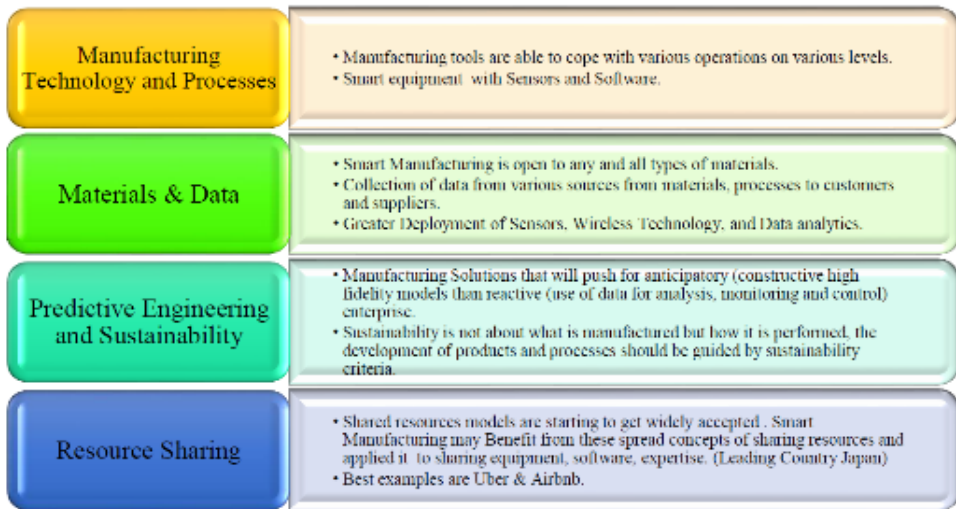


Fig. 2.11. Pilonii fabricației inteligente (El Hamdi, 2019).

Cele cinci caracteristici principale ale fabricației inteligente identificate de Deloitte (2021) constau în faptul că:

- aceasta este conectată la toate lucrurile inteligente prin internet, inclusiv seturi de date tradiționale, date în timp real, care permit colaborarea și colaborările între departamente;
- este optimizată pentru capacități previzibile, timp de funcționare și eficiență sporită a activelor, producție extrem de automatizată și manipulare a materialelor și costuri minime;



- este transparentă pentru metrici și instrumente live și au legături în timp real cu previziunile cererii și urmărirea comenzilor;
- este proactivă pentru identificarea și soluționarea anomaliilor, reprovizionare și reprovizionare și identificarea problemelor de calitate;
- este agilă pentru programare flexibilă și adaptabilă și schimbări de producție, cu mașini și machete configurabile.

Soluțiile oferite de Industria 4.0 sunt suficient de flexibile pentru a susține configurarea și dezvoltarea personalizată în funcție de unicitatea și cerințele specifice diferitor industrii, între care industria auto, care include un număr mare de produse. Astfel, rețelele de fabricație dinamice oferă oportunități de gestionare a modurilor de aprovizionare și de afaceri (Papakostas ș.a., 2013).

### 2.4.3. Sistemele de fabricație inteligente

A patra revoluție industrială este o nouă etapă pentru sistemele de fabricație, în special pentru sistemele de fabricație inteligente (*Smart Manufacturing Systems*, SMS), care pot răspunde rapid concurenței globale și cerințelor de personalizare (Qu ș.a., 2019).

În lumina celei de-a patra revoluții industriale, conceptele de flexibilitate și reconfigurabilitate ale sistemelor de fabricație și evoluția arhitecturilor de control ale acestora devin din ce în ce mai importante. Dezvoltarea sistemelor ciber-fizice (CPS), flexibilitatea și capacitățile lor integrate au deschis calea către tranziția de la controlul centralizat la arhitecturile de control heterarhice (descentralizate), de la sistemele de fabricație clasice la sistemele inteligente (Boccella ș.a., 2020).

Evoluția sistemelor de fabricație inteligente (*Smart Manufacturing Systems*, SMS) nu este legată doar de dezvoltarea tehnologică, ci și de cerințele dinamice ale părților interesate și de modelul de afaceri inovator.

Evoluția SMS-urilor este prezentată în figura 2.12.

În (Lu ș.a., 2016) sunt evocate și alte paradigme în evoluția sistemelor de fabricație: sisteme de fabricație flexibilă (*Flexible Manufacturing Systems*, FMS), sisteme de fabricație „lină” (*Lean Manufacturing Systems*, LMS), sisteme de fabricație digitală (*Digital Manufacturing Systems*, DMS), sisteme de

fabricație holonică (*Holonic Manufacturing Systems, HMS*), sisteme de fabricație agilă (*Agile Manufacturing Systems, AMS*).

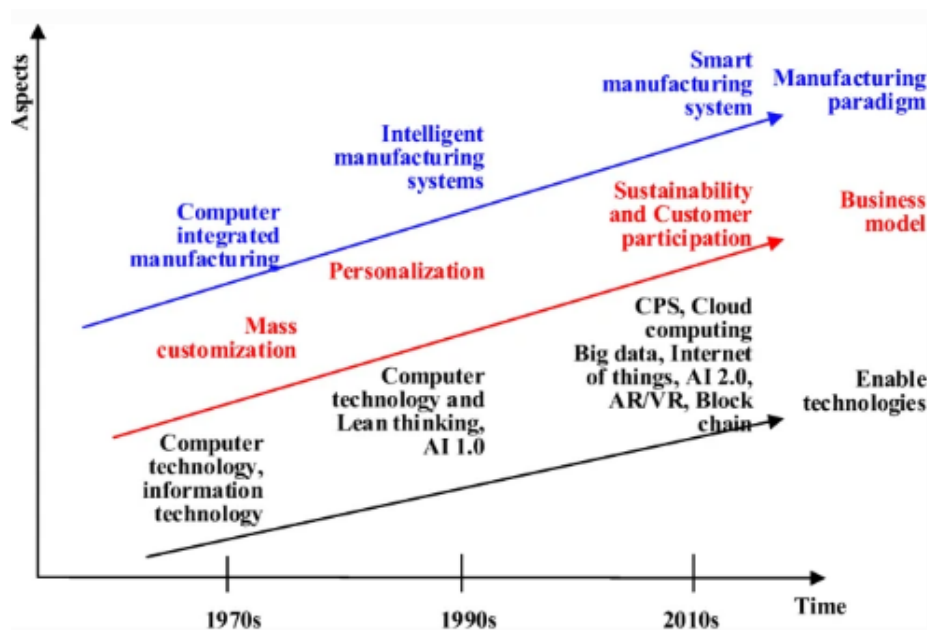


Fig. 2.12. Evoluția sistemelor de fabricație inteligente (Qu ș.a., 2019)

SMS se distinge de alte paradigme de fabricație prin definirea sensului de „inteligent”. Inteligența unui sistem de fabricație, conform Romero ș.a. (2020) acoperă: capacitatea de a comunica pentru a face schimb de date și de a colecta și raporta date privind starea activelor de producție; cunoștințele încorporate pentru reprezentarea expertizei umane și înțelegerea elementelor sistemului și a mediului; capacități de învățare prin aplicarea unor algoritmi, metode și instrumente diversificate; capacități de raționament pentru luarea deciziilor bazate pe date; capacitatea de percepție de a simți, înțelege și răspunde la schimbările de mediu; capabilități de control pentru a asigura procese de fabricație fără probleme și pentru a face și livra produse utilizatorilor finali; auto-organizare pentru a reconfigura sistemele pentru a se adapta schimbărilor și incertitudinilor; conștientizarea contextului care recuperează informațiile și cunoștințele care caracterizează starea sistemelor și a mediului.

Qu ș.a. (2019) fac o analiză a definițiilor fundamentale ale sistemelor de fabricație inteligente.

Din punctul de vedere al ingineriei, sistemul de fabricație inteligent este „o aplicație intensificată a sistemelor de inteligență avansate, care permit fabricarea rapidă de noi produse, răspunsul dinamic la cererea de produse și optimizarea în timp real a producției și a rețelelor lanțului de aprovizionare”.

Din perspectiva interconectării și comunicațiilor, „sistemul de fabricație inteligent pentru Industria 4.0 folosește senzori și tehnologii de captare a datelor în toate etapele de producție. SMS devine inteligent prin faptul că rata de producție crește, în timp ce erorile și risipa de producție se reduc”.

Din punctul de vedere al analizei predictive și al luării deciziilor „SMS bazate pe date mari (*Big Data*) optimizează planificarea și controlul operațiunilor de producție, inclusiv furnizarea predictivă, producția predictivă, diagnosticarea defecțiunilor, utilizarea activelor și evaluarea riscurilor etc.”

Bi ș.a., (2021-1) consideră că „inteligenta unui sistem de producție se referă la capacitatea sa de a oferi procese de fabricație mai bune sau de a sprijini o mai bună luare a deciziilor în alte operațiuni de producție. Inteligența poate fi măsurată printr-un singur indicator de performanță a sistemului sau o combinație a acestora, cum ar fi gradul de automatizare, rentabilitatea, flexibilitatea, robustețea, flexibilitatea, adaptabilitatea, sustenabilitatea și rezistența” .

În (Moghaddam ș.a., 2018) sistemele de fabricație inteligente sunt definite ca „sisteme colaborative complet integrate, care răspund în timp real la cerințele și condițiile în schimbare ale fabricii, rețelei de aprovizionare și nevoilor clienților prin digitalizarea sistemului de producție”.

Sistemele de fabricație inteligente sunt „sisteme flexibile care operează cu produse inteligente” (Zheng ș.a., 2018). Sistemele flexibile de fabricație sunt capabile de a reacționa în cazul apariției unor schimbări previzibile sau imprevizibile. Există două niveluri de flexibilitate: flexibilitatea resurselor (de ex. mașini, roboți) și flexibilitatea fluxului de materiale. În primul caz, sistemul poate procesa tipuri noi de produse, iar ordinea în care se execută operațiile pentru un anumit produs este variabilă. În cel de-al doilea caz, echipamentele de fabricație pot procesa mai multe operații, iar traseul produselor procesate poate să fie diferit.

Qu ș.a. (2019) sintetizează obiectivele și cerințele SMS-urilor.

Obiectivul este realizat eficient prin funcții, care sunt realizate prin activități de afaceri care integrează tehnologiile avansate relevante. Cerințele SMS-urilor sunt inspirate din arhitectura de referință a Industriei 4.0 (RAMI 4.0)

și cadrul pentru sistemele fizice cibernetice (CPS). Modelul funcțional al SMS identifică cerințele activităților și face ca acele activități să fie eficiente și bazate pe sistemele software disponibile.

Cerințele funcționale sunt analizate din perspectiva capacității autonome de analiză a SMS-urilor, inclusiv capacitatea de captare a informațiilor și datelor din echipamente inteligente sau terminale mobile, capacitatea de adaptare a cerințelor și activităților dinamice și capacitatea de auto-optimizare. Funcțiile autonome constau din auto-detectie, auto-adaptare, auto-organizare și auto-decizie.

Cerințele tehnologice necesită integrarea și aplicarea încrucișată a multor tehnologii avansate care îmbunătățesc realizarea funcționării autonome *lean* și a valorii adăugate durabile a SMS. Pe baza cerințelor funcționale și tehnologice ale SMS sunt propuse cerințele de afaceri ale SMS. Industria 4.0 conține trei dimensiuni pentru a promova informatizarea industriilor de producție, oferind mai multă flexibilitate, reducerea timpului de livrare, adaptându-se la cerințele clienților cu loturi mici și oferind o nouă ofertă de servicii în aval.

Cerințele de bază ale SMS sunt nivelurile fizice, inclusiv celulele multi-agent și inteligente. Celulele inteligente sunt echipate cu senzori, dispozitive de acționare și tehnologie de comunicare, inclusiv roboți, mașini inteligente, contoare inteligente și alte infrastructuri care se pot conecta între ele prin module inteligente.

Mentținerea performanței înalte necesare sistemelor de fabricație actuale necesită folosirea unor metode și mijloace pentru a gestiona performanța pe tot parcursul ciclului de viață al sistemului (Kibira ș.a., 2016). În timpul proiectării sistemului, metodele și mijloacele folosite modelează, analizează și testează sistemul, astfel încât nevoile anticipate de fabricație și mediile de operare să fie investigate înainte ca sistemul să fie construit. În operarea sistemului, sunt utilizate metode și mijloace pentru a se asigura că sistemul menține performanța planificată prin monitorizare, evaluarea performanței și răspunsul corespunzător la abaterile de performanță.

Asigurarea performanței sistemelor de fabricație comportă trei aspecte:

- măsurarea performanței;
- analiza performanței;
- îmbunătățirea performanței.

Esențial pentru asigurarea performanței este măsurarea performanței, măsurătorile fiind cumulate în indicatori cheie de performanță (*Key Performance Indicators*, KPIs). Măsurarea performanței este urmată de analiza performanței, astfel încât să fie identificați factorii critici care guvernează performanța și să se ia decizii pentru îmbunătățire.

#### **2.4.4. Fabrica inteligentă**

Principiile cheie ale Industriei 4.0 sunt interconectarea, transparența informațiilor, deciziile descentralizate și asistența tehnică în timp real pentru operatorii umani. Toate părțile sistemului de fabricație ar trebui să fie conectate între ele și să aibă modele de date comune. Prin urmare, procesele de fabricație trebuie să fie digitalizate, iar tehnicile de simulare deschid acum calea către conceptul de „fabrică digitală”.

Fabrica digitală este definită ca o „rețea cuprinzătoare de modele, metode și instrumente digitale - inclusiv modelare, simulare și vizualizare 3D/realitate virtuală - integrate prin managementul continuu al datelor” (Chrysolouris ș.a., 2009), pentru a simula sistemele reale de producție și pentru a le optimiza performanța. Fabrica digitală aplică principii de planificare și control al producției, care vizează optimizarea sistemelor de producție pentru a face față unor medii mai complexe și mai competitive (Boccella ș.a., 2020). Conform unui sondaj prezentat de Stark ș.a. (2018), 9 din 10 companii plănuiesc să investească în digitalizarea fabricilor.

În contextul acestor progrese tehnologice majore s-a dezvoltat noul concept de organizare a activităților industriale, denumit „fabrica inteligentă” (*Smart Factory*, SM) (Radziwon ș.a., 2014), concept definit ca „fabrică ce conștientizează contextul, ajută oamenii și mașinile în executarea sarcinilor”, fiind o „caracteristică cheie a Industriei 4.0” (Kagermann, 2014).

Astfel, pentru ca Industria 4.0 să devină realitate, este esențială integrarea orizontală a rețelei de valori între corporații, integrarea de la un capăt la altul a lanțului valoric ingineresc și integrarea verticală a fabricii din interior (Wang, 2016). Acest lucru este obținut prin sisteme care lucrează în fundal, așa-numitele sisteme calme și interpretare context, care înseamnă că sistemul poate lua în considerare informațiile de context precum poziția și starea unui obiect. Aceste sisteme își îndeplinesc sarcinile pe baza informațiilor provenite din lumea fizică și virtuală. Informațiile despre lumea fizică sunt, de exemplu, poziția sau starea

unui instrument, în contrast cu informațiile despre lumea virtuală, cum ar fi documente electronice, desene și modele de simulare. Sistemele calme se referă în acest context la hardware-ul unei fabrici inteligente. Principala diferență între sisteme calme și alte tipuri de sisteme este capacitatea de a comunica și interacționa cu mediul lor (Lucke ș.a., 2008).

Fabrica inteligentă este un sistem de producție ciber-fizică (*Cyber-Physical Production Systems*, CPPS) care integrează senzori inteligenți, sisteme terminale încorporate, sistem de control inteligent și facilități de comunicații (Chen ș.a., 2018).

Pe baza definițiilor menționate anterior pentru CPS și IoT, fabrica inteligentă poate fi definită ca o fabrică unde CPS comunică prin IoT și ajută oamenii și mașinile în executarea sarcinilor lor (fig. 2.13).

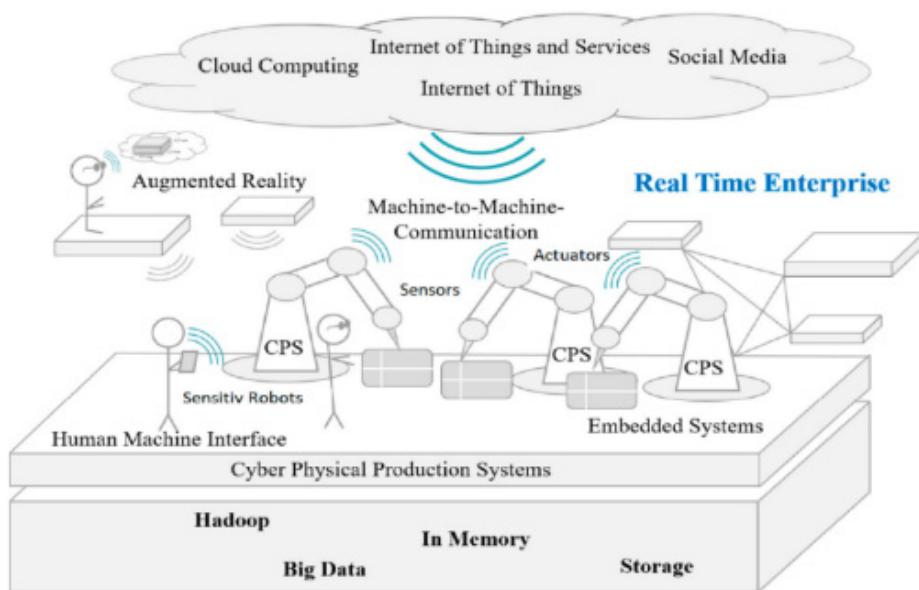


Fig. 2.13. Terminologia utilizată într-o fabrică inteligentă (Hermann, 2018).

În noua paradigmă de producție denumită *Smart Factory*, fabrica trebuie să fie suficient de flexibilă pentru a permite variații multiple ale secvențelor de producție, precum și adaptarea schimbărilor în sistemul de producție pentru noi oferte de produse personalizate/individualizate (Leng ș.a., 2020). În figura 2.14 se poate observa modul de realizare a producției de masă personalizate în fabrica inteligentă.

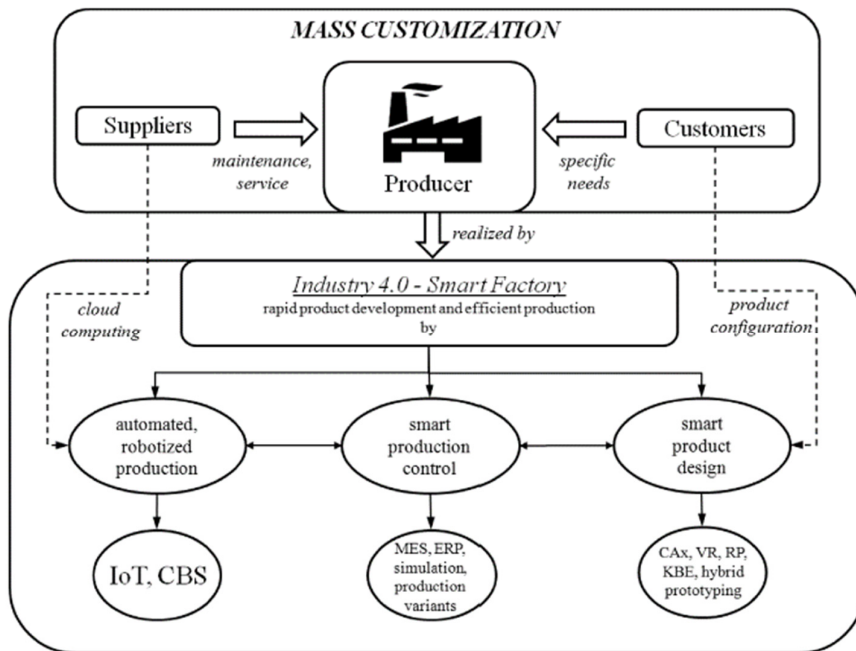


Fig. 2.14. Producția de masă personalizată în fabrica inteligentă (Zawadzki și Żywicki, 2016)

Sistemele de producție construite în mod tradițional pot satisface doar un anumit grad de variație a produsului și, prin urmare, sunt greoaie la schimbări. În sistemele tradiționale de producție este dificil de a realiza producția personalizată cu eficiență la scară largă, deoarece acestea nu pot integra informațiile, echipamentele și serviciile în timp util (Leng ș.a., 2020). O comparație între fabricația tradițională și fabricația inteligentă (fig. 2.15) dovedește diferența evidentă.

Filozofia celor două tipuri de fabrici este însă opusă: la nivel tradițional, mașinile și sistemele informaționale sunt instrumente pentru îmbunătățirea și gestionarea liniilor de fabricație, în timp ce la nivel inteligent sistemele informaționale și mașinile devin actori importanți în mediul integrat al fabricii, deoarece informațiile care le pun la dispoziție au un impact direct asupra luării deciziilor și, la rândul lor, asupra productivității și performanței liniei de fabricație.

Traditional Factory production	Smart Factory production
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production in a mass of specific products with fixed line of production.</li> <li>• Configured resources to the product manufacturing.</li> <li>• Limited approach by predetermining the input.</li> <li>• The change to the production setting is done by people with system down.</li> <li>• Communication between machines is not necessary.</li> <li>• The devices on the fields are not linked to the upper information systems.</li> <li>• The machines are preprogrammed and preconfigured to perform the wanted assignment or function.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Production of multiple small lots products, on demand or upon request.</li> <li>• Various resources coexisting in the production system.</li> <li>• Dynamic switch between manufacturing of different products directly induces a dynamic switch in the needed resources per se.</li> <li>• Products, processes, people and machines are interconnected and interact with each other.</li> <li>• An operating factory in a networked environment.</li> <li>• Each entity has a control function enabling them to deal with organization dynamics.</li> <li>• Production of voluminous data with cloud processing.</li> </ul>

Fig. 2.15. Comparația fabricației tradiționale cu fabricația inteligentă (El Hamdi, 2019).

Transformarea într-o fabrică inteligentă este mai degrabă o călătorie decât o soluție completă și cel mai bun mod de a o implementa este printr-un proces gradual, bazându-se pe capacitatea de digitalizare existentă (Sufian ș.a., 2019).

Figura 2.16 prezintă un concept de transformare în șase trepte, inspirat din industria auto, care poate servi drept piatră de temelie pentru o transformare strategică detaliată, spre o implementare cu succes și transformarea într-o fabrică inteligentă de clasă mondială.

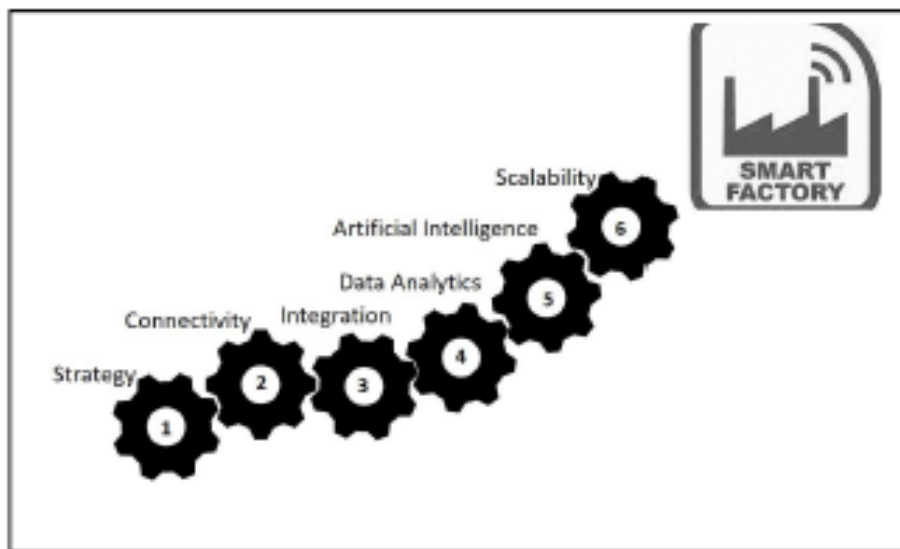


Fig. 2.16. Transformarea în șase trepte într-o fabrică inteligentă (Sufian ș.a., 2019)



Cele șase etape pornesc de la o strategie clară, construind o conectivitate perfectă și integrarea eficientă a sistemului, la modalitățile de aplicare a analizelor de date și știința prelucrării datelor, la datele procesului de fabricație, subliniind alte modalități de scalare a conceptului în interiorul și în afara fabricii.

În (Pîrvu și Zamfirescu, 2017) se prezintă cele mai semnificative oportunități și provocări pentru România de a mapa viziunea *Smart Factory*. Acestea sunt structurate în analiza SWOT a potențialului României de a adopta cea de-a 4-a revoluție industrială.

#### **2.4.5. Sistemele de fabricație reconfigurabile**

Pe piața mondială a crescut cererea de varietate și personalizare a produselor. Această cerere este resimțită atât în întreprinderile mici și mijlocii (IMM) cât și în întreprinderile mari de producție (*Large Manufacturing Enterprises*, LME). Pentru LME, cererea reprezintă o trecere de la producția de masă la personalizarea în masă și individualizarea în masă (Koren ș.a., 2018). S-a constatat însă că LME sunt reticente în adoptarea sistemelor de fabricație reconfigurabile (*Reconfigurable Manufacturing Systems*, RMS), care necesită costuri mari de investiții și capacități de debit mai scăzute (Koren și Shpitalni, 2010). Cu toate acestea, apariția produselor „la cerere”, personalizate sau individualizate, a înregistrat o schimbare în atenția LME, către cercetarea și dezvoltarea RMS în cadrul „fabricilor mobile” sau a „fabricilor fractale” (Morgan ș.a., 2021). Pentru IMM, provocarea este mult mai mare, deoarece ele nu dispun de resurse egale cu LME. Cu toate acestea, o capacitate agilă a IMM este fundamentală pentru sustenabilitatea acestora pe piețele tranzitorii cu cicluri de viață mai scurte ale produselor.

Liniile de fabricație dedicate (*Dedicated Manufacturing Lines*, DML) se bazează pe o automatizare fixă ieftină, care produce produsele sau piesele de bază pe o perioadă lungă de timp și la un volum ridicat, după cum se vede în [figura 2.17](#). Ele vizează reducerea complexității varietății de produse, minimizarea costurilor și maximizarea eficienței și productivității.

Sistemele de fabricație flexibile (*Flexible Manufacturing Systems*, FMS) pot produce o varietate de produse cu un grad asemănător. Capacitatea de producție a FMS este mult mai mică decât a DML. O nouă abordare a producției trebuie să combine nivelul ridicat al LMD cu flexibilitatea FMS, dar trebuie, de asemenea, să fie capabilă să reacționeze la schimbările pieței, prin adaptarea

rapidă și eficientă a sistemului de fabricație și a elementelor sale. Aceste capacități sunt incluse în sisteme de fabricație reconfigurabile (RMS), a căror capacitate și funcționalitate pot fi modificate exact atunci când este necesar (Koren și Shpitalni, 2010).

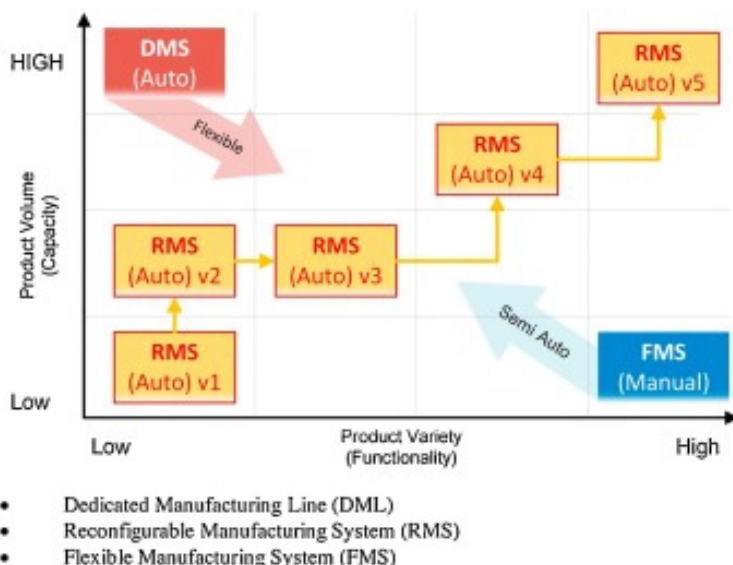


Fig. 2.17. Volumul producției vs varietate (Morgan ș.a., 2021)

Sistemele de fabricație reconfigurabile (*Reconfigurable Manufacturing Systems*, RMS) au fost introduse în circuitul cercetării teoretice și științifice pentru prima dată de către Centrul de Cercetare în Inginerie al Universității din Michigan, în 1999 (Koren ș.a., 1999). Aceste sisteme permit fabricanților să producă mai multe variante diferite ale produselor personalizate la prețul produselor standardizate (Alsafi și Vyatkin, 2010).

Sub paradigma personalizării în masă sau individualizării în masă, sistemele de producție sunt adesea reconfigurate în procesul de producție (Leng ș.a., 2020). În contextul Industriei 4.0, sistemele de fabricație reconfigurabile (RMS) sunt cele mai bine adaptate individualizării în masă (Koren ș.a., 2015).

În bazele de date internaționale numărul de articole referitoare la RMS a crescut începând din anul 2000, după cum se observă din figura 2.18.

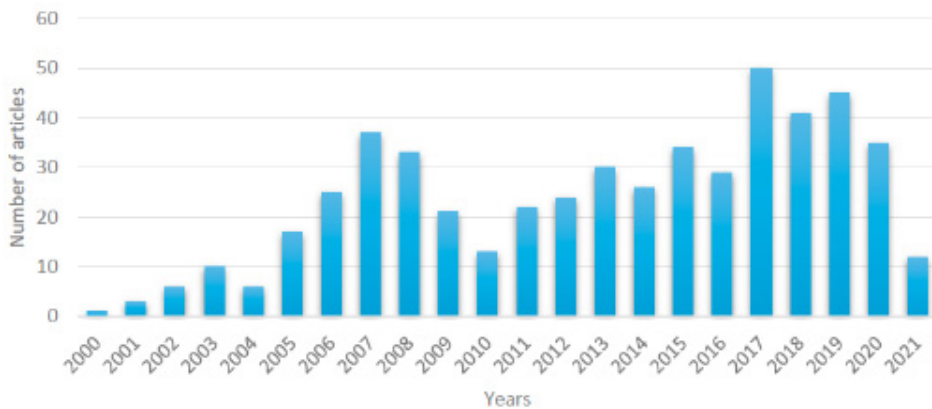


Fig. 2.18. Numărul de articole referitoare la RMS (Dahmani ș.a., 2022)

Sistemele de fabricare reconfigurabile (RMS) sunt proiectate de la început pentru schimbarea rapidă a structurii, precum și a componentelor hardware și software, pentru a ajusta rapid capacitatea de producție și funcționalitatea unei familii parțiale, ca răspuns la schimbările bruște ale cerințelor pieței sau ale reglementărilor (Koren ș.a., 1999).

Alte definiții similare ale RMS sunt sintetizate în (Dahmani ș.a., 2022):

- RMS este un sistem de fabricație care poate fi creat prin încorporarea modulelor de proces de bază atât hardware, cât și software, care pot fi rearanjate sau înlocuite rapid și fiabil (Mehrabi ș.a., 2000);
- RMS este un sistem de fabricație bazat pe arhitectura modulară care selectează două module de proces de bază, hardware și software, pentru reconfigurare sau înlocuire rapidă, economică și fiabilă (Kumar ș.a., 2019).

Așadar, RMS au o structură reglabilă, atât în arhitectura hardware, cât și în arhitectura software, și au următoarele șase caracteristici de bază (fig. 2.18), descrise în (Bortolini ș.a., 2018), (Dahmani ș.a., 2022), (Koren ș.a., 2018), (Kumar ș.a., 2019).

**Modularitatea** este definită ca:

- compartimentarea funcțiilor operaționale în unități care pot fi manipulate între scheme de producție alternative pentru aranjamente optime (Koren ș.a., 2018);

- o abordare de proiectare care subdivizează un sistem în părți mai mici numite module care pot fi create în mod independent și apoi utilizate în diferite sisteme (Lameche ș.a., 2017);
- strategie de construire a proceselor și produselor pornind de la subsisteme mai complexe, care sunt dezvoltate individual, dar cu funcționare integrată care permite producerea de produse diferite prin diferite combinații (Baldwin și Clark, 2003);
- descompunerea structurilor produsului, care se aplică descrierii tipului de produs, iar comunitatea se aseamănă cu gruparea variantelor de produse similare ale unui anumit tip de produs; abordare de proiectare care subdivizează un sistem în părți mai mici numite module care pot fi create în mod independent și apoi utilizate în diferite sisteme (Tseng și Wang, 2014).

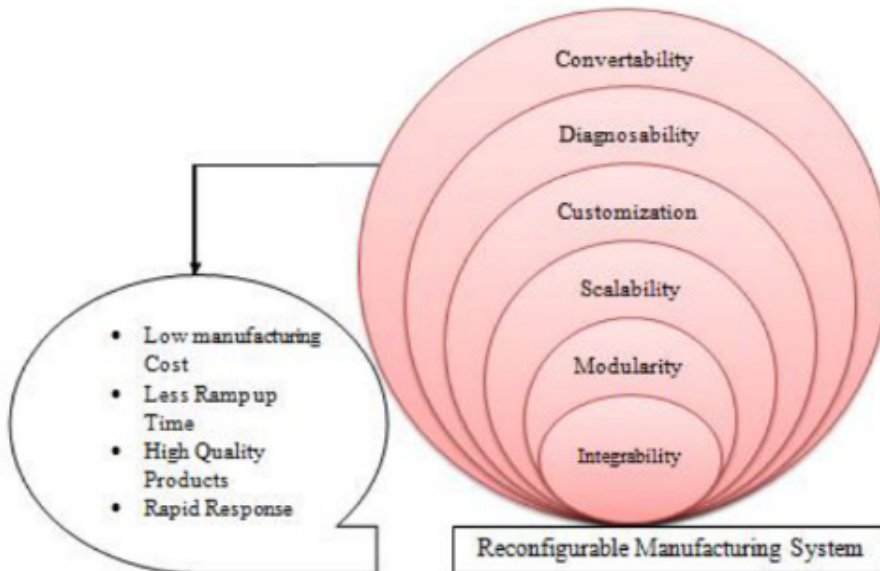


Fig. 2.19. Caracteristicile de bază ale sistemelor de producție reconfigurabile (Kumar ș.a., 2019)

Pentru a demonstra eficiența modularității în RMS, s-a discutat relația dintre proiectare pentru modularitate și întreținere și s-a arătat că mentenabilitatea depinde de utilitatea componentelor, de competența operatorului și de poziția componentelor vizate. În plus, s-a investigat o nouă

metodă de utilizare a modularității pentru a gestiona complexitatea RMS pe parcursul întregului său standard privind ciclul de viață. De asemenea, s-a demonstrat eficacitatea luării în considerare a înlocuirii modulelor în mașinile reconfigurabile (*Reconfigurable Machine Tool*, RMT) pentru a crește capacitatea de producție a unui RMS, utilizând o nouă programare liniară cu informații mixte. Rezultatele au arătat că modularitatea mașinilor are un impact pozitiv asupra consumului de energie atunci când este posibil să existe un set de module auxiliare pentru a efectua diferite operațiuni pe aceeași mașină.

**Integrabilitatea** contă în:

- capacitatea de a conecta module rapid și precis printr-un set de interfețe mecanice, informative și de control care facilitează integrarea și comunicarea (Khanna și Kumar, 2019);
- capacitatea de a combina componente și de a introduce noi tehnologii sau proceduri într-o structură existentă (Wang ș.a., 2017).

O evaluare cantitativă a potențialului de integrabilitate implică utilizarea metodologiei de proiectare axiomatică, pentru a obține măsuri privind gradul de libertate de producție. Fiecare grad este redus cu efortul necesar, pentru a-l încorpora în restul sistemului, în scopul de a modela integrabilitatea.

**Diagnosticabilitatea** se definește prin:

- capacitatea sistemului de a citi starea sa actuală și de a detecta și diagnostica cauzele defectelor produselor pentru a le corecta rapid (Koren, 2020);
- capacitatea de a citi automat starea curentă a unui sistem pentru detectarea și diagnosticarea cauzei primare a defectelor produsului de ieșire și de a corecta rapid ulterior defectele operaționale (Gumasta ș.a., 2011);
- capacitatea de a identifica rapid sursele problemelor de calitate și fiabilitate care apar în sistemele mari (Mehrabi ș.a., 2000);
- reglarea rapidă a sistemului pentru a atinge calitatea dorită a producției (Renzi ș.a., 2014).

Diagnosticarea ar putea fi împărțită între diagnosticarea componentelor și a sistemelor. Mai mult, diagnosticarea unui sistem poate fi împărțită în detectabilitate, diferențiere și previzibilitate. În plus, se poate presupune că diagnosticarea depinde de numărul total de mașini din sistem. Diagnosticarea ar

trebui să fie ponderată mai mult decât alte caracteristici, în cazul în care calitatea produsului reprezintă prioritatea.

**Convertibilitatea** constă în:

- capacitatea de a schimba cu ușurință funcționalitatea sistemului și a mașinilor existente pentru a corespunde noilor cerințe de producție și de piață (Koren, 2010);
- capacitatea unui sistem de a ajusta rapid funcționalitatea producției sau de a trece de la un produs la altul (Maler-Speredelozzi ș.a., 2003).

(Koren ș.a., 2018) au sugerat unele valori pentru cuantificarea convertibilității diferitelor sisteme de fabricație în ceea ce privește capacitatea de reacție, având în vedere configurația sistemului, configurația dispozitivului de manipulare a materialelor și configurația mașinii. De asemenea, au fost elaborați indicatori noi, cu integrarea informațiilor despre produs și proces, pentru a evalua convertibilitatea unui RMS, validat printr-un studiu de caz din industria automobilelor. Pentru a evalua proiectarea sistemului și pentru a evalua capacitatea sa de reacție la modificările pentru varietatea de produse a unui sistem de asamblare automată este necesară analiza convertibilității de proiectare. Convertibilitatea sistemului este definită ca o sumă a convertibilității echipamentelor și a convertibilității aspectului pe baza structurilor și a dispunerii echipamentelor.

**Personalizarea** este definită prin:

- flexibilitatea sistemului și a mașinii, limitată la o singură familie de produse, obținând astfel flexibilitate personalizată (Koren ș.a., 2018);
- proiectarea capacității și flexibilității sistemului (hardware și controale) pentru a se potrivi aplicației (familia de produse) (Mehrabi ș.a., 2000);
- capacitatea sistemului de a produce, în cadrul unei familii de produse, a unui produs cu caracteristici specifice unui anumit client (Koren, 2020).

Flexibilitatea personalizată înseamnă că mașinile construite în jurul familiilor de produse fabricate oferă doar flexibilitatea necesară pentru aceste componente specifice, în timp ce încorporarea modulelor de control care utilizează tehnologia de arhitectură deschisă, inclusiv funcțiile de control de bază necesare, este controlul personalizat.

**Scalabilitatea** poate fi definită astfel:

- capacitatea sistemelor de producție de a-și adapta capacitățile de producție la cerințele în schimbare (Wang și Koren, 2012);
- capacitatea de a modifica cu ușurință capacitatea de producție prin adăugarea sau eliminarea resurselor de producție și schimbarea componentelor sistemului ca răspuns la cererea în schimbare (Bortolini, ș.a., 2018);
- capacitatea unui sistem de a-și ajusta volumul de producție. Acest lucru poate implica adăugarea sau eliminarea resurselor tehnice sau umane (Koren, 2020).

Pentru a îmbunătăți scalabilitatea sistemului se propune o arhitectură modulară a mașinilor și se definesc patru valori pentru a evalua scalabilitățile acestora: perioada de grație, spațiu la sol pe unitate, dimensiunea creșterii capacității și costul per unitate de capacitate. Pentru a se investiga unde, când și cât de mult ar putea fi scalată capacitatea sistemului de producție, s-a sugerat o funcție de transfer pentru a obține cea mai mare capacitate de reacție a RMS la schimbările pieței și s-a introdus o abordare optimă a soluțiilor bazate pe algoritmi genetici pentru planificarea scalabilității. Pentru a selecta cele mai bune politici de scalare a capacității sistemelor dinamice reconfigurabile, s-au introdus două module: costurile de creștere a capacității de contabilizare și luarea în considerare a cererii sezoniere, pentru a evalua performanța a cinci politici de creștere a capacității. Pentru a obține modele de simulare scalabile și flexibile în Industria 4.0 a fost introdusă o nouă metodologie de modelare a întreprinderilor.

#### **2.4.6. Modele de arhitectură de referință pentru Industria 4.0**

RAMI 4.0 (*Reference Architecture Model Industry 4.0*) este un model de arhitectură de referință pentru Industria 4.0, care realizează o fabrică inteligentă și oferă o bază pentru standardizare (Holtkamp și Iyer, 2017). Acesta a fost prezentat pentru prima dată la Târgul de la Hanovra 2015 și a fost definit în comun de către asociațiile industriale Bitkom, VDMA și ZVEI (Hankel și Rexroth, 2018). Pe baza modelului trebuie creată o înțelegere comună, privind standardele care se folosesc, situațiile specifice și normele necesare pentru o fabrică inteligentă. Scopul modelului de arhitectură de referință este de a utiliza cât mai puține standarde și de a crea un model arhitectural clar și simplu (Zehl, 2018).

RAMI 4.0 constă dintr-un sistem de coordonate tridimensional, prezentat în figura 2.20. Practic, principalele sale caracteristici se bazează pe modelul de arhitectură Smart GRID (SGAM), deoarece acesta permite o abordare inițială concludentă pentru a prezenta situația din Industria 4.0 și se ocupă de puterea rețelei de generare prin transmisie și distribuție către consumator. Industria 4.0 se concentrează asupra dezvoltării de produse și scenariii de producție. Aceasta înseamnă că trebuie descris cum anume modul de dezvoltare a proceselor, liniile de producție, mașinile de fabricație, dispozitivele și produsele în sine sunt sau nu în funcție.

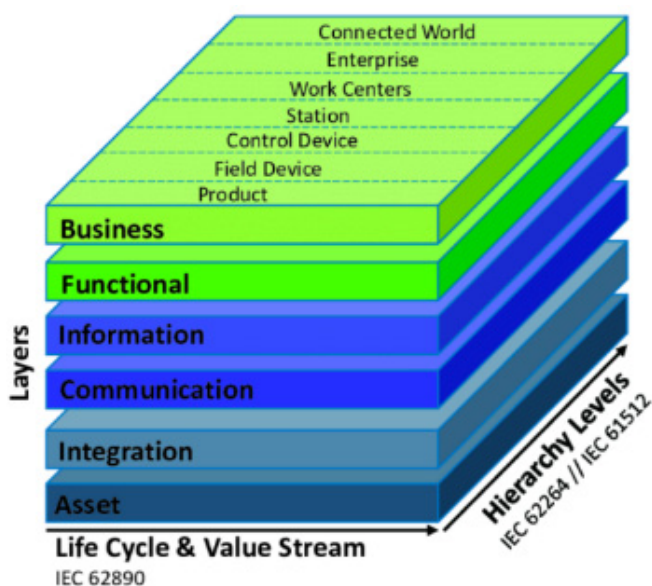


Fig. 2.20. RAMI 4.0 (Hermann, 2018)

Suportul este oferit prin intermediul software-ului *Enterprise Resource Planning* (ERP) și este utilizat ca sistem informațional în toate domeniile unei companii pentru activități comerciale. Mai mult, coordonarea sistemului de execuție al fabricației (*Manufacturing Execution System*, MES) este utilizat la nivel de management operațional și este familiarizat cu sarcini de control al producției, direcționare și monitorizare. Aceasta include nivelul de control al producției la care are loc planificarea producției pe termen scurt. Acest lucru se face cu ajutorul unor sisteme precum sistem de monitorizare, control și achiziție de date (*Supervisory Control and Data Acquisition*, SCADA). Între timp,



controlul și reglementarea sistemelor, cum ar fi așa-numitul *Controller Logic Programabil* (PLC), sunt situate la nivelul de control. La acest nivel, semnalele sunt evaluate de nivelul magazinului, procesate ulterior și returnate magazinului de nivel. Nivelul magazinului este echipat cu senzori și actuatore și furnizează date relevante pentru producție nivelurilor superioare (Hermann, 2018).

Comunicarea în companii se reflectă în prezent în sistemul ierarhic al automatizării, de tip piramidă. Scopul piramidei de automatizare este de a minimiza complexitatea producției industriale. Acest lucru se realizează prin clasificarea proceselor companiei în niveluri individuale, fiecare nivel fiind susținut de sisteme diferite. Figura 2.21 prezintă piramida tradițională de automatizare și sistemele ciber-fizice automatizate.

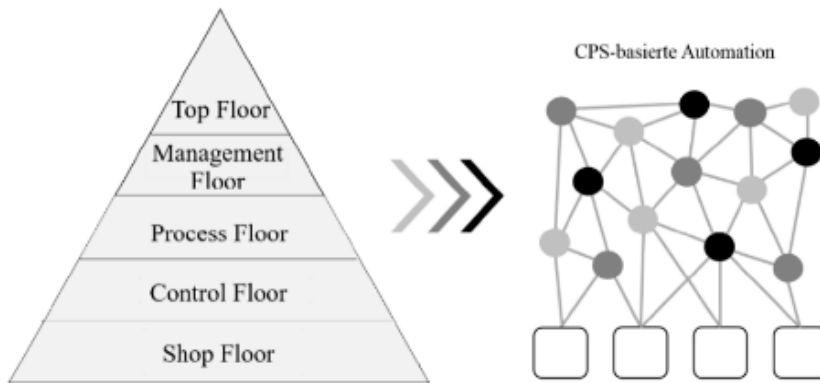


Fig. 2.21. Piramida tradițională de automatizare și sisteme automatizate ciber-fizice (Hermann, 2018).

## 2.5. Implementarea Industriei 4.0

În cea mai mare parte, companiile furnizoare se adaptează la standardele companiilor mai mari, ceea ce are ca și consecință reducerea/limitarea posibilitățile de acțiune ale companiilor mai mici. În mod similar, cheltuielile de capital prea mari sunt asumate atunci când companiile se bazează pe tehnologii care nu sunt orientate spre viitor (Schröder, 2018).

Implementarea Industriei 4.0 înseamnă utilizarea multor sisteme informatice implementate de diferite companii. Aceste sisteme informatice trebuie conectate. Acesta este încă un lucru foarte dificil și consumator de timp

și resurse. Standardizarea ar putea simplifica substanțial această sarcină și ar permite un număr mare de rețele de parteneri să colaboreze eficient și să exploateze astfel întregul potențial economic al Industriei 4.0.

### 2.5.1. Modele de implementare în companiile producătoare

Industria 4.0 a fost considerată o nouă etapă industrială în care mai multe tehnologii emergente converg pentru a oferi soluții digitale. Au fost propuse mai multe modele pentru a descrie Industria 4.0 și aplicarea acestora. Majoritatea dintre ele au o perspectivă de evoluție a maturității, care descrie modul în care ar trebui să se întâmple implementarea tehnologiilor (Meindl ș.a., 2021). Cu toate acestea, există o lipsă de înțelegere a modului în care companiile implementează aceste tehnologii.

Frank ș.a. (2019) propun un model de adoptare a tehnologiilor Industriei 4.0 în companiile producătoare. Cadrul conceptual pentru aceste tehnologii este împărțit în tehnologii *front-end* și tehnologii de bază (fig. 2.22). Tehnologiile *front-end* iau în considerare patru dimensiuni: *Smart Manufacturing*, *Smart Product*, *Smart Supply Chain* și *Smart Working*, în timp ce tehnologiile de bază iau în considerare patru elemente: internetul lucrurilor, servicii cloud, date mari și analitice.

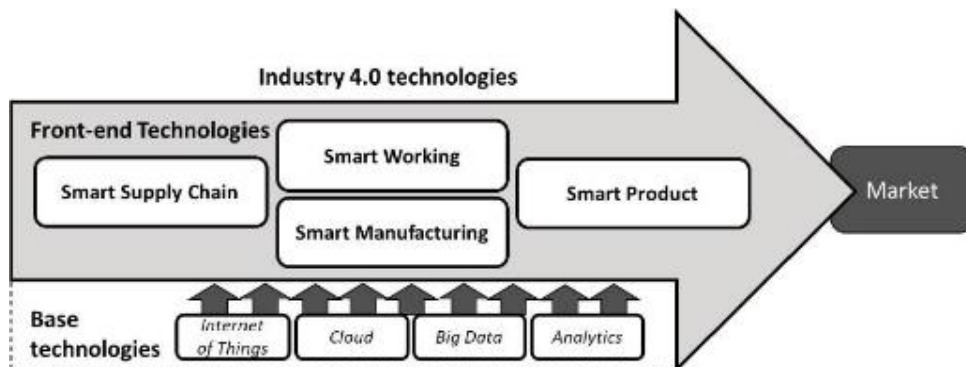


Fig. 2.22. Cadrul teoretic al tehnologiilor Industriei 4.0 (Frank ș.a., 2019)

În centrul cadrului se plasează tehnologiile *front-end* ale Industriei 4.0, care are în vedere transformarea activităților de producție pe baza tehnologiilor emergente (*Smart Manufacturing*) și a modului în care sunt oferite produsele (*Smart Products*). De asemenea, se ia în considerare modul în care sunt livrate materiile prime și produsele (*Smart Supply Chain*) și noile moduri în care

lucrătorii își desfășoară activitățile bazate pe suportul tehnologiilor emergente (*Smart Working*). Cele patru dimensiuni „inteligente” ale tehnologiilor *front-end* sunt preocupate de nevoile operaționale și de piață. Prin urmare, ele au un scop final de aplicare pentru lanțul valoric al companiilor, așa cum arată săgeata schematică reprezentată în figura 2.22. Este de remarcat faptul că dimensiunea centrală a stratului de tehnologie *front-end* este *Smart Manufacturing*, în timp ce celelalte dimensiuni sunt interconectate cu acesta. Stratul *front-end* se bazează pe un alt strat reprezentat în figura 2.22, denumit „tehnologii de bază”, care cuprinde tehnologii care oferă conectivitate și inteligență pentru tehnologiile *front-end*. Acest ultim strat este cel care permite conceptul Industriei 4.0, diferențiind acest concept de etapele industriale anterioare. Acest lucru se datorează faptului că tehnologiile de bază permit ca tehnologiile *front-end* să fie conectate într-un sistem de producție complet integrat.

Frank ș.a. (2019) au efectuat un sondaj în 92 de companii producătoare pentru a studia implementarea acestor tehnologii, sondaj care a arătat că Industria 4.0 este legată de o adoptare sistemică a tehnologiilor *front-end*, în care *Smart Manufacturing* joacă un rol central. Rezultatele au arătat, de asemenea, că implementarea tehnologiilor de bază reprezintă o provocare pentru companii, deoarece datele mari și analitice sunt încă puțin implementate în eșantionul studiat.

Meindl ș.a. (2021) au adaptat după Frank ș.a. (2019) un model conceptual al transformării digitale și cele patru inteligențe ale Industriei 4.0 (fig. 2.23).

Tehnologiile de bază stimulează transformarea digitală în fiecare dimensiune a întreprinderii și diferențiază Industria 4.0 față de etapele anterioare de dezvoltare industrială. Tehnologiile de bază sprijină transformarea unei întreprinderi convenționale, unde diferite dimensiuni nu sunt integrate, într-o întreprindere inteligentă (*Smart Enterprise*), unde diferitele dimensiuni sunt interconectate în mod optim la nivel de Industrie 4.0. Dimensiunile *front-end* cuprind tehnologiile unei întreprinderi inteligente pentru scopuri specifice în interiorul și dincolo de frontierele sale. Pe de o parte, dimensiunile interne iau în considerare fluxurile de valoare concentrate pe activitățile industriale ale companiei: procesele sale de fabricație (*Smart Manufacturing*) și lucrătorii săi (*Smart Working*). Dimensiunile externe, pe de altă parte, iau în considerare fluxurile de valoare care integrează procesele companiei cu mediul extern: lanțul său de aprovizionare (*Smart Supply Chain*) și clienții săi (*Smart Products and Services*). Aceste patru dimensiuni inteligente cuprind întregul potențial al

Industriei 4.0, deoarece acoperă principalele aspecte prezentate de cadrele anterioare.

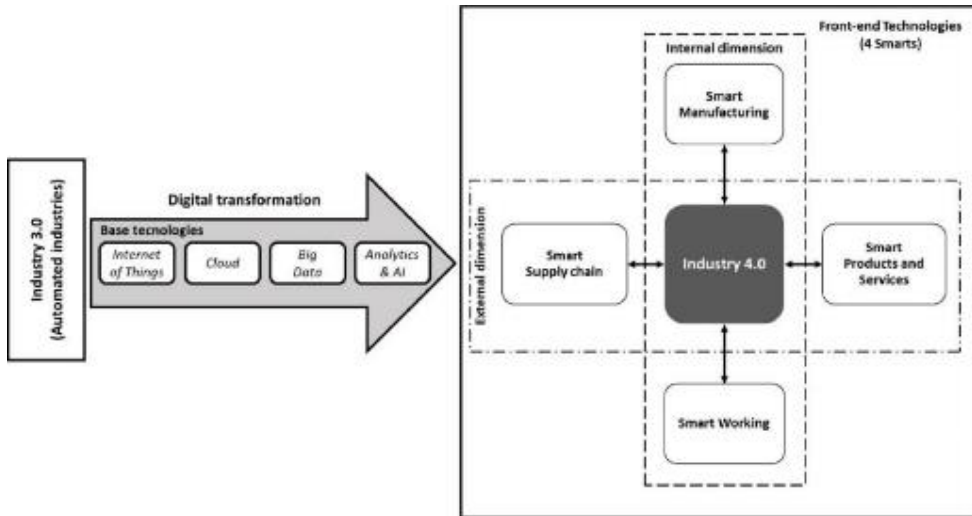


Fig. 2.23. Modelul conceptual al transformării digitale și cele patru inteligențe ale Industriei 4.0 (Meindl ș.a., 2021)

### 2.5.2. Provocări, oportunități și riscuri ale implementării Industriei 4.0

Înainte de revoluția industrială, comunitățile și societățile erau diversificate cu varietăți de ocupații, unele dintre ele fiind solicitante din punct de vedere fizic, în timp ce altele depind de creativitatea și intelectualitatea minții umane. Deși obiectivul revoluțiilor industriale a fost îmbunătățirea productivității și a calității produselor, aceasta a eliminat și oamenii din mediul de lucru periculos și neplăcut. Introducerea automatizării și a roboților în industrii i-a ajutat pe oameni să-și concentreze atenția asupra locurilor de muncă care necesită luare de decizii, rezolvare de probleme, intuiție, persuasiune sau abilități cognitive, în timp ce sarcinile grele erau făcute de mașini. Studiile arată că tehnologia recentă, cum ar fi AI, are potențialul de a provoca și chiar de a depăși oamenii în spațiul cognitiv. Prin urmare, în afară de **provocări** tehnice, cum ar fi gestionarea creșterii exponențiale a datelor, interoperabilitatea, sensibilitatea datelor, securitatea datelor, costul, puterea mare de procesare și consumul de

energie, celelalte provocări critice, cum ar fi factorii umani și sociali, pot fi perturbați de tehnologiile Industriei 4.0 (Raja Santhi și Muthuswamy, 2023).

Buchi ș.a. (2018) ilustrează modul în care Industria 4.0 furnizează tehnologii care să permită companiilor să obțină **oportunități** mai mari pe fondul unei eficiențe îmbunătățite (Scenariul I) și o capacitate de producție sporită (Scenariile II și III).

Scenariul I. Aceasta variază de la un model de producție bazat doar pe cantități mari de produse standardizate, cu variante limitate de produse (producție în masă) cu o eficiență mai mare, măsurată în termeni de profituri mai mari și costuri mai mici, la modelele care includ următoarele două scenarii de producție.

Scenariul II. Acesta implică fabricarea de produse care să satisfacă nevoile individuale ale clienților, cu o eficiență a producției aproape de cea a producției de masă, dar în număr limitat - individualizare în masă (Fogliatto ș.a., 2012; Tseng ș.a., 2010).

Scenariul III. Produsele sunt fabricate considerând experiența cu privire la gusturile clienților individuali pe baza preferințelor acestora, precum și a volumelor de producție dorite, comparativ cu scenariile I și II - personalizare în masă (Tseng ș.a., 2010).

Individualizarea în masă și personalizarea în masă facilitează varietatea ridicată în ceea ce privește gama de produse, care presupune trecerea de la achiziția unui model de produs (individual) la achiziția mai multor produse din aceeași gamă (personalizate) sau game diferite. Acest lucru poate fi apoi ajustabil în timp, ca răspuns la cererea în creștere pentru un anumit model de produs, ceea ce are ca rezultat o scădere suplimentară a mediei costuri unitare odată ce crește cererea pentru produsele individuale care devin personalizate și se vor produce în serii mai mari de fabricație.

Anderson (2004, 2006) definește această metodă ca o „strategie de coadă lungă”, ceea ce garantează profitul companiilor prin vânzarea unor volume mai mici de produse personalizate, care sunt greu de găsit pe piață, mai degrabă decât vânzând doar volume mari de produse fabricate în serie (Brynjolfsson ș.a., 2010). Situații similare au apărut în cazul producției de serie mică (produse de nișă) datorate fabricației aditive (Shapeways, 2015), care poate oferi produse la cerere prin procedeul de imprimare 3D.

Oportunitățile Industriei 4.0 pot fi clasificate în șase principale tipologii (Buchi ș.a., 2020):

- flexibilitatea producției, care apare în timpul fabricării loturilor mici; viteza de realizare a prototipurilor de serie;
- mai mare capacitatea de producție;
- costuri reduse de configurare și mai puține erori, precum și o disponibilitate mai mare a echipamentelor de fabricație;
- calitate superioară a produsului și rate de rebut scăzute;
- satisfacția crescută a clienților raportat la produsele realizate.

Implementarea pilonilor Industriei 4.0 implică și o serie de **riscuri**.

Viitorul halatelor albastre va fi serios influențat de Industria 4.0. Cu siguranță competențele cerute în fabricile viitorului vor fi altele decât cele din prezent. Multe din activitățile desfășurate azi, deservire mașini de producție, poziționare de precizie, asamblare, inspecție de calitate vor fi realizate de roboți. Aceștia nu numai că sunt mult mai eficienți, dar și comunică perfect cu sistemele de decizie și control.

Un risc este așadar pierderea locurilor de muncă în cadrul unei fabrici inteligente. Munca simplă de producție este înlocuită de digitalizare. Cu toate acestea, scopul introducerii unei fabrici inteligente ar trebui să fie dat de creșterea automatizării și reducerea costurilor și nu reducerea numărului de locuri de muncă.

Introducerea unei fabrici inteligente necesită desfășurarea flexibilă a personalului. Există deja fluctuații puternice ale cererii de personal. În viitor, aceste fluctuații vor fi și mai mari. Cerințele aferente angajatului de producție și calificarea necesară se va schimba major.

Piața muncii se va schimba, însă e greu de estimat dacă în ansamblu vor fi mai multe sau mai puține locuri de muncă. Roboții sunt încă la început și nu pot înlocui oamenii în toate activitățile. Pe de altă parte, rata de recuperare a investiției într-o fabrică complet automatizată nu este atractivă acum. Toate prognozele se bazează pe date din istorie, dar tehnologiile exponențiale sunt complet noi, în consecință efectul evoluției și folosirii la scară largă sunt greu de estimat. Riscul este să avem șomaj masiv pentru anumite categorii și lipsa personalului cu competențe digitale.

Unul dintre cele mai mari riscuri tehnice din cadrul unei fabrici inteligente este securitatea informațiilor. În ultimii ani, atacurile cibernetice împotriva companiilor și persoanelor private au crescut constant. Din cauza lipsei protecției

datelor și a securității datelor, atacurile cibernetice provoacă daune financiare mari. Răspândirea noilor modele de afaceri și utilizarea soluțiilor cloud sunt, de asemenea, împiedicate de amenințările emergente.

O altă provocare în mediul Industriei 4.0 o reprezintă disponibilitatea infrastructurii informatice. Utilizarea sporită a software-ului și a mașinilor și a sistemelor în rețea crește dependența companiilor de o infrastructură informatică puternică, scalabilă și disponibilă. Din acest motiv, sistemele informatice trebuie să creeze un cadru modern și virtualizat. Acest lucru poate fi făcut posibil cu ajutorul standardizării și consolidarea sistemelor informatice. În plus, toate componentele și sistemele din companie trebuie să fie conectate în rețea și trebuie garantată disponibilitatea datelor coerent.

O problemă la fel de importantă este disponibilitatea internetului rapid. În ceea ce privește extinderea și disponibilitatea rețelelor în bandă largă, Germania se află în partea de jos a clasamentului internațional.

Dar mai ales în epoca Industriei 4.0 și a digitalizării, starea „întotdeauna activat” este de un absolut necesar. O utilizare cuprinzătoare a CPS necesită o infrastructură care să permită un schimb de date de calitate superioară. Pentru a implementa o latență scăzută, fiabilitate ridicată, calitate înaltă și o rețea largă de bandă largă, rețelele de comunicații existente trebuie extinse.

Unitatea internațională de telecomunicații (UIT) definește o rată de transmisie de doi mega biți pe secundă ca o conexiune de bandă largă. Această viteză de transmisie specificată nu este suficientă pentru organizarea producției între companii și pe internet sau pentru a defini serviciile din aval. Din acest motiv, sunt necesare căi de transmisie stabile de înaltă performanță prin cabluri cu fibră optică. Un alt argument în favoarea continuării extinderii fibrei optice este că, având în vedere stadiul actual al tehnicii, nu există nicio alternativă. O fabrică inteligentă nu poate fi implementată fără cabluri de fibră optică, ceea ce face extinderea conexiunii în bandă largă indispensabilă.

În general, subiectul fabricii inteligente este aproape exclusiv despre introducerea de noi tehnologii. Cu toate acestea, trebuie luate în considerare și riscurile organizaționale.

Organizația companiei joacă un rol important în special la cel mai înalt nivel ierarhic. Managementul trebuie să definească o strategie și un plan clar pentru digitalizare și să demonstreze o înțelegere a sistemelor informatice și proceselor aferente. Mai mult, trebuie găsite modele organizaționale care să

permiță cooperarea fără limite ierarhice și asigurarea unei comunicări între toți participanții, în așa fel încât angajații să fie pregătiți pentru noile sarcini într-o fabrică inteligentă, conducerea trebuie să desfășoare activ managementul schimbării. Dar de multe ori acest lucru nu este folosit. Ca urmare, acceptarea noilor tehnologii în rândul forței de muncă și satisfacția angajaților este în scădere. Prin urmare, managementul schimbării trebuie să fie utilizat pentru dezvoltarea competențelor și calificarea angajaților din companii.

Pe lângă riscurile tehnice și organizaționale, trebuie luate în considerare și riscurile economice. Mai multe provocări trebuie luate în considerare. Primul obstacol este lipsa disponibilității de a investi. Investițiile în mediul Industry 4.0 sunt în prezent destul de scăzute. Cea mai mare problemă este lipsa de transparență a valorii adăugate economice. Deja astăzi, industria mecanică și de inginerie a instalațiilor trebuie să ia în considerare ce cerințe vor trebui să îndeplinească produsele în viitor. Studiile arată o investiție anuală de 40 miliarde de euro în aplicații pentru Industria 4.0 în Germania.

### **2.5.3. Limitele stadiului actual de implementare a Industriei 4.0**

Deși prezintă numeroase oportunități, dar și riscuri, implementarea pilonilor Industriei 4.0 comportă o serie de limite. Acestea constau în:

- lipsa unor strategii de digitalizare;
- lipsa sau nivelul scăzut de standardizare uniformă a soluțiilor tehnice existente la nivelul utilizatorilor din piață;
- lipsa unei legislații coerente și uniform acceptată la nivel european / global;
- securitatea datelor reprezintă unul dintre cei mai mari contribuitori la (ne)încrederea utilizatorilor raportat la nevoia investițională și profiturile estimate;
- lipsa sau nivelul scăzut de conștientizare și cunoaștere a existenței unor soluții tehnice moderne (high-tech) de creștere a capacităților de fabricație într-un mediu descentralizat și controlat;
- lipsa sau capacitatea financiară redusă de finanțare a implementării pilonilor Industriei 4.0;



- disponibilitatea redusă sau inexistentă de a testa beneficiile pilonilor Industriei 4.0 în zone pilot (de încercare) la sediul companiilor sau într-un cadru extern pus la dispoziție de investitori;
- numărul limitat de personal înalt calificat existent pe piața muncii pentru implementarea caracteristicilor asociate Industriei 4.0;
- rezistența la schimbare, la cote ridicate, din partea personalului companiilor – din prisma temerilor legate de pierderea locurilor de muncă.

## **2.6. Sinteza capitolului**

În raport cu obiectivul principal al lucrării și în concordanță cu metodologia de cercetare adoptată, în acest capitol s-a urmărit identificarea obiectivelor realizabile, studierea modelelor de referință și de impact, identificarea unui set preliminar de criterii de succes și criterii de măsurare a succesului raportat la care să se evalueze rezultatele cercetării, identificarea factorilor care contribuie la riscul obținerii succesului, dezvoltarea de sprijin pentru factorii cu cea mai mare influență asupra succesului, trasarea unei direcții de evaluare a efectelor sprijinului în raport cu obiectivele cercetării.

În urma studierii literaturii de specialitate referitoare la fabricație, în contextul celei de-a patra revoluții industriale, au fost identificate caracteristicile acesteia, paradigmele și modelele actuale, provocările, oportunitățile, riscurile și limitele stadiului actual de implementare a Industriei 4.0.

În continuare, lucrarea se va axa pe dezvoltarea sistemelor de fabricație pentru Industria 4.0, cu precădere a sistemelor inteligente și a celor reconfigurabile, adaptate la producția personalizată și individualizată în masă.

## **3. DEZVOLTAREA SISTEMELOR DE FABRICAȚIE**

### **3.1. Obiectivul capitolului**

Prezentul capitol corespunde celei de-a doua etape a DRM, **Studiul descriptiv I (DS-I)**, în care se urmărește obținerea unei înțelegeri mai bune a situației existente prin identificarea și clarificarea în detaliu a factorilor care influențează criteriile preliminare, finalizarea modelului de referință incluzând criteriile de succes și criteriile de măsurare a succesului, sugerarea de factori (posibili factori cheie) care ar putea conduce la o îmbunătățire a situației existente, oferirea unei baze pentru dezvoltarea eficientă a sprijinului, care se adresează acelor factori cu cea mai puternică influență asupra succesului și care pot fi evaluați în raport cu criteriile, furnizarea de detalii care pot fi utilizate pentru a evalua efectele dezvoltării de sprijin în etapa DS-II.

**Obiectivul operațional (OP2)** constă în cunoașterea în profunzime a sistemelor de fabricație inteligente și oferirea unei baze pentru dezvoltarea eficientă a acestora, în contextul Industriei 4.0.

### **3.2. Dezvoltarea sistemelor de fabricație inteligente**

#### **3.2.1. Cadrul conceptual al sistemelor de fabricație inteligente pentru Industria 4.0**

Competitivitatea unui producător depinde de capacitățile sale în ceea ce privește costul, livrarea, flexibilitatea și calitatea. Sistemele de fabricație inteligente (*Smart Manufacturing Systems*, SMS) încearcă să maximizeze aceste capacități prin utilizarea tehnologiilor avansate care promovează fluxul rapid și utilizarea pe scară largă a informațiilor digitale în și între sistemele de fabricație (Lu ș.a., 2016). SMS generează câștiguri în agilitatea, calitatea și eficiența fabricației, îmbunătățind competitivitatea pe termen lung, folosind tehnologiile informaționale și de comunicare (TIC) împreună cu aplicații software inteligente.

Realizarea capabilităților SMS necesită înlocuirea paradigmei arhitecturale clasice a sistemului de fabricație, bazată pe un model de control ierarhic, cu o nouă paradigmă bazată pe servicii de fabricație distribuite, care constituie sistemul de producție ciber-fizic (*Cyber-Physical Production Systems*, CPPS). Sistemele de producție ciber-fizice (CPPS) sunt o materializare a conceptului general de sisteme ciber-fizice (CPS) în mediul de fabricație. Interconectarea și interoperabilitatea entităților CPS în atelierelor de fabricație, împreună cu metodologia de analiză și învățare a cunoștințelor, oferă un sistem inteligent de sprijinire a deciziilor (Zheng ș.a., 2018).

Schimbarea de paradigmă este posibilă prin introducerea dispozitivelor inteligente accesibile ca servicii într-o rețea, inteligență încorporată la fiecare nivel, analiză predictivă pentru controlul receptiv și tehnologia cloud pentru virtualizarea funcțiilor de control și inginerie la toate nivelurile ierarhice. Cu aceste capabilități în vigoare este posibilă automatizarea pe scară largă la niveluri ierarhice folosind noi abordări de control.

Figura 3.1 prezintă cadrul conceptual al sistemelor de fabricație inteligente în Industria 4.0 (Zheng ș.a., 2018).

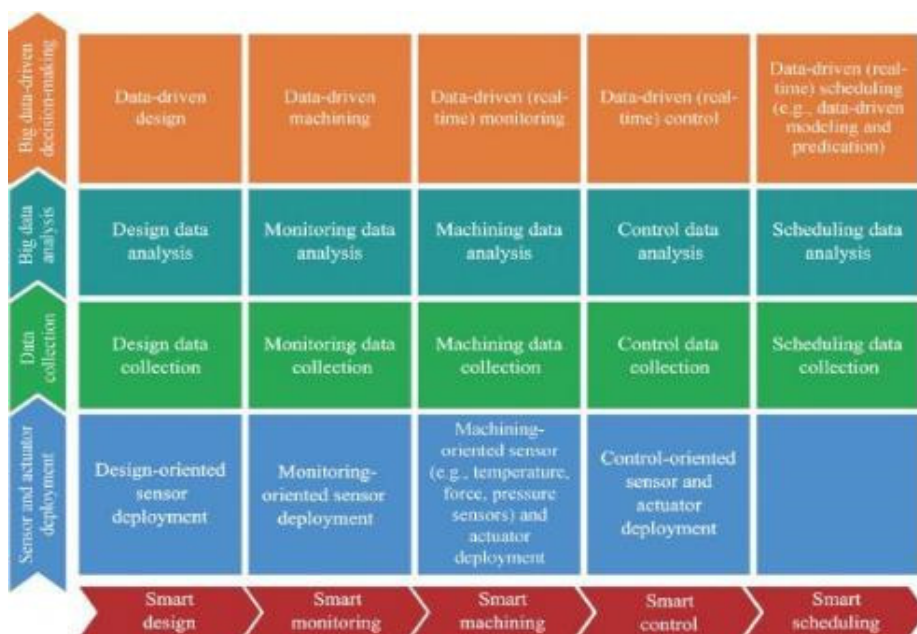


Fig. 3.1. Cadrul conceptual al sistemelor de fabricație inteligente (Zheng ș.a., 2018)

Axa orizontală prezintă aspecte din Industria 4.0: concepția inteligentă, monitorizarea inteligentă, prelucrarea inteligentă, controlul inteligent, programarea inteligentă.

Axa verticală prezintă alte aspecte ale Industriei 4.0: implementarea senzorilor și a actuatorilor colectarea datelor, analiza datelor și luarea deciziilor. Colectarea și analiza datelor sunt principalele surse ale activității inteligente prezentate pe axa orizontală.

### *3.2.1.1. Concepția inteligentă*

Concepția tradițională a fost modernizată și a devenit inteligentă datorită dezvoltării rapide a noilor tehnologii, cum ar fi realitatea virtuală (VR) și realitatea augmentată (AR). Prototipurile hibride folosind tehnici VR au fost introduse în fabricația aditivă (AM). Concepția software, cum ar fi proiectarea asistată de calculator (CAD) și fabricația asistată de calculator (CAM) pot interacționa acum cu sistemele prototipului fizic inteligent în timp real, prin imprimarea 3D integrată cu CPS și AR. Astfel, schimbările ingineresti și realizările fizice ar putea fi combinate pentru a obține o paradigmă de concepție inteligentă.

Concepția inteligentă personalizată este bazată pe experiența utilizatorului (UX). ISO 9241-210 definește UX ca „percepțiile și răspunsurile unei persoane care rezultă din utilizarea și/sau utilizarea anticipată a unui produs, sistem sau serviciu”. În mediul Industriei 4.0, cele două tendințe tipice emergente în etapa de dezvoltare a produsului sunt:

- clienții se implică activ în procesul de concepție a produsului pentru a crea produse personalizate cu design îmbunătățit, care este cunoscută sub numele de paradigma de fabricație a personalizării în masă;
- produsele devin inteligente și capabile să comunice cu alte lucruri în ciclul lor de viață, ca definite în IoT.

Ambele aspecte vizează îmbunătățirea UX în timpul etapei de dezvoltare a produsului.

Cadrul conceptual al modelului de co-creație propus este prezentat în figura 3.2.

Acesta este format din straturi fizice, cibernetice și UX. Stratul fizic reprezintă produse fizice (de exemplu, bandă pentru încheietura mâinii) și servicii (de exemplu, abonament de aplicații), stratul cibernetic reprezintă resurse de co-

concepție virtuală bazate pe web (de exemplu, modele CAD și sisteme de configurare produs), iar stratul UX reprezintă comportamentele cognitive și afective ale utilizatorilor (de exemplu, feedback și emoții) în timpul dezvoltării produsului.

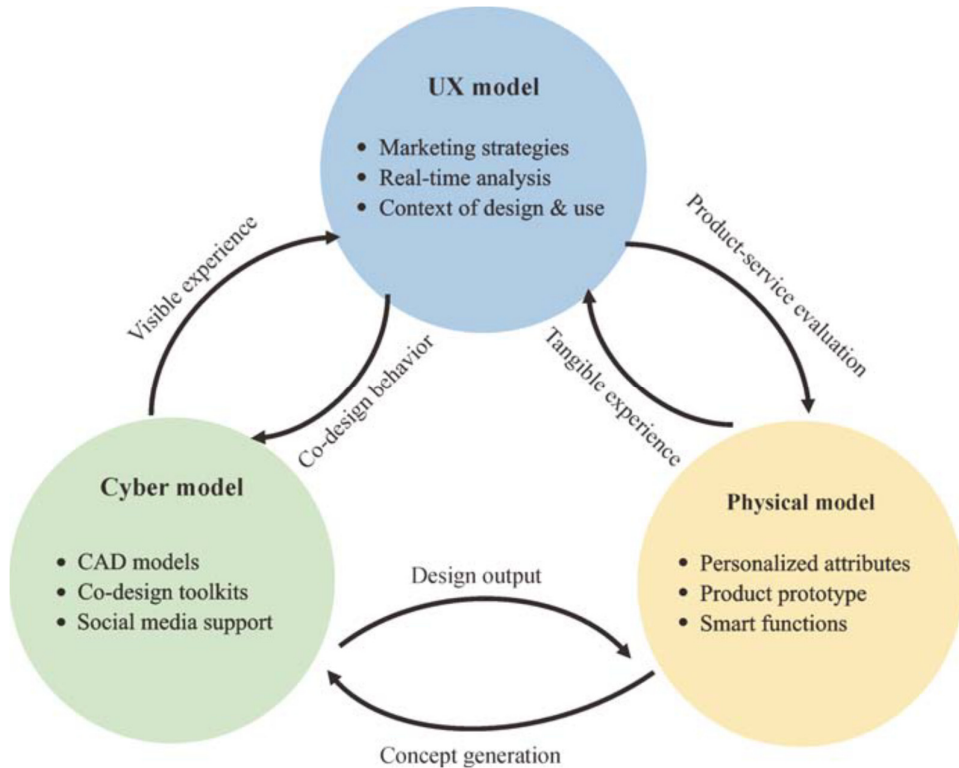


Fig. 3.2. Cadrul conceptual al procesului de dezvoltare a produsului (Zheng ș.a., 2018)

Concepția inteligentă adoptă metode de concepție de ultimă generație (design adaptabil și *Design Thinking*) pentru a ghida procesul de design conceptual interactiv a utilizatorului. Un sistem de configurare produs cu o interfață grafică cu utilizatorul este de asemenea dezvoltat pentru a permite procesul de co-creare. Pentru a prototipa piesele personalizate, scanerile 3D sunt utilizate pentru a capta caracteristicile specifice ale unui utilizator, iar parametrii geometrici sunt optimizați în aplicația software CAD pentru imprimarea 3D ulterioară. O platformă inteligentă pentru senzori este implementată în produsul prototip pentru a-și testa funcțiile inteligente, cu aplicații pe dispozitive mobile inteligente. Datele senzorilor sunt apoi introduse într-o platformă IoT pentru

analiza ulterioară a datelor și urmărirea stării produsului (de exemplu, locația și timpul de utilizare). UX este capturat în timpul etapelor de dezvoltare a produsului și de testare a prototipurilor.

### 3.2.1.2. Prelucrarea inteligentă

Prelucrarea inteligentă necesită mașini-unelte inteligente compatibile cu sistemele ciber-fizice (*Cyber-Physical Systems*, CPS), fiind folosite pentru a realiza produse fizice. În Industria 4.0, sistemele de fabricație ciber-fizice (*Cyber-Physical Production Systems*, CPPS) cuprind mașini inteligente, sisteme de depozitare și de fabricație digitale, care oferă integrare bazată pe IoT. Aceste sisteme de fabricație complet integrate și colaborative răspund în timp real cerințelor și condițiilor de aprovizionare și fabricare, pentru a satisface nevoile variate ale producției de masă personalizată și individualizată. Mașini-unelte inteligente pot fi constituite ca și combinații de diferite CPS (fig. 3.3).

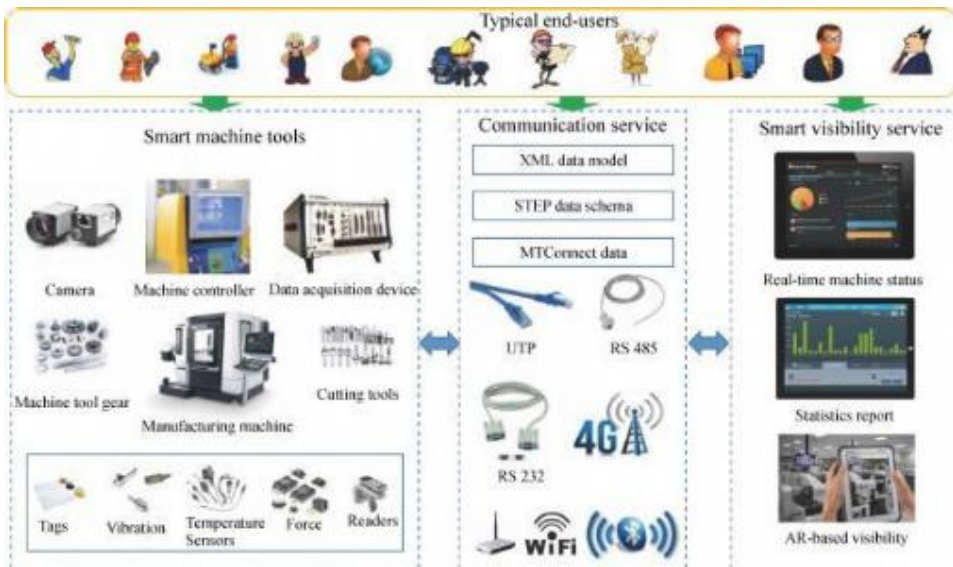


Fig. 3.3. Mașini-unelte inteligente compatibile cu CPS (Zheng ș.a., 2018)

Serviciul de comunicare se ocupă cu integrarea, comunicarea și gestionarea datelor de prelucrare în timp real colectate de la mașini-unelte inteligente. În plus, după colectarea tuturor datelor, un geamăn digital pentru

fiecare componentă critică trebuie să fie modelat pentru a reprezenta simultan atributele sale fizice și starea în timp real.

Serviciul de vizibilitate inteligentă este o aplicație care profită de datele în timp real furnizate de serviciul de comunicare. Având în vedere disponibilitatea datelor în timp real de pe internet, starea în timp real a fiecărei componente critice a mașinilor-unelte inteligente poate fi vizualizată de la distanță de pe dispozitivele mobile, cum ar fi tabletele și smartphone-urile. Rapoartele statistice privind starea mașinilor-unelte pot fi accesate direct de sistemele de gestionare a afacerilor, cum ar fi planificarea resurselor întreprinderii (ERP). Datele istorice detaliate ar fi disponibile dacă fiecare componentă critică este salvată în cloud și la nivel local, prin înregistrarea datelor în timp real furnizate de serviciul de comunicații. Combinarea tehnologiei AR cu datele de fabricație în timp real colectate în timpul proceselor de prelucrare va permite interacțiuni intuitive și eficiente între utilizatori și mașini-unelte inteligente.

### 3.2.1.3. Monitorizarea inteligentă

Monitorizarea inteligentă este un aspect important în operarea, întreținerea și programarea optimă a sistemelor de fabricație. Implementarea pe scară largă a diferiților senzori a făcut posibilă monitorizarea inteligentă. Monitorizarea inteligentă oferă nu numai o vizualizare grafică a acestor date, ci și alerte atunci când apar anomalii la mașini-unelte.

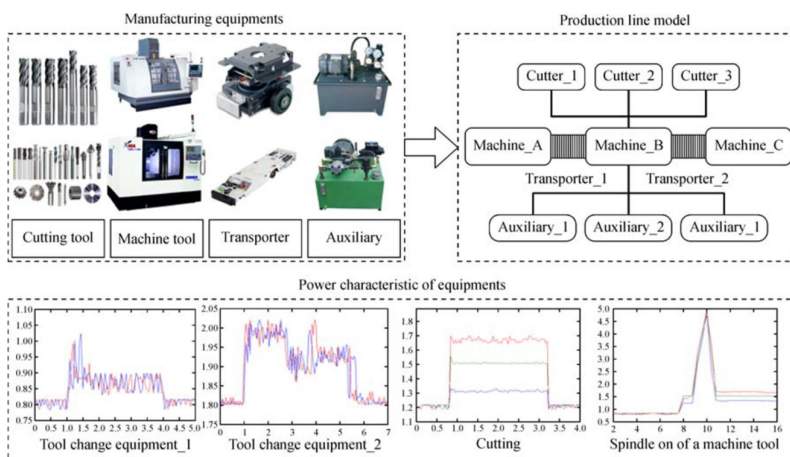


Fig. 3.4. Fabricație eficientă din punct de vedere energetic (Zheng ș.a., 2018)

Monitorizarea consumului de energie este o preocupare a multor întreprinderi industriale. Un atelier de prelucrare conține multe echipamente de prelucrare (mașini-unelte), așa cum se arată în figura 3.4. Axa X reprezintă timpul, iar axa Y reprezintă consumul de putere. În prezent, prețurile la energie au crescut, iar protecția mediului este o preocupare majoră a multor țări. Datorită utilizării pe scară largă a diferiților senzori, datele privind consumul de energie pot fi colectate în Industria 4.0.

#### **3.2.1.4. Controlul inteligent**

Controlul inteligent presupune funcționarea independentă a sistemelor de control ale componentelor CPPS și poate fi bazat pe cloud (*Control System as a Service*, CSaaS). Controlul inteligent este executat în principal pentru a gestiona fizic diverse mașini sau instrumente inteligente prin intermediul unei platforme bazate pe cloud. Utilizatorii finali pot opri o mașină sau un robot prin intermediul smartphone-urilor lor. Deciziile pot fi apoi reluate în timp util în unitățile de fabricație din prima linie, cum ar fi liniile de asamblare bazate pe roboți sau mașini inteligente.

Sistemele clasice de măsurare și control sunt înlocuite cu inspecția automată a calității direct la linia de fabricație folosind scanarea laser 3D, care permite compararea piesei/produsului cu proiectul său.

Un sistem de control inteligent bazat pe cloud este ilustrat în figura 3.5.

Controlul CNC este folosit ca exemplu pentru a ilustra conceptele cheie. Toate activitățile în timp nereal sunt executate în cloud. Lucrările de prelucrare sunt programate și distribuite între mașini-unelte conectate, având în vedere capacitatea și disponibilitatea acestora, care sunt tratate ca resurse locale de fabricație. Un operator local poate începe prelucrarea prin înregistrarea unui program de piese. Cloud-ul poate interpreta programul piesei fie în codul G/M, fie în STEP-NC. Dacă este un program parte STEP-NC, cloud-ul va genera o cale de instrument din programul parte STEP-NC. În timpul procesului de generare a căii de instrumente, a sarcinilor offline de optimizare, precum optimizarea selecției și re-secvențierii sculei, a etapelor de lucru și a parametrului de așchiere, pot fi efectuate cu ajutorul unei baze de cunoștințe sau al altor servicii de optimizare.



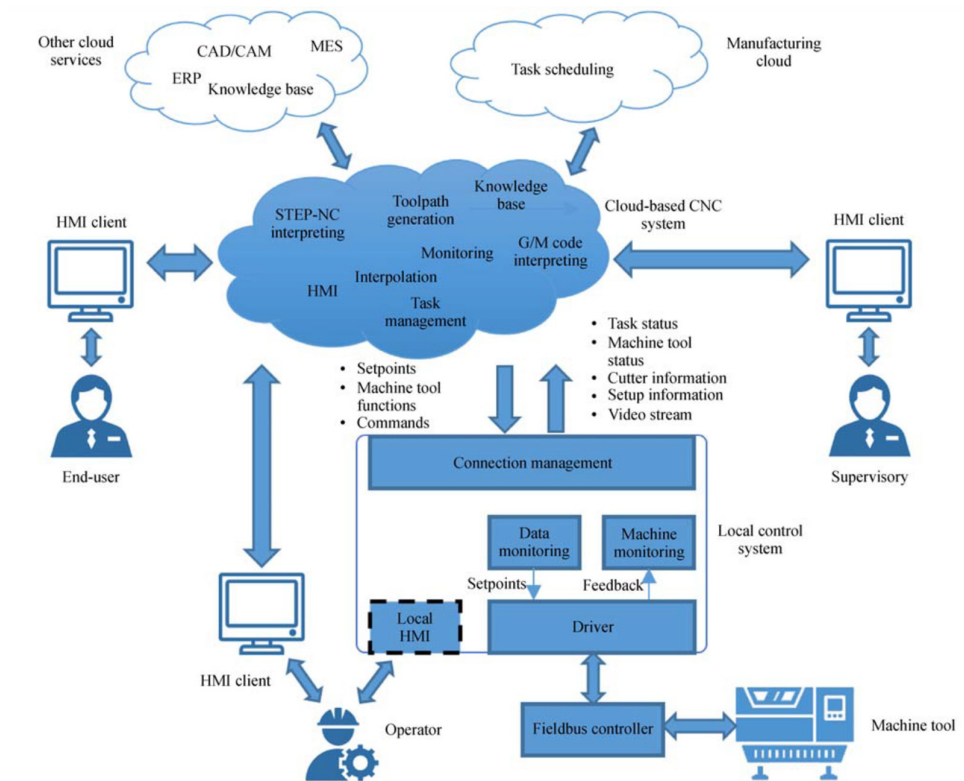


Fig. 3.5. Sistem de control inteligent bazat pe cloud (Zheng ș.a., 2018)

În sistemul local de control, gestionarea conexiunii se ocupă de gestionarea conexiunii la internet dintre cloud și local. Monitorizarea datelor este responsabilă pentru observarea datelor primite și pentru a face față oricăror erori de transmitere. Prin combinarea informării de la alți senzori, modulul de monitorizare a mașinii asigură starea prelucrării și a mașinii-unelte. Deși sistemul de interfață om-mașină (*Human Machine Interface*, HMI) este furnizat de cloud, în sistemul local de control, un simplu HMI afișează în continuare informații de bază pentru ca operatorul să controleze mașina-unealtă în cazul în care serviciul cloud nu este disponibil.

Informațiile de la o mașină-unealtă, inclusiv pozițiile axei curente, configurarea și starea procesului de așchiere sunt transmise în cloud pentru a fi utilizate atunci când sunt generate traiectoriile sculelor. Progresul sarcinilor de prelucrare și starea mașinii-unelte (de exemplu, starea funcționării și informarea de avertizare) sunt transmise în cloud de către sistemul local de control.

### 3.2.1.5. Programarea inteligentă

Programarea inteligentă a CPPS poate fi realizată pe baza mașinilor inteligente, a monitorizării inteligente și a sistemului de control inteligent, folosind metode de programare eficiente, dinamice și descentralizate. Modelele și algoritmi de programare interacționează cu mașinile fizice și conduc producția în mod cooperant.

Programarea mașinilor este o problemă clasică, care a fost studiată de zeci de ani, iar în Industria 4.0 există o serie de caracteristici și cerințe noi (fig. 3.6).

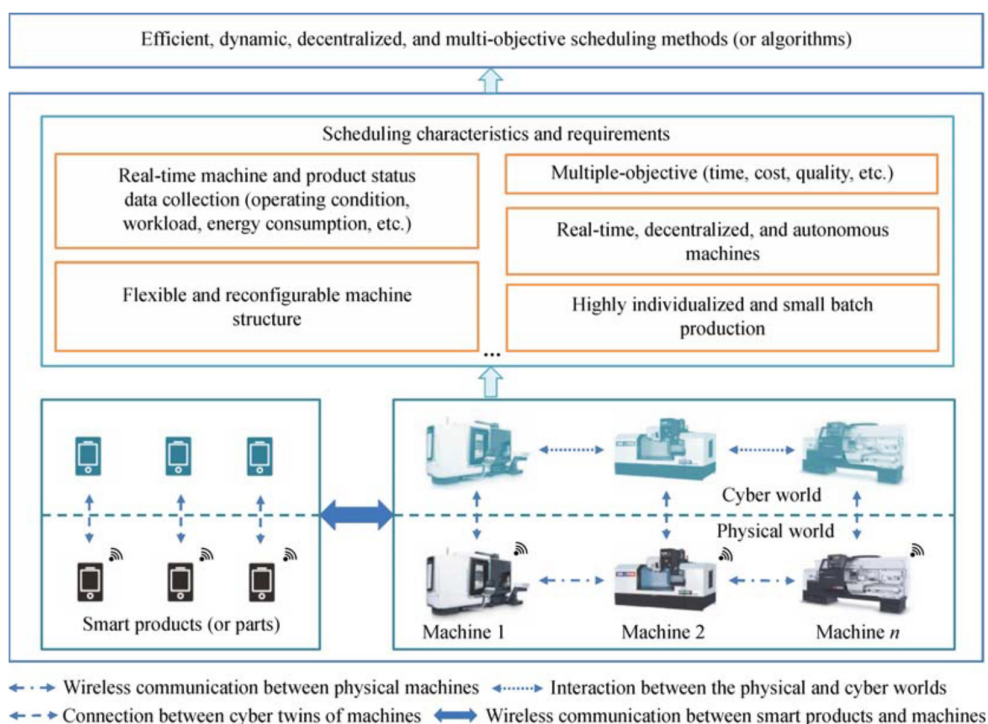


Fig. 3.6. Programarea mașinilor în Industria 4.0 (Zheng ș.a., 2018)

Mașinile din Industria 4.0 sunt dotate cu un anumit grad de inteligență și pot comunica între ele prin implementarea diferiților senzori și dispozitive de comunicare fără fir (de exemplu, RFID). În acest caz, mașinile sunt, într-o mare măsură, transparente, în sensul că datele fiecărei părți a unei mașini pot fi colectate convenabil în timp real. Programarea optimă a utilajului poate fi efectuată prin extragerea de informații utile (cum ar fi starea de funcționare și

consumul de energie) din datele colectate. Această situație prezintă multe avantaje și elimină mai multe bariere în ceea ce privește programarea mașinilor. O altă diferență principală între programarea mașinilor în Industria 4.0 și programarea tradițională a mașinilor este faptul că produsele (sau piesele) sunt inteligente și pot comunica cu mașinile, ceea ce aduce noi avantaje și provocări.

În mediul de fabricație al Industriei 4.0, fiecare mașină este o entitate CPS care poate comunica cu alții în lumi fizice și virtuale. Esența programării mașinilor în Industria 4.0 este programarea CPS colaborative. Complexitatea programării mașinilor în Industria 4.0 provine din caracteristicile tipice ale CPS, cum ar fi autonomia și descentralizarea în timp real. Ca urmare, programarea mașinilor în Industria 4.0 necesită metode de programare eficiente, dinamice și descentralizate. De fapt, programarea mașinilor în Industria 4.0 poate fi bine susținută prin îmbunătățirea unei mașini într-un CPS cu o percepție cuprinzătoare. Inteligența artificială, cum ar fi sistemele multi-agent, oferă un instrument eficient pentru programarea mașinilor într-o fabrică inteligentă. În sistemele de fabricație din Industria 4.0, modelele de planificare și algoritmi sunt implementate în spațiul cibernetic al CPS (cloud), interacționează cu mașinile fizice și conduc în mod cooperativ producția.

### **3.2.2. Fabricația inteligentă bazată pe date**

Progresele în tehnologia internetului, internetul lucrurilor (IoT), cloud computing (CC), big data (BD) și inteligența artificială (AI) au afectat profund fabricația. Volumul datelor colectate este în creștere. BD oferă o oportunitate extraordinară în transformarea paradigmei de fabricație de astăzi în fabricație inteligentă. BD permit companiilor să adopte strategii bazate pe date pentru a deveni mai competitive. Fabricația inteligentă urmărește să transforme datele dobândite de-a lungul ciclului de viață al produsului în inteligență pentru a avea un impact pozitiv asupra tuturor aspectelor fabricației (Tao ș.a., 2018-2).

#### **3.2.2.1. Tipuri de date**

În general, datele mari generate de procesele de fabricație pot fi clasificate în următoarele categorii:

**Date de management** colectate din sistemele informaționale de producție (MES, ERP, CRM, SCM și PDM). Sistemele de informații posedă o varietate de date care sunt legate de planificarea produselor, expedierea comenzilor,

managementul materialelor, planificarea producției, întreținerea, gestionarea stocurilor, vânzările și marketingul, distribuția, serviciul pentru clienți și managementul financiar.

**Datele echipamentelor** colectate din fabricile inteligente de tehnologiile *Industrial Internet of Things* (IIoT), care includ date legate de performanța în timp real, condițiile de funcționare și istoricul de întreținere al echipamentelor de fabricație.

**Datele utilizatorilor** colectate din surse de internet, cum ar fi platformele de comerț electronic (Amazon) și platformele de rețele sociale (Twitter, Facebook, LinkedIn). Acest tip de date cuprind datele demografice ale utilizatorilor, profilurile utilizatorilor, preferințele utilizatorilor față de produse/servicii, precum și comportamentul utilizatorului (date despre navigarea online, căutarea, achizițiile și istoricul revizuirii).

**Date despre produse** colectate de la produse inteligente și sisteme de produse-servicii de tehnologiile IoT, inclusiv performanța produsului, contextul de utilizare (ora, locația și vremea), datele de mediu (temperatura, umiditatea și calitatea aerului) și datele biologice ale utilizatorului .

**Date publice** colectate de la guverne prin baze de date deschise. Astfel de seturi de date se ocupă de date legate de proprietatea intelectuală, infrastructura civică, dezvoltarea științifică, protecția mediului și îngrijirea sănătății. Pentru producători, datele publice pot fi folosite pentru a garanta că procesele de fabricație și produsele fabricate respectă strict reglementările guvernamentale și standardele din industrie.

În producție, analiza eficientă a datelor mari le permite producătorilor să-și aprofundeze înțelegerea despre clienți, concurenți, produse, echipamente, procese, servicii, angajați, furnizori și autorități de reglementare. Prin urmare, BD pot ajuta producătorii să ia decizii mai raționale, receptive și mai informate și să-și sporească competitivitatea pe piața globală.

### ***3.2.2.2. Ciclul de viață al datelor de fabricație***

Datele sunt un factor cheie pentru fabricația inteligentă. Cu toate acestea, datele nu sunt utile decât dacă sunt „traduse” în conținut și context de informații concrete care pot fi înțelese direct de utilizatori. În general, înainte de a obține informații concrete din date, datele trebuie să treacă prin mai mulți pași: colectare, transmitere, stocare, pre-procesare, filtrare, analiză, extragere,

vizualizare și aplicare. Un ciclu de viață tipic al datelor de fabricație este ilustrat în figura 3.7.

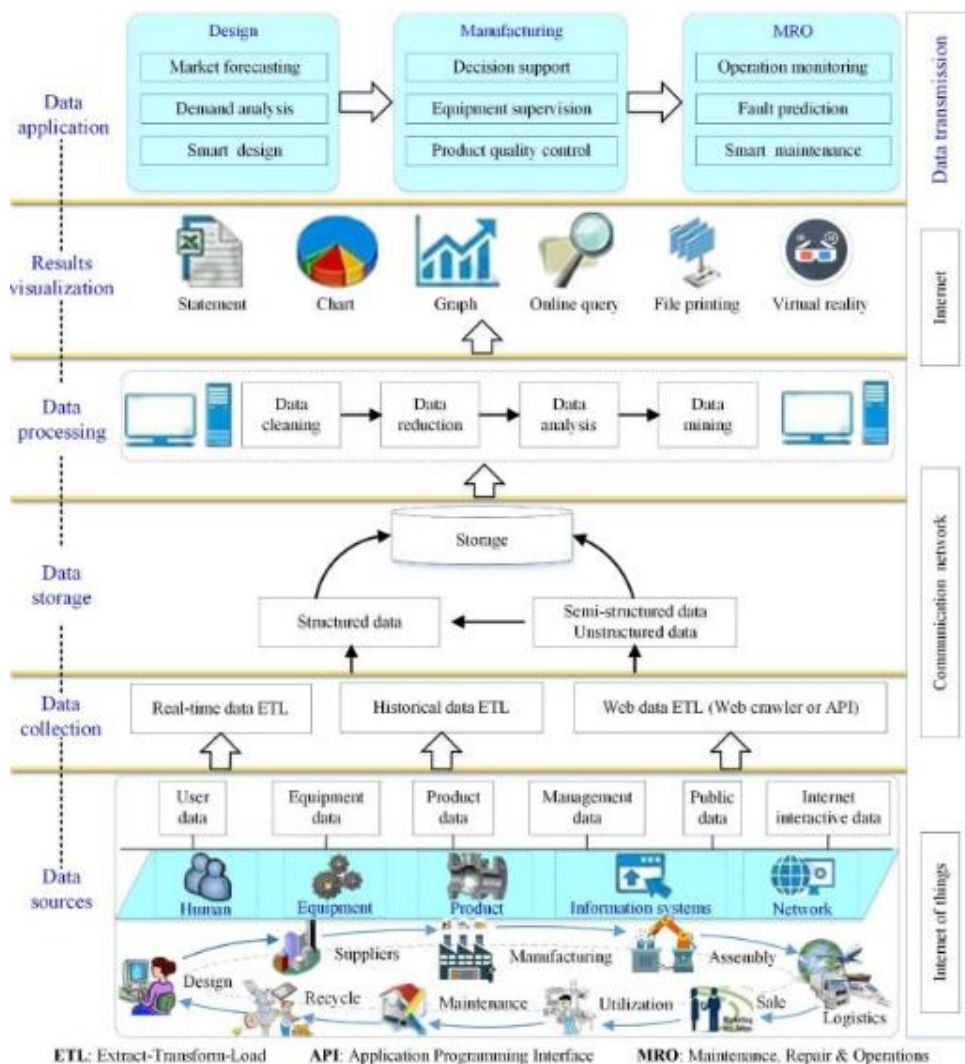


Fig. 3.7. Ciclul de viață al datelor de fabricație (Tao ș.a., 2018-2)

Datele de fabricație provin din diferite surse: echipamente, produse, operatori umani, sisteme de informații și rețele.

Datele din diferite surse sunt colectate într-o varietate de moduri. Mai presus de toate, sunt colectate prin intermediul IoT, prin care datele despre echipamente și produse pot fi colectate instantaneu prin senzori inteligenți, RFID (identificare prin radiofrecvență) și alte dispozitive de detectare, făcând posibilă monitorizarea echipamentelor.

Volumul mare de date colectate din procesele de fabricație trebuie să fie stocat în siguranță și integrat în mod eficient. În general, diferitele tipuri de date de fabricație pot fi clasificate în: date structurate (cifre, simboluri, tabele etc.), date semi-structurate (arbori, grafice, documente XML etc.) și date nestructurate (jurnale, audio, videoclipuri, imagini etc.). În mod tradițional, întreprinderile de producție s-au concentrat în mare măsură pe stocarea de date structurate, deoarece e dificil să gestioneze direct datele nestructurate în bazele de date ale întreprinderii. Arhitectura de stocare bazată pe obiecte permite ca, colecțiile de date să fie stocate și gestionate ca obiecte. Aceasta oferă o soluție mai flexibilă pentru integrarea datelor semi-structurate și nestructurate. De asemenea, prin cloud computing, stocarea datelor poate fi realizată într-un mod extrem de rentabil, eficient din punct de vedere energetic și flexibil.

Prelucrarea datelor se referă la o serie de operațiuni efectuate pentru a descoperi cunoștințe dintr-un volum mare de date. Datele trebuie convertite în informații și cunoștințe pentru ca producătorii să ia decizii informate și raționale. În plus, datele trebuie să fie preprocesate cu atenție pentru a elimina informațiile redundante, înșelătoare, duplicate și inconsecvente. Reducerea datelor este procesul de transformare a volumului masiv de date în forme ordonate, semnificative. După reducerea datelor, datele curățate și simplificate sunt exploatate prin analiza datelor și extragerea datelor pentru a genera noi informații.

Vizualizarea este menită să transmită și să comunice în mod clar informații prin mijloace grafice, permițând utilizatorilor finali să înțeleagă datele într-un mod mult mai explicit. Datele în timp real pot fi vizualizate online prin intermediul terminalelor inteligente ale utilizatorilor.

Transmiterea datelor joacă un rol esențial în menținerea comunicațiilor și interacțiunilor între sistemele și resursele de fabricație distribuite. Progresele recente în IoT, Internet și rețele de comunicații au consolidat în mod substanțial fundamentul tehnologic al transmiterii în timp real, fiabile și sigure a diferitelor tipuri de date.

Aplicațiile de date au intrat aproape în toate aspectele fabricației și operațiunilor zilnice în întreprinderile de producție. În primul rând, în timpul fazei de concepție, prin analiza datelor, sunt dezvoltate noi perspective despre clienți, concurenți și piețe. Pe baza înțelegerii dezvoltate prin analiza datelor, concepătorii pot traduce cu acuratețe și rapid „vocile clienților” în caracteristicile produsului și cerințele de calitate, folosind metoda QFD (*Quality Function Deployment*). În al doilea rând, în timpul fabricației, procesul de fabricație și echipamentele sunt monitorizate și urmărite în timp real. Datele pot facilita controlul și îmbunătățirea calității produsului.

### ***3.2.2.3. Cadrul de fabricație inteligentă bazată pe date***

Datele de fabricație sunt colectate, stocate, procesate și analizate prin intermediul tehnologiilor de date mari. Drept urmare, gradul de inteligență în fabricație poate fi crescut semnificativ.

Așa cum se arată în figura 3.8, cadrul de fabricație inteligentă bazat pe date constă din patru module, și anume: modulul de fabricație, modulul de driver de date, modulul de monitorizare în timp real și modulul de procesare a problemelor.

**Modulul de fabricație** găzduiește diferite tipuri de activități de fabricație. Constă dintr-o varietate de sisteme informaționale și resurse de fabricație care pot fi rezumate ca om-mașină-material-mediu. Intrările pentru acest modul sunt materiile prime, în timp ce ieșirile sunt produsele finite. În timpul procesului de transformare input-output, diverse date sunt colectate de la operatori umani, echipamente de fabricație, sisteme informatice și rețele industriale.

**Modulul de driver de date** oferă forța motrice pentru fabricația inteligentă în diferitele etape ale ciclului de viață a datelor de fabricație. Ca intrări, datele din modulul de fabricație sunt transmise la centrele de date bazate pe cloud, pentru a fi analizate în continuare. Ulterior, informațiile explicite și recomandările acționabile exploatate din diferite tipuri de date brute sunt utilizate pentru a direcționa acțiunile (concepția produsului, planificarea producției și execuția) în modulul de fabricație. Modulul de monitorizare în timp real și modulul de procesare a problemelor sunt, de asemenea, alimentate de modulul driver de date.

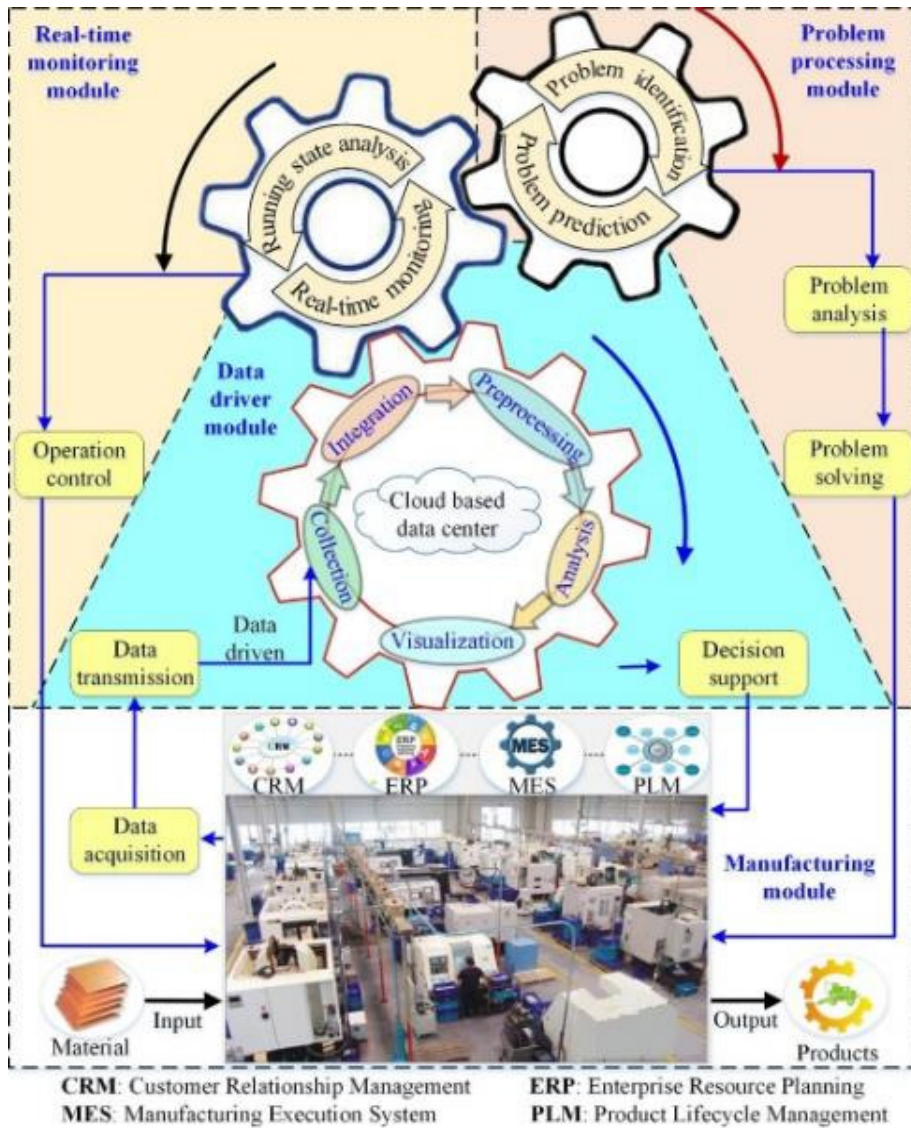


Fig. 3.8. Cadrul de fabricație inteligentă bazată pe date (Tao ș.a., 2018-2)

**Modulul de monitorizare în timp real** joacă un rol în monitorizarea procesului de fabricație în timp real, pentru a asigura calitatea produsului. Conducătorul acestui modul este activat pentru a analiza starea de funcționare în timp real a unităților de producție. Ca urmare, producătorii pot fi



la curent cu schimbările din procesul de fabricație, astfel încât să dezvolte strategiile optime de control operațional. De exemplu, când o mașină este în gol, materialul este distribuit și este urmărită traiectoria. Procesul de fabricație poate fi ajustat în funcție de defectele specifice ale calității produsului. Ca rezultat, modulul de monitorizare în timp real poate face ca instalațiile de fabricație să funcționeze mai eficient.

**Modulul de procesare a problemelor** funcționează pentru a identifica și prezice problemele emergente (defecțiuni ale echipamentelor sau defecte de calitate), pentru a diagnostica cauzele principale, a recomanda soluții posibile, a estima eficiența soluției și a evalua impactul potențial asupra altor activități de fabricație. Pe baza informațiilor în timp real și a analizei datelor istorice și în curs de desfășurare furnizate de modulul de driver de date, fie operatorii umani, fie aplicațiile de inteligență artificială pot lua decizii informate, nu numai pentru a aborda problemele actuale, ci și pentru a preveni apariția unor probleme similare în viitor. Întreținerea proactivă activată de acest modul va îmbunătăți buna funcționare a proceselor de fabricație.

Cele mai recente cercetări arată că geamănul digital (*Digital Twin*, DT) poate spori personalizarea inteligență bazată pe date în contextul fabricației inteligente, definind un nou cadru al acesteia (Wang ș.a., 2021). Cadrul integrat este prezentat în figura 3.9.

Geamănul digital extinde sursele de date în spațiul virtual, ceea ce va îmbunătăți semnificativ capacitățile de personalizare în ceea ce privește calitatea și fiabilitatea. Modulul de personalizare inteligentă implică sisteme de fabricație, produse personalizate și medii de utilizator. Sistemele de fabricație și mediile de utilizator interacționează cu produsul personalizat pe tot parcursul ciclului de viață al produsului, de la etapa de concepție până la etapa de utilizare. Tehnologia IoT permite sistemelor de fabricație să monitorizeze continuu procesul de fabricație, astfel încât planurile și parametrii de fabricație să poată fi ajustați în timp util pentru a maximiza eficiența echipamentului. În plus, produsul personalizat se poate adapta la comportamentele în schimbare ale clienților prin interacțiunea cu mediile utilizatorilor. Prin monitorizarea mediului natural (temperatura, umiditatea, viteza vântului, vremea etc.), mediul social (relațiile sociale, cultura etc.), condițiile de funcționare a produsului (frecvența de utilizare, durata de utilizare estimată, fiabilitatea produsului etc.) și contextele utilizatorului (profiluri de utilizator, comportamente ale utilizatorilor etc.), produsele se pot actualiza pentru a satisface nevoile dinamice ale clienților.

Datele în timp real colectate din mediile utilizatorilor îi pot ajuta pe concepatori să exploreze mai multe oportunități de a oferi funcții sau servicii personalizate. În modulul de personalizare inteligentă, datele extraordinare generate de produsul fizic, sistemele de fabricație și mediile fizice vor fi încărcate în spațiul virtual pentru a sprijini construcția modulului digital gemăn.

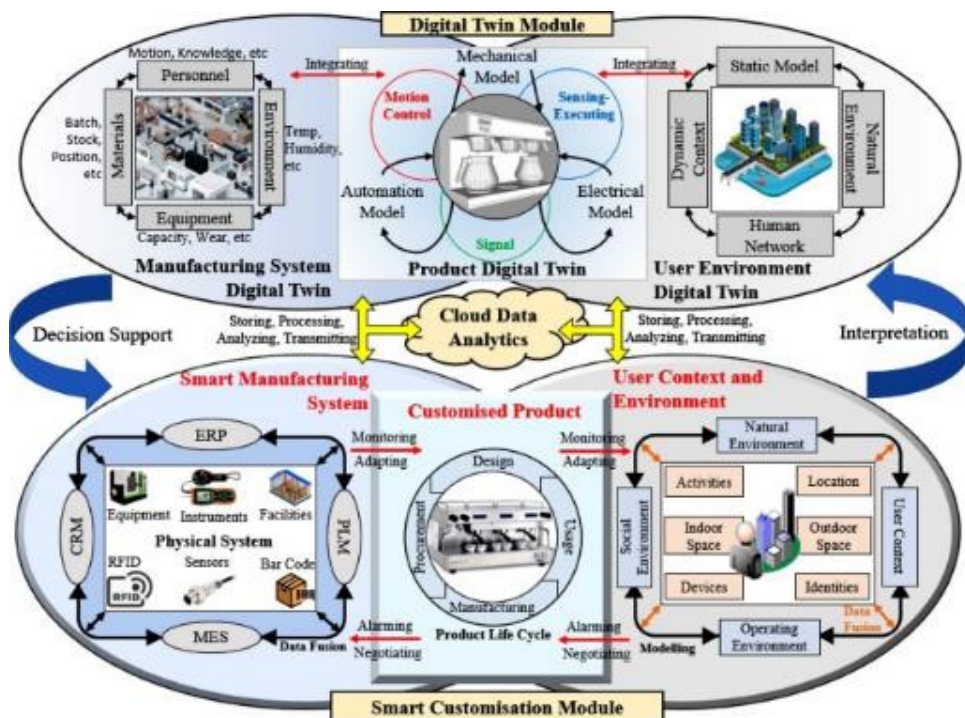


Fig. 3.9. Cadrul de personalizare inteligentă bazată pe date și *Digital Twin* (Wang ș.a., 2021)

Există trei gemeni digitali implicați în procesele de personalizare inteligentă, inclusiv gemănul digital al produsului, gemănul digital al sistemului de fabricație și gemănul digital al mediului de utilizator. Gemănul digital al sistemului de fabricație reflectă cu adevărat condițiile de funcționare și utilizarea resurselor din atelier și lanțul de aprovizionare, ajutând producătorii să identifice resursele disponibile, să optimizeze procesele de fabricație și să îmbunătățească coordonarea lanțului de aprovizionare în mod autonom. Gemănul digital al sistemului de fabricație poate prezice potențiale blocaje cauzate de schimbare, timpul de nefuncționare și timpul de configurare prin

monitorizarea condițiilor mașinii și a planurilor de producție în timp real, apoi învâță din modelele de blocaj și reprogreamază resursele de fabricație în mod autonom.

Personalizarea inteligentă *Digital Twin-augmented* are mai multe perspective de aplicare în patru etape ale fabricației inteligente, așa cum se arată în figura 3.10.

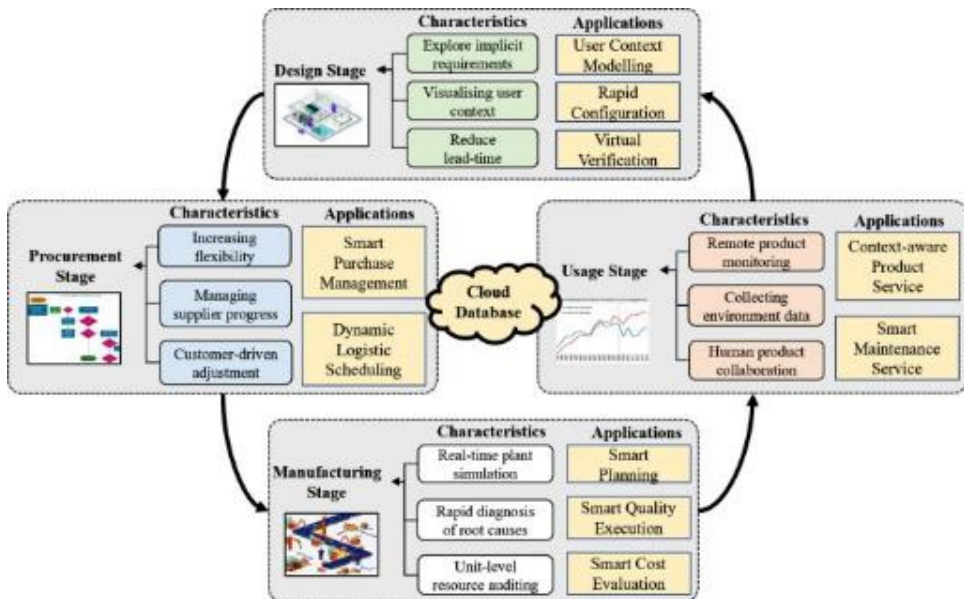


Fig. 3.10. Personalizarea inteligentă *Digital Twin-augmented* în patru etape ale fabricației inteligente (Wang ș.a., 2021)

În etapa de concepție a produsului, datele generate din geamănul digital facilitează explorarea holistică a nevoilor clienților și încarcă datele despre produse în spațiul virtual, pentru a simula scenariile de utilizare așteptate.

În etapa de achiziție, geamănul digital permite producătorilor să-și ajusteze rapid strategiile de achiziție analizând fluctuațiile cererii, activitățile clienților, nivelurile stocurilor, aprovizionarea cu materiale și chiar tendințele pieței.

În etapa de fabricație, geamănul digital oferă trei aplicații principale, inclusiv planificare inteligentă a producției, execuție inteligentă a calității și evaluare inteligentă a costurilor. Cu acces la date extraordinare, analiza de date

mari poate asocia toate resursele disponibile, în ceea ce privește timpul și capacitățile lor disponibile. În plus, sunt adoptați o serie de algoritmi de programare pentru a determina procesele și secvențele optime de fabricație, instalațiile necesare și programul de fabricație.

În etapa de utilizare, geamănul digital depășește bariera informațională cauzată de izolarea geografică, permițând furnizorilor de servicii să monitorizeze continuu starea produsului și mediile de lucru.

#### 3.2.2.4. Caracteristicile fabricației inteligente bazate pe date

Fabricația inteligentă bazată pe date are următoarele cinci caracteristici, după cum se observă în figura 3.11:

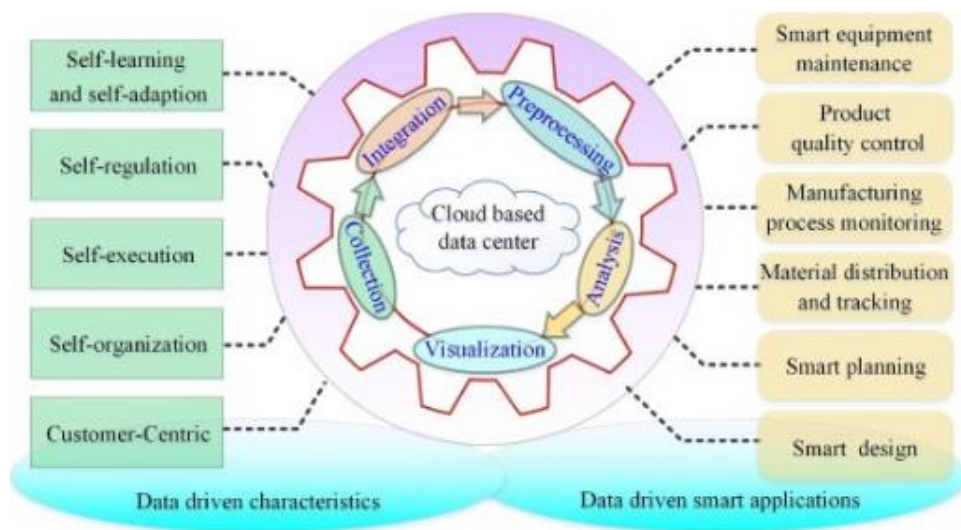


Fig. 3.11. Caracteristici și aplicații ale fabricației inteligente bazate pe date  
(Tao ș.a., 2018-2)

(1) **Dezvoltarea de produse centrate pe client**, prin exploatarea datelor utilizatorilor pentru concepția personalizată al produsului. De exemplu, datele demografice ale utilizatorilor, cerințele, preferințele și comportamentele pot fi cuantificate cu precizie folosind date mari analitice (BDA), astfel încât să poată fi proiectate produse și servicii mai personalizate.

(2) **Auto-organizarea**, prin exploatarea resurselor de fabricație și a datelor sarcinilor pentru planificarea inteligentă a producției. De exemplu,

planurile de producție pot fi create pe baza datelor interne și externe de la diferite site-uri de producție. Resursele de fabricație adecvate sunt alese pentru a forma configurația optimă, care îndeplinește toate cerințele sarcinii de producție pentru a implementa planurile de producție.

(3) **Auto-execuția**, prin exploatarea unei varietăți de date din procesul de fabricație pentru un control precis. De exemplu, materia primă și piesele adecvate pot fi trimise la orice loc de fabricație care le solicită în orice moment, iar echipamentele de fabricație pot prelucra automat materia primă sau asambla piese acolo unde este necesar.

(4) **Auto-reglementarea**, prin exploatarea datelor de stare în timp real pentru monitorizarea procesului de fabricație. De exemplu, un sistem de fabricație poate răspunde automat la evenimente neașteptate (lipsă de resurse de fabricație sau o schimbare a sarcinilor de producție), făcându-și comportamentele controlabile, nu numai de către operatorii umani, ci și prin sistemele AI.

(5) **Auto-învățarea și auto-adaptarea**, prin exploatarea datelor istorice și în timp real pentru întreținere proactivă și controlul calității. De exemplu, defecțiunile mașinii și defectele de calitate pot fi prezise și prevenite înainte ca acestea să apară, astfel încât sistemele de fabricație să se poată adapta în mod proactiv pentru a face față problemelor potențiale.

Pe scurt, fabricația inteligentă bazată pe date oferă o gamă completă de servicii întreprinderilor de producție. Unul dintre cele mai importante beneficii este capacitatea de a permite creșteri semnificative ale eficienței de fabricație și îmbunătățiri remarcabile ale performanței produsului. Luând în considerare caracteristicile prezentate mai sus și ciclul de viață al datelor de fabricație, paradigma fabricației inteligente bazate pe date poate fi cel mai bine exemplificată prin aplicații specifice.

#### ***3.2.2.5. Aplicații ale fabricației inteligente bazată pe date***

Unele dintre cele mai promițătoare aplicații care pot fi implementate în timpul procesului de fabricație includ aplicații pentru a permite concepția inteligentă, planificarea inteligentă, distribuția și urmărirea materialelor, monitorizarea procesului de fabricație, controlul calității și mentenanța inteligentă a echipamentelor (fig. 3.12).

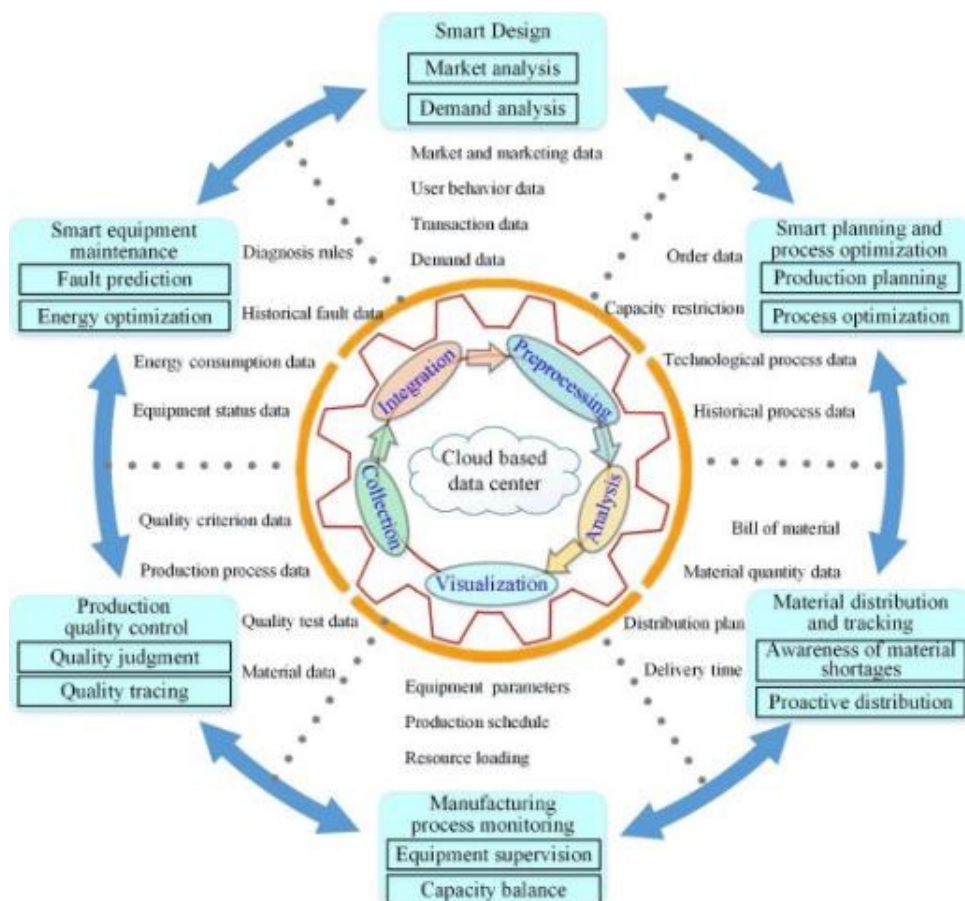


Fig. 3.12. Aplicație de fabricație inteligentă bazată pe date (Tao ș.a., 2018-2)

Tao ș.a. (2018-1) propun o metodă de fabricare a produselor prin gemeni digitali. După cum se arată în figura 3.7, *Digital Twin Shop Floor (DTS)* este compus din: *Physical Shop Floor (PS)*, *Virtual Shop Floor (VS)*, *Shop Floor Service System (SSS)* și *Shop Floor Digital Twin Data (SDTD)*.

PS este o entitate obiectivă, responsabilă pentru primirea sarcinilor de producție și a comenzilor predefinite și executarea ordinelor strict pentru a produce produse finale.

VS, o cartografiere de ultra-înaltă fidelitate și complet digitalizată a PS, poate efectua simulări și prognoze pentru planurile și procesele de producție,



poate oferi strategii de optimizare SSS și, de asemenea, poate monitoriza și reglementa procesul de producție în timp real.

SSS este ansamblul de sisteme de servicii, care oferă suport și servicii pentru fabricarea produsului.

SDTD se referă la toate datele legate de PS, VS și SSS, precum și datele derivate prin fuziunea datelor din cele trei părți de mai sus și oferă forța motrice pentru DTS.

După cum se arată în figura 3.13, prin convergența SDTD, cele trei componente ale DTS (adică PS, VS și SSS) interacționează între ele pentru a realiza optimizarea iterativă pentru gestionarea resurselor, planul de producție și controlul proceselor.

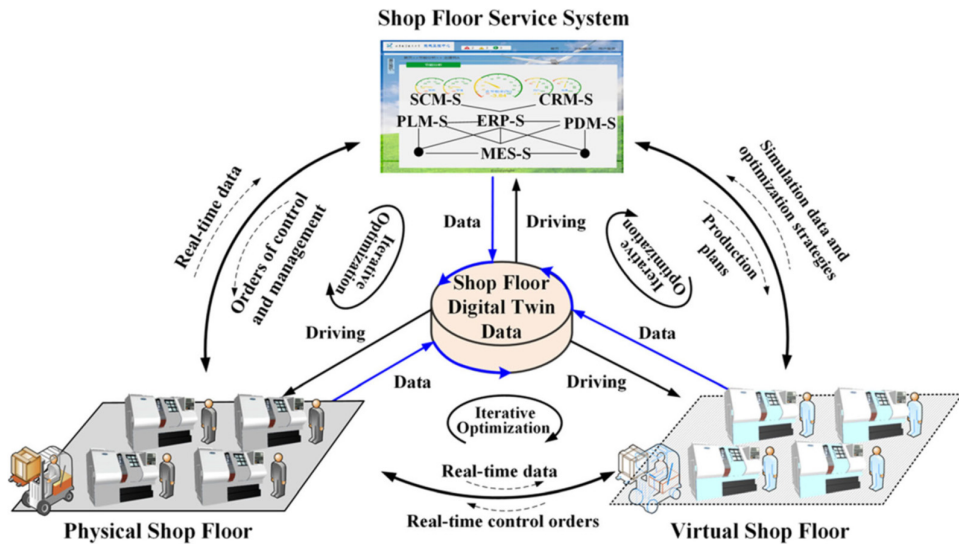


Fig. 3.13. Compoziția și mecanismul de funcționare al *Digital Twin Shop Floor* (DTS) (Tao ș.a., 2018-1)

Când vine o nouă sarcină de producție, sub conducerea SDTD, sunt generate planuri inițiale de alocare a resurselor pentru echipare, materiale, instrumente, oameni etc. care îndeplinesc cerințele și constrângerile sarcinii. În mod specific, SDTD implică date din PS (cum ar fi capacitatea, cantitatea, starea resurselor în timp real), date din VS (cum ar fi înregistrări istorice, date de simulare, date previzionate ale resurselor), date din diferite sisteme de servicii (cum ar fi datele planului de întreprindere, date despre produs) și datele de

fuziune prin asocierea datelor, mineritul, combinarea etc. Beneficiate de aceste date, planurile de alocare a resurselor sunt produse dintr-o perspectivă mai cuprinzătoare și practică, care sunt legate de starea actuală, starea furtive a resurselor, precum și interesul global al întregii întreprinderi. Planurile de alocare a resurselor pot fi elaborate sub formă de servicii care furnizează ordine de alocare, astfel încât resursele să fie stabilite statelor corespunzătoare. Între timp, din cauza schimbărilor în timp real în PS, serviciile de alocare a resurselor necesită o ajustare și optimizare iterativă.

Conform planurilor de alocare a resurselor, serviciile din SSS generează planuri de producție care predefinesc procesul real de fabricație a produsului, cum ar fi planul de prelucrare a echipamentelor, planul de operare manual și planul de planificare a uneltelor. Aceste planuri sunt transmise către VS, care este în concordanță cu modelele de elemente, modelele comportamentale și modelele de reguli etc. VS efectuează simulări în spațiul virtual pe baza planurilor și descoperă potențialele conflicte înainte de procesul de fabricație propriu-zis. VS, de asemenea, poate feedback strategii de optimizare a serviciilor prin analiza datelor de simulare, a datelor de prognoză și a datelor despre reguli generate de diverse modele. Serviciile din SSS fac corecții conform strategiilor de optimizare și transmit planurile revizuite înapoi către VS pentru o altă verificare. Acest proces este finalizat până când planul de producție este verificat complet de către VS.

PS primește comenzi pe baza planurilor de producție de la VS și organizează procesul de fabricație a produsului strict în conformitate cu comenzile. În timpul fabricației, PS transmite datele de stare în timp real către VS, care se actualizează pentru a trece la schimbările fizice. Între timp, VS compară procesul de producție actual cu planurile predefinite în spațiul virtual. În cazul în care producția reală nu este incompatibilă cu planurile de producție, SSS poate furniza servicii pentru a afla problemele existente și pentru a judeca care parte ar trebui ajustată pe baza datelor de perturbare fizică, a datelor privind condițiile de simulare, a datelor de mediu etc. Conform rezultatelor, VS poate produce strategii în timp real pentru ajustarea planurilor de producție sau a comenzilor în timp real, astfel încât să reglementeze procesul de producție pentru a asigura consistența celor două părți și pentru a realiza optimizarea și precizia controlului procesului. Când sarcina producție este finalizată, produsele sunt livrate, iar podeaua magazinului se pregătește pentru următoarea operațiune.



### 3.2.3. Metodologia generică pentru concepția, analiza și evaluarea sistemelor de fabricație inteligente

#### 3.2.3.1. Teoria de concepție axiomatică

Pentru a dezvolta un model generic al sistemului de fabricație inteligent (SMS) se apelează la teoria de concepție axiomatică (*Axiomatic Design Theory*, ADT), elaborată de Nam Pyo Suh. Potrivit ADT „un sistem este un ansamblu de subsisteme, componente hardware, software și oameni care îl concep, pentru a satisface cerințe și constrângeri funcționale specificate” (Suh, 1998).

Sistemele concepute trebuie să satisfacă două axiome: axioma independenței (menținerea independenței cerințelor funcționale) și axioma informațiilor (minimizarea conținutului informațiilor de concepție, respectiv maximizarea probabilității de îndeplinire a cerințelor funcționale).

Sistemele cu multe cerințe funcționale (*Functional Requirements*, FRs) și componente fizice pot fi complexe, în sensul că probabilitatea de a satisface FRs scade odată cu creșterea numărului lor și a parametrilor de concepție (*Design Parameters*, DPs).

Relațiile dintre atributele clientului (*Customer Attributes*, CAs), cerințele funcționale (*Functional Requirements*, FRs), parametrii de concepție (*Design Parameters*, DPs) și variabilele de proces (*Process Variables*, PVs) sunt diferite în funcție de destinația sistemului. Fiecare dintre acestea definesc un domeniu (fig. 3.14): domeniul client pentru atributele clientului, domeniul funcțional pentru cerințele funcționale, domeniu fizic pentru parametrii de concepție și domeniul proces pentru variabilele de proces.

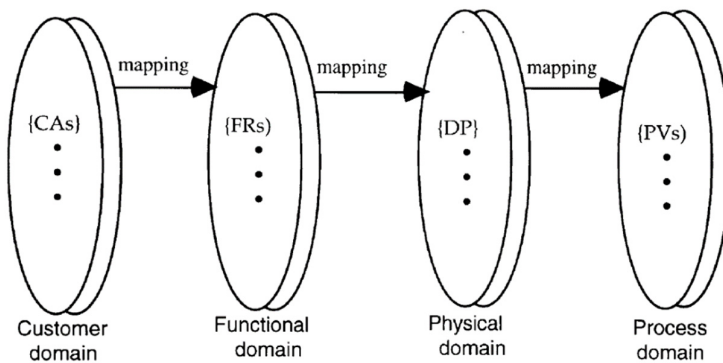


Fig. 3.14. Domeniile teoriei *Axiomatic Design* (Suh, 1998)

Trecerea de la un domeniu la următorul se efectuează prin mapare în zig-zag, proces descris printr-o matrice de design, care poate fi (fig. 3.15):

- matrice diagonală, când fiecare dintre FRs poate fi satisfăcută independent prin intermediul unui DP; un astfel de design se numește design necuplat;
- matricea triunghiulară, atunci când independența FRs poate fi garantată dacă și numai dacă DPs sunt modificate în succesiunea corespunzătoare; un astfel de design se numește design decuplat;
- toate celelalte modele încalcă axioma independenței și sunt numite modele cuplate.

$$\begin{array}{ccc}
 \left\{ \begin{array}{l} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & x \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{array} \right\} &
 \left\{ \begin{array}{l} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ x & x & 0 \\ x & x & x \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{array} \right\} &
 \left\{ \begin{array}{l} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} x & x & x \\ x & x & x \\ x & x & x \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{array} \right\} \\
 \text{a)} & \text{b)} & \text{c)}
 \end{array}$$

Fig. 3.15. Matrice de design (a – necuplată; b – decuplată; c – cuplată)

Prin urmare, atunci când trebuie îndeplinite mai multe cerințe funcționale, trebuie să se dezvolte soluții care au matricea de design diagonală (necuplată) sau triunghiulară (decuplată).

**Axioma informațiilor** afirmă că designul care are cel mai puțin conținut de informații este cel mai bun. Conținutul de informații poate fi măsurat pentru a compara soluțiile care satisfac independența funcțională. Axioma informațiilor oferă un ghid în selectarea DPs, pe lângă faptul că oferă criteriile de selecție pentru cel mai bun design dintre acele modele care satisfac axioma independenței. Axioma informațiilor este un instrument puternic în identificarea celui mai bun design, atunci când există mai multe cerințe funcționale. Prin utilizarea axiomei independenței și a axiomei informaționale, se poate optimiza cu ușurință o soluție de proiectare multi-FRs. Dacă la fiecare nivel al ierarhiei și cu fiecare FR se folosește concepția robustă (*Robust Design*), atunci conținutul informațional va fi minim, iar concepția și funcționarea sistemului vor fi eficiente și fiabile.

Odată aleși parametri de concepție (DPs), în domeniul proces trebuie să se identifice variabilele de proces (PVs), pe baza creării unui nou proces sau a utilizării unui proces existent. Când urmează să fie utilizate mașinile existente,

PVs sunt date și, prin urmare, PVs acționează ca și constrângeri, deoarece nu pot fi create noi procese și alege noi PVs.

Arhitectura sistemului conceput este reprezentată în diferite forme: ierarhiile FRs, DPs și PVs, cu ecuațiile și matricele de design corespunzătoare.

Se presupune finalizarea concepției unui sistem, astfel încât ierarhiile FRs și DPs să fie așa cum se arată în figura 3.16.

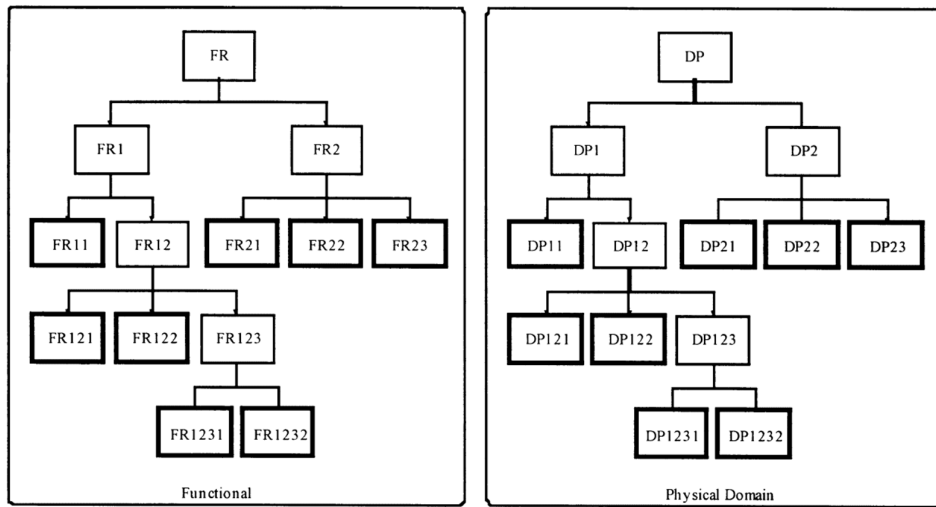


Fig. 3.16. Ierarhiile FRs și DPs ale unui sistem conceput (Suh, 1998)

Matricele de design ale sistemului conceput sunt conform (3.1).

Primul strat al ierarhiei este un design necuplat, dar al doilea, al treilea și al patrulea strat sunt modele decuplate. Nu există nicio cuplare în acest design și, prin urmare, reprezintă un design acceptabil. FR21, FR22 și FR23 nu trebuie să fie descompuse, deoarece sunt satisfăcute de DP-uri alese pentru ele și, prin urmare, sunt FRs terminale, adică frunze. În mod similar, FR11, FR121, FR122, FR1231 și FR1232 sunt FRs terminale. Designul decuplat trebuie controlat urmând secvența dictată de matricele de design. FR1 și FR2 pot fi pur și simplu însumate pentru a obține FR de cel mai înalt nivel, deoarece sunt necuplate una față de cealaltă. În practică, FR de nivel superior poate fi satisfăcută automat atunci când FR1 și FR2 sunt satisfăcute.

Dacă matricea de design este o matrice triunghiulară, FRs de nivel inferior trebuie să fie satisfăcute în secvența dată de matricea de design, pentru a satisface

cel mai mare nivel FR. Fiecare matrice de design reprezintă o joncțiune și arată cum trebuie asamblate modulele de nivel inferior pentru a obține FR dorită.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} A11 & 0 \\ 0 & A22 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \end{Bmatrix} \\ \\ \begin{Bmatrix} FR11 \\ FR12 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} X & O \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP11 \\ DP12 \end{Bmatrix} \\ \\ \begin{Bmatrix} FR21 \\ FR22 \\ FR23 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP21 \\ DP22 \\ DP23 \end{Bmatrix} & (3.1) \\ \\ \begin{Bmatrix} FR121 \\ FR122 \\ FR123 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP121 \\ DP122 \\ DP123 \end{Bmatrix} \\ \\ \begin{Bmatrix} FR1231 \\ FR1232 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} a & 0 \\ b & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1231 \\ DP1232 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Fiecare FR al fiecărei ramuri (adică fiecare FR care nu are nevoie de descompunere ulterioară) este definită ca „frunză”. „Frunzele” sistemului prezentat în figura 3.16 sunt: FR11, FR21, FR22, FR23, FR121, FR122, FR1231 și FR1232. FRs de nivel superior sunt satisfăcute prin combinarea „frunzelor” conform informațiilor conținute în matricea de design. De exemplu, frunzele FR1231 și FR1232 produc FR123 dacă sunt combinate urmând secvența dată de ecuația de design, deoarece este design decuplat.

Un modul a fost definit ca rândul matricei de design care dă o FR, atunci când este furnizată cu intrarea DP corespunzător. De exemplu, M123 este un modul care corespunde elementelor matricei de design și DP corespunzător care produce FR123, atunci când este înmulțit cu (sau legat de) DP123.

Combinarea M1231 și M1232 conform matricei de design poate reprezenta M123. Cu toate acestea, M123 nu apare în design în mod explicit, deoarece nu este frunza sau designul terminalului. Pentru a executa arhitectura sistemului trebuie introduse doar acele DPs corespunzătoare frunzelor. Modulele de nivel inferior sunt combinate pentru a obține module de nivel superior, care satisfac FRs de nivel superior.

După ce s-au definit modulele sistemului, arhitectura acestuia se va reprezenta sub forma unei diagrame de flux. Odată conceput sistemul, acesta poate fi operat folosind diagrama de flux a arhitecturii. În cazul unui sistem format din hardware și software, diagrama de flux arată și modul în care sistemul trebuie să fie secvențial și care ar trebui să fie secvența operațională.

Scopul implementării sistemelor este atingerea FRs de cel mai înalt nivel. Implementarea trebuie să înceapă întotdeauna de la modulele interioare, care reprezintă frunzele de cel mai jos nivel din fiecare ramură majoră (de exemplu, M1232i și M21j) și apoi să se treacă la modulele de nivel superior următor, urmând secvența indicată de arhitectura sistemului - de la cele mai multe căsuțe interioare la cele mai exterioare.

Cu mici variații, teoria *Axiomatic Design* (ADT) poate fi aplicată oricărui tip de sistem (mic/mare, fix/flexibil, static/dinamic...). Pentru un sistem de fabricație inteligent, care este un sistem de fabricație flexibil, cerințele funcționale sunt variabile în funcție de timp. Procesul de concepție pentru sistemele flexibile este similar cu concepția sistemelor fixe, cu excepția faptului că sistemul va trebui să satisfacă diferite subseturi de cerințe funcționale, setul de FRs schimbându-se în funcție de timp. Când setul de FRs se schimbă, setul DPs corespunzător trebuie selectat din nou pentru a satisface axioma independenței. Deși unele dintre FRs din submulțimile {FRs} pot fi comune, setul de DPs trebuie considerat ca o unitate, din cauza necesității de a satisface axioma independenței. Crearea unei arhitecturi pentru un sistem flexibil este simplă atunci când cerințele funcționale pot fi satisfăcute de către DPs aleși, fără descompunere ulterioară.

### 3.2.3.2. Definierea funcțiilor sistemului de fabricație inteligent

Valorile de bază ale sistemului de fabricație inteligent sunt tratate ca cerințe funcționale (*Functional Requirements*, FRs). În consecință, o reprezentare a unui element de sistem generic trebuie să îndeplinească următoarele cerințe funcționale:

**FR1** — Efectuarea proceselor de fabricație. Transformarea materiilor prime în produse finite, printr-o serie de procese de fabricație. Prin urmare, fabricarea produselor este FR principală a unui sistem de fabricație și ar trebui definită pe baza variantelor și volumelor de produse cerute de clienți. În plus, deoarece un produs complex implică multe piese și componente care sunt realizate prin diferite procese de fabricație, activele fizice de fabricație pot fi

definite pentru produse, componente, piese și procese. În scopul generalității, o entitate fizică este implicată într-un element de sistem. O astfel de entitate fizică poate fi prezentă la orice nivel al produsului, dintr-un anumit proces, parte, componentă, produs, familie de produse sau serie de produse pe parcursul ciclului său de viață.

**FR2** — Adaptarea la schimbări în raport cu nevoile clienților în procesele de fabricație. Un sistem de fabricație inteligent este durabil, fiind capabil să se reconfigureze pentru a face față schimbărilor de cerințe ale clienților, precum și perturbațiilor și incertitudinilor din mediile de fabricație. Soluțiile pentru ca un model de sistem să se adapteze la schimbări sunt: flexibilitatea software a activelor reglabile, modularitatea hardware, care este capabilă să configureze sistemul prin selectarea diferitelor module și asamblarea lor în moduri diferite și combinația de flexibilitate software și hardware.

**FR3** — Analizarea proceselor de fabricație. Pentru a realiza cu succes un proces de fabricație, acesta trebuie definit, planificat, programat, verificat, validat, controlat și monitorizat, pentru a se asigura că este efectuat corect. Odată cu complexitatea tot mai mare a proceselor de fabricație, realizarea acestor sarcini complexe depășește cu mult efortul manual. În SMS, modelele digitale sunt dezvoltate ca gemeni digitali (*Digital Twins*, DT-I) ale activelor fizice corespunzătoare. Gemenii digitali sunt utilizați pentru optimizarea, simularea și verificarea proceselor de fabricație și pentru controlul, monitorizarea și diagnosticarea proceselor de fabricație în operațiunile reale.

**FR4** — Achiziționarea, procesarea și extragerea datelor pentru utilizare în modele digitale. Menținerea unui sistem de fabricație implică numeroase activități de luare a deciziilor la toate nivelurile, domeniile și aspectele afacerilor. Pe de altă parte, SMS pune accent pe receptivitatea, adaptabilitatea și rezistența la schimbările și incertitudinile din mediile dinamice.

**FR5** — Luarea deciziilor pentru o mai bună inteligență a sistemului. Deciziile pentru operațiunile de fabricație sunt luate pe baza datelor colectate de la mașini, operatori, senzori, furnizori, piețe și utilizatori. Datorită creșterii rapide a elementelor dintr-un sistem conectate în rețea, activitățile de luare a deciziilor cu privire la operațiunile de fabricație implică de obicei seturi de date excepțional de mari, care sunt caracterizate ca date mari (*Big Data and Analytics*, BDA) în ceea ce privește varietatea, volumul, viteza, veridicitatea și valoarea. Datele mari sunt analizate și extrase pentru a permite luarea unor decizii mai inteligente cu

privire la operațiunile de fabricație și pentru a obține o performanță mai bună a sistemului, pentru orice aspecte de interes, cum ar fi: agilitatea, robustețea, adaptabilitatea, flexibilitatea și rezistența.

**FR6** — Accesarea resurselor virtuale. Domeniul de aplicare al întreprinderilor de producție a fost crescut continuu din cauza complexității tot mai mari a produselor și a necesității ca întreprinderile să se extindă pe ciclurile de viață ale produselor. Sistemele de fabricație sunt supuse unei presiuni puternice, fiind nevoite să se reconfigureze pentru a se adapta schimbării nevoilor clienților în timp. Resursele de fabricație virtuale devin astfel din ce în ce mai importante, pentru a acoperi sfera din ce în ce mai mare a întreprinderilor.

**FR7** — Sprijinirea luării deciziilor pentru întreprinderile la nivel de încorporare. În era digitală, sistemele de fabricație devin din ce în ce mai distribuite și descentralizate, iar întreprinderile din cadrul unui sistem devin mai strâns legate de părțile interesate, cum ar fi: furnizorii de materiale, furnizorii de servicii, sistemele logistice și utilizatorii. Prin urmare, operațiunile de fabricație durabilă necesită numeroase procese de luare a deciziilor la nivel de încorporare, ca: selecția furnizorilor, alcătuirea fluxurilor de lucru pentru oportunitățile de afaceri emergente și reconfigurarea sistemelor sau a alianțelor virtuale ale întreprinderilor, pentru a se adapta la schimbarea clienților.

### ***3.2.3.3. Modelarea sistemului de fabricație inteligent***

În general, un sistem poate fi modelat prin:

- un set de elemente de sistem;
- relațiile dintre elementele sistemului;
- o serie de transformări de la intrările la ieșirile sistemului;
- un set de metrici de performanță care sunt cuantificate pe baza primelor 3 criterii.

Modelarea unui sistem începe cu reprezentarea elementelor sistemului.

Un sistem de fabricație inteligent este, de fapt, un sistem de sisteme (*System of Systems*, SoS). Fabricația inteligentă, în contextul Industriei 4.0, este compusă dintr-o multitudine de tehnologii și elemente, cum ar fi: *Internet of Things* (IoT), *Cyber Physical Systems* (CPS), *Big Data and Analytics* (BDA), *Cloud Computing* (CC), *Artificial Intelligence* (AI), *Collaborative Robotics* (CR), *Machine Learning* (ML) etc.

Pentru a reprezenta un element de sistem abstract al fabricației inteligente este folosit un concept nou dezvoltat în (Bi ș.a., 2021-1): triada digitală (*Digital Triad*, DT-II). DT-II este o extensie a conceptului de geamă digitală (*Digital Twin*, DT-I), iar DT-II include activatorii pentru a îndeplini cerințele funcționale FR1, FR2, FR3, FR4 și FR5 prezentate anterior.

După cum se arată în figura 3.17, o triadă digitală (DT-II) este o coaliție de modele de viață, modelele digitale și modelele fizice corespunzătoare.

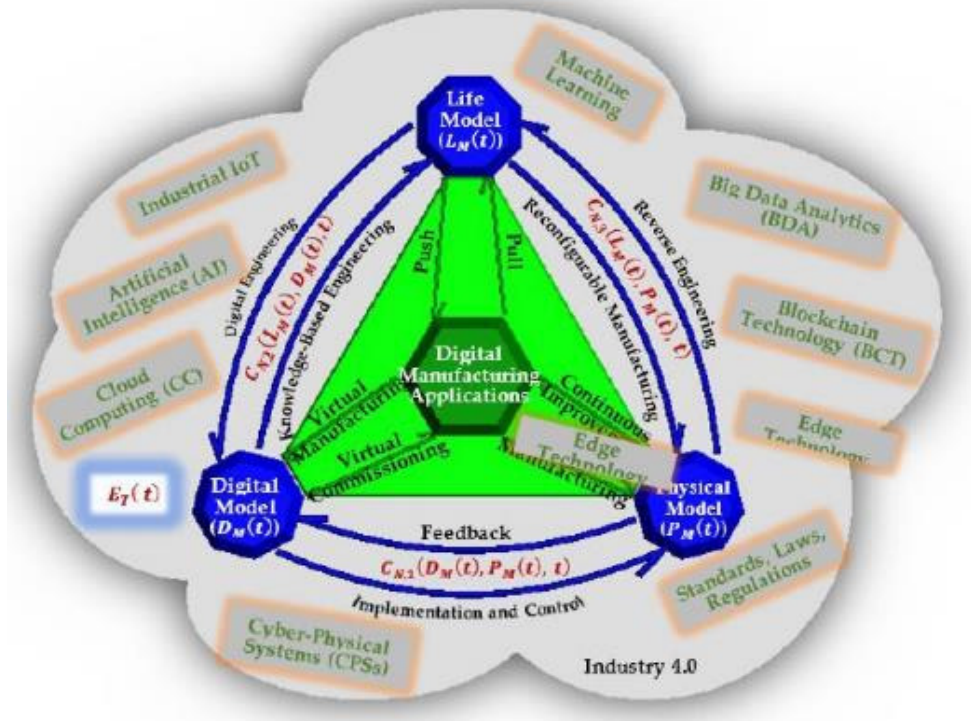


Fig. 3.17. Modelul generic al triadei digitale  $DT-II(t)$  (Bi ș.a., 2021-1)

În consecință, DT-II este modelat prin trei modele și interacțiunile lor:

$$DT-II(t) = \{LM(t), DM(t), PM(t), C_N(LM(t), DM(t), PM(t), t), E_T(t)\} \quad t = t_1, t_2, \dots, t_n, \dots (3.2)$$

unde:

- $DT-II(t)$  reprezintă starea unei triade digitale la momentul  $t$ ;



- $L_M(t)$ ,  $D_M(t)$ , și  $P_M(t)$  sunt seturile de modele de viață, digitale și respectiv fizice la momentul  $t$ ;
- $C_N(L_M(t), D_M(t), P_M(t), t)$  sunt interacțiunile modelelor de viață, digitale și fizice la momentul  $t$ ;
- $E_T(t)$  este setul de activatori pentru operațiunile DT-II;
- $t_1, t_2, \dots$  sunt intervale de timp pentru actualizarea DT-II.

DT-II servește ca soluție de modelare pentru FR1, FR2, FR3, FR4 și FR5 a unui sistem de fabricație inteligent la nivel de element:

$$\begin{array}{c} \{FR\}_E \\ \left( \begin{array}{c} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \\ FR4 \\ FR5 \end{array} \right) \end{array} = \begin{array}{c} \{MR\}_R \\ \left[ \begin{array}{cccccc} \times & \circ & \circ & \circ & \circ & \times \\ \circ & \times & \circ & \circ & \circ & \times \\ \circ & \circ & \times & \circ & \circ & \times \\ \circ & \circ & \circ & \times & \circ & \times \\ \circ & \circ & \circ & \times & \times & \times \end{array} \right] \end{array} \begin{array}{c} \{MS\}_E \\ \left( \begin{array}{c} P_M(t) \\ L_M(t) \\ D_M(t) \\ C_{N,1}(t) \\ C_{N,2}(t) \\ C_{N,3}(t) \\ E_T(t) \end{array} \right) \end{array} \quad (3.3)$$

unde:

- $\{FR\}_E$  și  $\{MS\}_E$  sunt setul de cerințe funcționale (FRs) și respectiv soluții de modelare la nivel de element,
- $\{MR\}_R$  este o matrice pentru cartografiere din  $\{MS\}_E$  și  $\{FR\}_E$ ,
- „ $\times$ ” și „ $\circ$ ” reprezintă o mapare strânsă, respectiv puțin relevantă.

Un sistem fabricație inteligent este un sistem de sisteme (SoS). În ciuda naturii distribuite, descentralizate și eterogene a elementelor sale, un model de element abstract bazat pe DT-II poate reprezenta doar caracteristicile la nivel de element, mai degrabă decât toate caracteristicile sistemului, inclusiv nevoile de accesare a resurselor virtuale și de reconfigurare a sistemului în timp.

Trebuie remarcat faptul că modelele de referință existente sunt foarte diversificate și le lipsește generalitatea necesară pentru ca utilizatorii să înțeleagă, să analizeze, să proiecteze, să îmbunătățească, să optimizeze, să gestioneze, să controleze și să mențină sistemele în aplicații specifice. Un model de referință al fabricației inteligente ar trebui să sprijine integrarea datelor, cunoștințelor și înțelepciunii tuturor părților interesate, de la furnizori la utilizatori, evaluarea opțiunilor de sistem pe baza indicatorilor cheie de performanță (*Key Performance*

Indicators, KPIs) la nivel înalt, adaptarea la schimbările dinamice și incertitudinile, conectarea perfectă a infrastructurii tehnologiei informației și costul accesibil al modelării, simulării și analizei datelor.

Pentru a modela interacțiunea elementelor sistemului în fabricația inteligentă este introdus conceptul de *Internet of Digital Triad Things* (IoDTT) (Bi ș.a., 2021-1). În figura 3.18 se ilustrează o reprezentare a IoDTT pentru fabricația inteligentă.

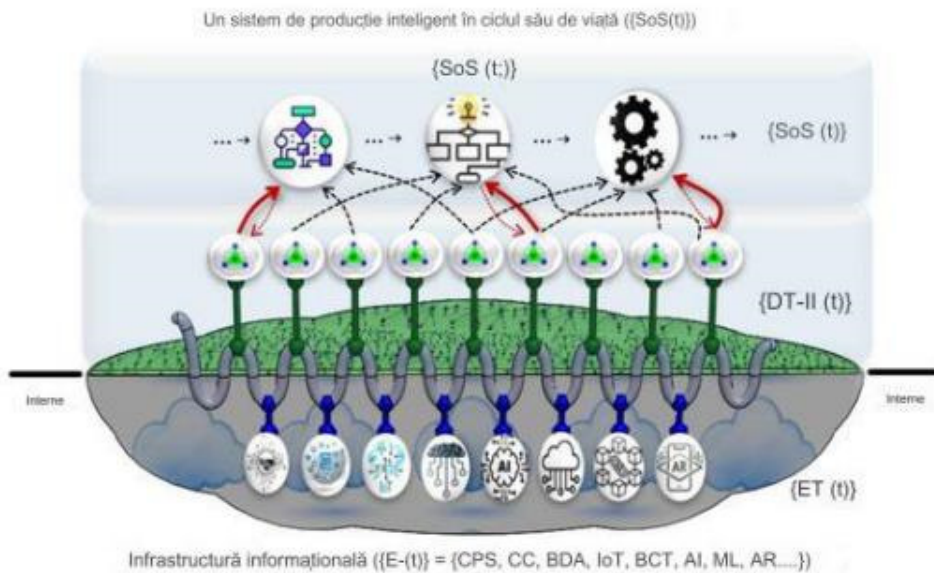


Fig. 3.18. *Internet of Digital Triad Things* (IoDTT), ca model de referință pentru fabricația inteligentă, după (Bi ș.a., 2021-1)

IoDTT servește ca soluție de modelare pentru FR6 și FR7 ale sistemului de fabricație inteligentă la nivel de SoS:

$$\begin{Bmatrix} \{FR\}_S \\ \{FR\}_E \\ \{FR\}_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{FR\}_S \\ FR6 \\ FR7 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \{MR\}_S & \circ & \times \\ \circ & \times & \times \\ \circ & \circ & \times \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{MS\}_S \\ \{MS\}_E \\ \{SoS(t)\} \\ \{E_T(t)\} \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

unde:

- $\{FR\}_E$ ,  $\{MR\}_E$  și  $\{MS\}_E$  sunt cerințele funcționale, relațiile de mapare și soluțiile de modelare determinate în ecuația (3.2) la nivelul elementului;
- $\{FR\}_N = \{FR6, FR7\}^T$  sunt cerințele funcționale la nivel de sistem;
- $\{SoS(t)\}$  este un set de configurații ale sistemului în ciclul de viață al sistemului,
- $\{ET(t)\}$  este infrastructura informațională care include toate tehnologiile posibile accesibile;
- „x” și „o” reprezintă o mapare strânsă, respectiv puțin relevantă.

Pentru concepția, analiza și evaluarea sistemelor inteligente de fabricație este adoptată și extinsă teoria *Axiomatic Design* (ADT), ca metodologie generică.

#### ***3.2.3.4. Fazele de concepție ale unui sistem de fabricație inteligent***

Deoarece un sistem de fabricație inteligent (SMS) urmărește adaptabilitatea sistemului în a face față schimbărilor și incertitudinilor, iar o astfel de capacitate este obținută fie prin flexibilitatea elementelor sistemului, fie prin configurabilitatea la nivel de sistem, concepția unui sistem de fabricație inteligent implică trei faze iterative în ciclul său de viață: faza de concepție a sistemului, faza de funcționare a sistemului și faza de reconfigurare a sistemului.

În figura 3.19 se prezintă cele trei faze în concepția unui SMS.

În **faza de concepție** a sistemului este definit un set de cerințe funcționale (FRs). Activele fizice disponibile și activele virtuale accesibile sunt luate în considerare pentru a defini un spațiu de concepție cu toate soluțiile de concepție fezabile (*Design Solutions*, DSs), iar performanțele metrice ale sistemului (*System Performance Metrics*, PSs) sunt clasificate pentru a defini un set de metrice de performanță prioritizate.

În **faza de funcționare** se efectuează analiza și sinteza de concepție pentru optimizarea sistemului și, astfel, implementarea acestuia în aplicație; toate lucrurile inteligente din sistem sunt monitorizate pentru a determina dacă elementele sistemului sau întregul sistem trebuie reconfigurate pentru a îndeplini modificările identificate.

În **faza de reconfigurare** a sistemului, fie elementele sistemului, fie întregul sistem este reconfigurat pentru a face sistemul de fabricație inteligent durabil.

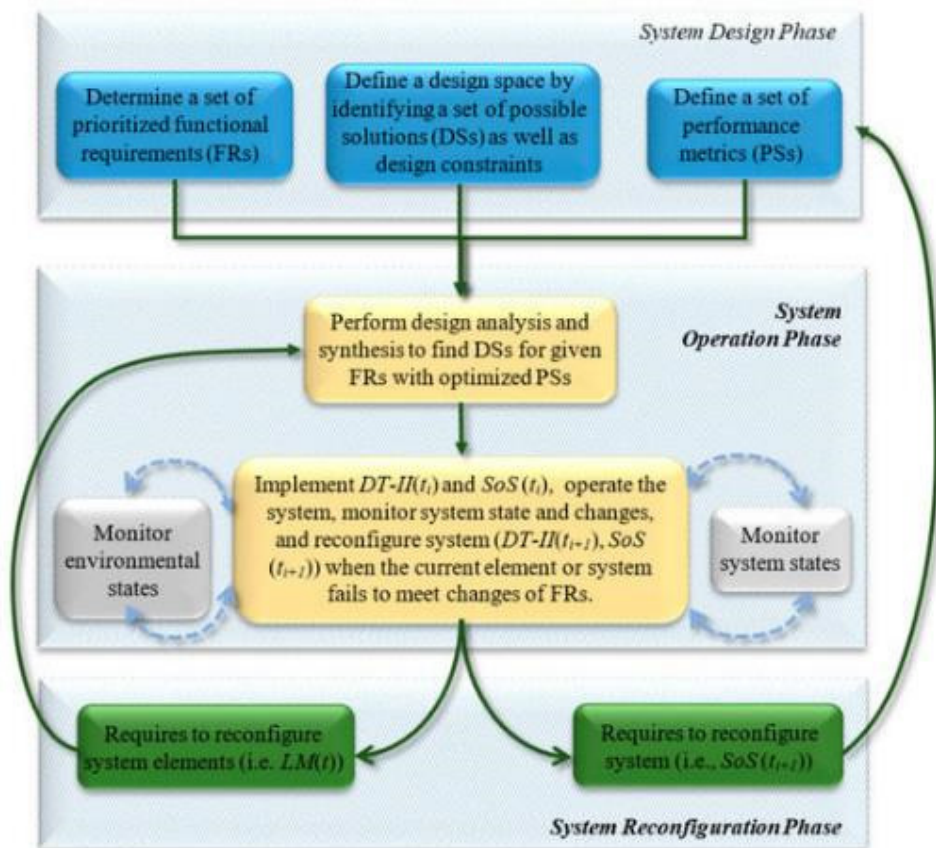


Fig. 3.19. Fazele de concepție a unui sistem de fabricație inteligent (Bi ș.a., 2021-2)

Teoria *Axiomatic Design* (ADT) este utilizată pentru determinarea cerințelor funcționale (FRs) și a spațiilor de concepție prin soluții și pentru evaluarea mapărilor de la soluțiile de concepție (DSs) la cerințele funcționale (FRs). Modul de descompunere a FRs pentru a îndeplini axioma independenței și axioma informațiilor este de mai puțin interes. De fapt, pentru un sistem complex și multidisciplinar, fiecare element de sistem este cuplat conceptual cu altele, ceea ce face imposibilă obținerea independenței cerințelor funcționale.

În scap. 3.2.3.2 au fost precizate FRs, iar sistemul de fabricație inteligent a fost modelat ca o instanță a *Internet of Digital Triad Things* (IoDTT), sistemul constând dintr-un set de triade digitale în rețea (fig. 3.17). Prin urmare, diversele tehnologii digitale sunt factorii de bază esențiali pentru a satisface cerințele

funcționale ale sistemelor de fabricație inteligente. Cele mai avansate *tehnologii digitale*, cum ar fi litografia cu ultraviolete extreme (EUV) și imprimarea 4D sau 5D au devenit disponibile comercial pentru a pregăti materii prime pentru produse inteligente.

Procesele de luare a deciziilor ar trebui verificate și validate înainte de a fi executate în lumea fizică. Instrumentele de modelare și simulare constituie un sistem de sine stătător, fiind aplicate pe scară largă pentru a prezice comportamentele sistemului pe baza condițiilor presupuse, modificări, perturbări și aleatoriu. *Digital Twin* (DT-I) a fost avansat de la abordările tradiționale de modelare și simulare (Leng ș.a., 2021), în sensul că modelele fizice și virtuale sunt conectate și interacționate direct. Conceptul de gemeni digitali (DT-I) a permis interacțiunile și integrările informațiilor și a lumii fizice în timp real. De exemplu, realitatea augmentată (AR) a fost adoptată special pentru interfețele de interacțiune în fabricația inteligentă.

Sistemul ciber-fizic (CPS) este strâns legat de triada digitală (DT-II). În timp ce primul se concentrează pe interacțiunile gemenilor digitali și fizici din lumea cibernetică și respectiv fizică, CPS acceptă comunicarea în timp real și interacțiunea sistemelor cibernetică și fizice pentru a închide buclele de control, pentru a monitoriza stările sistemului în timp real și pentru a ajusta prompt comportamentul sistemului atunci când sunt detectate modificări (Leng ș.a., 2021). CPS face un sistem de fabricație să fie inteligent prin îmbunătățirea capacității de răspuns, adaptabilitatea și predictivitatea elementelor sistemului, facilitând colaborarea părților interesate în întregul proces de personalizare în masă a produselor (Wang ș.a., 2021).

Oamenii sunt integrați cu CPS și cu sistemele ciber-fizice umane (*Human Cyber-Physical Systems*, HCPS). Tehnologiile de activare, precum realitatea augmentată (AR), sunt esențiale pentru a sprijini colaborările și interacțiunile om-mașină.

Internetul lucrurilor (IoT) este esențial pentru fabricația inteligentă (SM) din două motive principale:

- 1) SM este bazată pe date, iar datele în timp real despre lucruri inteligente, părți interesate și medii de afaceri trebuie să fie disponibile pentru a sprijini procesele de luare a deciziilor la orice nivel și domeniu de aplicare al întreprinderile de producție;

- 2) SM necesită acces la resurse virtuale prin Internet, pentru a se ocupa de întreprinderile de producție pe parcursul ciclurilor de viață ale produsului.

SM adoptă IoT ca infrastructură informațională pentru rețeaua activelor de fabricație, cum ar fi: produse, piese, mașini-unelte, senzori și unități de luare a deciziilor în mediul eterogen. IoT permite unui sistem de fabricație inteligent să detecteze elementele sistemului și mediul, să acceseze servicii virtuale prin Internet și să furnizeze date abundente pentru a conduce procesele de luare a deciziilor la toate nivelurile și domeniile de activitate ale fabricației în ciclurile de viață ale sistemului.

*Cloud computing* (CC) este construit pe arhitectura orientată pe servicii (SoA). Fiecare sarcină care manipulează date accesează resurse virtuale sau rulează un model pentru luarea deciziilor și poate fi tratată ca un serviciu (XaaS). Orice element de sistem cu o capacitate de calcul limitată poate utiliza CC pentru a-și susține activitățile de luare a deciziilor. Acestea se confruntă cu o serie de provocări, cum ar fi:

- partajarea și accesarea datelor în medii distribuite;
- stocarea și menținerea unei cantități din ce în ce mai mari de date în rețea;
- cererea mare de calcul pentru optimizarea deciziilor cu resursele de calcul locale limitate;
- complexitatea coordonării, colaborării și interoperării resurselor de fabricație prin Internet.

Inteligența artificială (AI) este o știință cognitivă pentru extragerea datelor și sprijinul pentru luarea deciziilor în domeniile analizei datelor, proceselor de imagine, robotică, proceselor limbajului natural și învățării automate.

Utilizarea activelor virtuale prin Internet a transferat anumite întreprinderi de producție în servicii și, în consecință, sistemul de fabricație a devenit un sistem produs-serviciu. Un sistem de fabricație inteligent poate face față complexității și schimbărilor.

Pentru a obține o capacitate ridicată de diagnosticare, predictivitate și receptivitate a sistemului de fabricație inteligent, acesta trebuie să se bazeze pe

date mari analitice (BDA) conectate prin Internet, pentru a-și susține luarea deciziilor la toate nivelurile și domeniile.

Tehnologiile *Blockchain* (BCT) au fost explorate pentru a integra încredere și vizibilitate în SMS, pentru a asigura integritatea, calitatea, confidențialitatea, disponibilitatea, scalabilitatea, transformarea, legitimitatea, supravegherea și guvernarea datelor, transferul de valoare și serviciile.

### ***3.2.3.5. Indicatorii de performanță pentru inteligența sistemului***

Așteptările pentru sistemele de fabricație inteligente (SMS) pot fi clasificate în cerințe funcționale (FRs) și metrici de performanță (*Performance metrics*, PMs).

Cerințele funcționale (FRs) sunt tratate ca și constrângeri de proiectare în dezvoltarea soluțiilor de concepție (DSs). Pe de altă parte, PMs sunt un set de obiective soft pentru care DSs ale unui sistem de fabricație inteligent ar trebui optimizate.

Deoarece o soluție de sistem este specifică aplicațiilor date, clasificarea așteptărilor sistemului pentru FRs și PMs este diferită de la un sistem la altul. FRs comune ale SMS au fost discutate în 3.2.3.2, urmând ca aici să fie discutate PMs utilizate în mod obișnuit.

Pe baza relevanței lor, metricile au fost clasificate în capacitate, convergență, diversitate și convergență-diversitate și a fost dezvoltat un model de evaluare a performanței pentru a obține consistența fronturilor Pareto în optimizarea multi-obiective (MOO) (Bi ș.a., 2021-2).

Pentru a măsura performanța SMS se consideră o structură ierarhică a indicatorilor cheie de performanță (*Key Performance Indicators*, KPIs). Performanțele se evaluează la nivel strategic, tactic și operațional, iar dependențele elementelor sistemului sunt luate în considerare la cuantificarea KPI-urilor.

Vizibilitatea, diagnosticabilitatea și predictivitatea reflectă nivelurile de inteligență a sistemului în detectarea modificărilor și perturbărilor, diagnosticarea și depanarea problemelor și prezicerea tendințelor schimbărilor pe baza datelor colectate din diverse surse prin sistemele de fabricație.

Vizibilitatea sistemului se bazează pe senzorii și instrumentațiile instalate pe obiecte inteligente, iar diagnosticabilitatea și predictivitatea se bazează pe

capacitățile tehnologiilor informaționale avansate, cum ar fi inteligența artificială (AI), cloud computing (CC) și date mari analitice (BDA).

Inteligența unui sistem poate fi măsurată prin posibilitatea de actualizare a tehnologiilor de adoptare, a sistemelor de întreprindere și a unităților de luare a deciziilor la diferite niveluri și domenii. Pentru a prelungi ciclul de viață, sistemele de fabricație ar trebui să fie modularizate, astfel încât modulele funcționale individuale să poată fi menținute și actualizate cu un impact minim.

Adaptabilitatea măsoară capacitatea unui sistem de a face față schimbărilor și incertitudinilor. Adaptabilitatea este realizată prin flexibilitatea elementelor sistemului și reconfigurabilitatea între elementele sistemului.

Flexibilitatea este similară cu adaptabilitatea, dar este măsurată mai degrabă pe elementele sistemului decât pe rezultatele sistemului. Flexibilitatea sistemului poate fi obținută prin software, hardware sau o combinație a ambelor.

Un SMS vizează în cele din urmă o durată lungă de viață a sistemului. Sustenabilitatea devine necesar de luat în considerare în procesele de luare a deciziilor pe ciclurile de viață ale sistemului. Un proces de fabricație este un tip de transformare mecanică, chimică, electrică sau biologică, care poate fi modelată prin generarea, transferul, stocarea sau consumul de energie. Pentru a estima eficiența energetică a sistemelor de fabricație este necesară modelarea pe bază de indicatori termodinamici, fizico-termodinamici și economico-termodinamici.

Toți indicatorii de performanță sunt determinați din sistemele de fabricație, prin urmare, aceștia sunt asociați între ei în anumite moduri.

### ***3.2.3.6. Metodologia sistematică de concepție a unui sistem de fabricație inteligent. Studii de caz***

Principalele cerințe funcționale care permit tehnologiile digitale și o listă completă de așteptări ale unui sistem de fabricație inteligent au fost discutate anterior. Cu toate acestea, este extrem de rar ca o întreprindere să aibă acces la orice tehnologie digitală atunci când întreprinderea are nevoie, iar un sistem de fabricație trebuie proiectat și implementat de la zero. În practică, inteligența unui sistem de fabricație va fi îmbunătățită iterativ prin modernizarea și încorporarea mai multor metodologii digitale de îmbunătățire continuă.

Pentru a face complexitatea sistemului gestionabilă, la fiecare iterație se folosește teoria *Axiomatic Design* (ADT) (fig. 3.19). Pentru a restrânge un set de



cerințe funcționale (FRs), soluții de concepție (DSs) și performanțe metrice (PMs), care sunt cele mai critice pentru aplicațiile date, precum și pentru restul FRs, DSs și PMs, ar trebui formulate ca cerințe pe baza activelor de fabricație disponibile și a stărilor curente ale sistemului. Cu alte cuvinte, concepția unui sistem de fabricație inteligent (SMS) implică la fiecare iterație doar una sau câteva metrice relevante pentru inteligența sistemului, adică flexibilitate, vizibilitate, sustenabilitate, reziliență și chiar unele metrice tradiționale, cum ar fi eficiența și agilitatea, precum și una sau câteva triade digitale (DT-II) corespunzătoare sau configurația în *Internet Digital Triad Things* (IoDTT). Activele de fabricație disponibile și condițiile de marketing date sunt formulate ca și cerințe de proiectare.

În continuare se prezintă exemple pentru a ilustra modul în care metodologia propusă a fost aplicată în dezvoltarea sistemului pentru a-i crește inteligența, în îmbunătățirea continuă. Scenariile de aplicație au fost specificate, soluțiile de concepție (DSs) au fost limitate la anumite tehnologii digitale, iar inteligența sistemului a fost asociată cu performanța sistemului de interes în realizarea cerințelor funcționale specificate (FRs) în aplicațiile date. În toate aceste trei cazuri, FRs și inteligența sistemului au fost interpretate și definite în funcție de nevoile clienților. Spațiul de concepție al soluțiilor posibile (DSs) a fost pentru tehnologii digitale și determinat de dezvoltatorii de sisteme pe baza resurselor de fabricație accesibile, iar următoarele discuții s-au limitat la utilizarea metodologiei propuse pentru a formula o problemă de concepție a unui sistem inteligent.

Scopul primului studiu de caz a fost de a arăta că definiția inteligenței într-un sistem de fabricație inteligent poate fi personalizată la indicatorii cheie de performanță (KPIs) prioritizați. Cu alte cuvinte, urmărirea unui sistem de fabricație inteligent este un efort de îmbunătățire continuă pe termen lung, iar inteligența sistemului vizat ar trebui să fie cât mai specifică posibil, pentru a fi măsurată cantitativ.

Figura 3.20 prezintă un caz în care inteligența sistemului a fost definită pentru vizibilitate și diagnosticare, iar tehnologiile digitale pentru colectarea și analiza datelor au fost identificate ca soluții de concepție de interes. În soluția dezvoltată, analiza datelor mari (BDA) a fost încorporată într-un sistem de fabricație eterogen. Datele au fost analizate și prelucrate pentru a face gestionabilă amploarea acestora, astfel ca deciziile acțiunilor de îmbunătățire continuă să fie luate cu promptitudine.

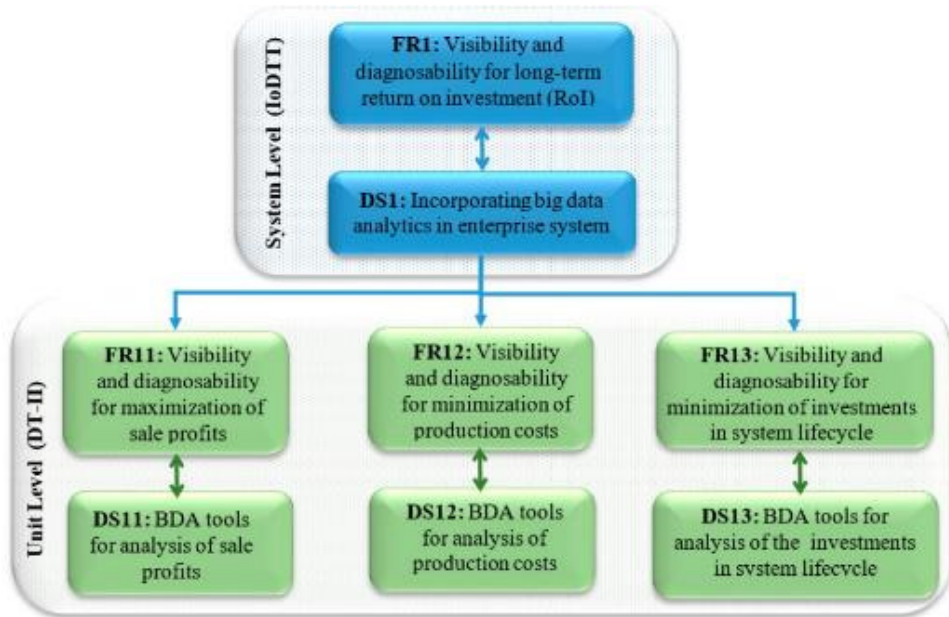


Fig. 3.20. Îmbunătățirea vizibilității și diagnosticării prin analiza datelor mari (BDA), (Bi ș.a., 2021-2)

Scopul celui de-al doilea studiu de caz a fost acela de a arăta că metodologia de concepție propusă este gata să fie aplicată în faza de operare a sistemului, când unele performanțe ale sistemului au fost găsite nesatisfăcătoare, iar soluția proceselor critice trebuie obținută în îmbunătățirea inteligenței sistemului. Într-un astfel de caz, DSs erau pentru anumite procese de fabricație, iar inteligența sistemului era legată de performanțe nesatisfăcătoare ale intereselor.

În general, un sistem de fabricație transformă materii prime în produse finite, printr-o serie de procese de fabricație. Atunci când o întreprindere urmărește inteligența sistemului pentru a face față schimbărilor și perturbărilor în fluxul său de materiale, sistemele hardware trebuie să aibă flexibilitate și capabilități pentru a se adapta acestor schimbări în procesele de fabricație. Din această perspectivă, încorporarea tehnologiilor digitale din ce în ce mai avansate ajută la îmbunătățirea inteligenței sistemului în ceea ce privește adaptabilitatea și robustețea.

Figura 3.21 arată un caz în care inteligența sistemului a fost definită pentru flexibilitate și adaptabilitate la nivel înalt în tratarea defectelor inevitabile

care apar pe liniile de fabricație. Flexibilitatea și adaptabilitatea sistemului a fost măsurată prin rata de rulare directă (DRR) a produselor, adică procentul de produse care îndeplinesc cerințele de calitate la prima încercare. Un produs poate fi deteriorat din cauza numeroaselor interacțiuni potențiale ale sculelor și pieselor pe liniile de fabricație. Flexibilitatea și adaptabilitatea sistemului au fost măsurate printr-un set de FRs descompuse, prezentate în figura 3.21 și tab. 3.1.

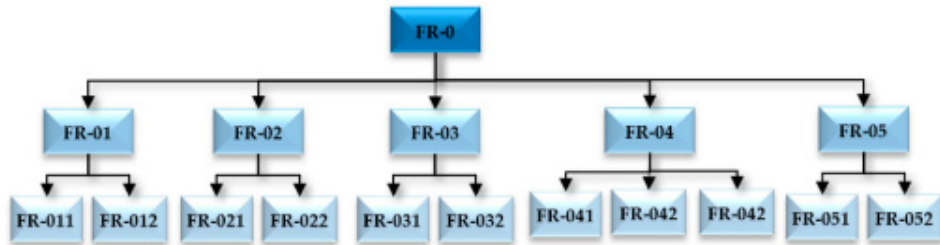


Fig. 3.21. Descompunerea FRs (Bi ș.a., 2021-2)

Tab. 3.1. Semnificațiile FRs descompuse, după (Bi ș.a., 2021-2)

FRs	Descriere
<b>FR-0:</b>	Dezvoltați soluția de îmbunătățire a DRR a liniei de asamblare a camioanelor prin integrarea proceselor AM
<b>FR-01:</b>	Utilizați datele inspecției calității camioanelor pentru defectele de suprafață, identificați sursele (stații de lucru și instrumente de asistență) ale defectelor.
<b>FR-011:</b>	Detectează defectele de suprafață.
<b>FR-012:</b>	Identificați procesele de asamblare problematice și instrumentele de asistență.
<b>FR-02:</b>	Dezvoltați și modelați piese ca soluții de protecție la defectele identificate.
<b>FR-021:</b>	Utilizați informațiile instrumentelor de asistență.
<b>FR-022:</b>	Optimizați designul pentru rezistență, timp de fabricație și cost.
<b>FR-03:</b>	Furnizați soluțiile fizice testate la stațiile de lucru de asamblare în mai puțin de 24 de ore.
<b>FR-031:</b>	Efectuați teste pe părțile fizice pentru rezistența materialului.
<b>FR-032:</b>	Efectuați simulare pentru validarea funcțională și optimizarea procesului.
<b>FR-04:</b>	Standardizați procedura și practica proceselor AM.
<b>FR-041:</b>	Menține funcționarea normală a mașinilor AM.
<b>FR-042:</b>	Furnizați ghiduri și manuale de instruire pentru operatori și proceduri.
<b>FR-043:</b>	Standardizați interacțiunile modulelor funcționale.
<b>FR-05:</b>	Rutinizăți operațiunile mașinilor AM cu ajutorul inventarului, bibliotecii de design, planificarea și programarea lucrărilor de imprimare pentru reducerea costurilor.
<b>FR-051:</b>	Construiți și mențineți biblioteci de proiectare pentru inginerie bazată pe cunoștințe
<b>FR-052:</b>	Gestionează inventarul pieselor de protecție.

Fabricația aditivă (AM) a fost introdusă ca soluție de concepție (DS) pentru a îmbunătăți capacitățile sistemului de fabricație în realizarea de mijloace, atunci când sunt necesare. În soluția dezvoltată au fost introduse imprimante 3D

pentru a produce piese de protecție pentru dispozitivele problematice în care au apărut defecte ale produsului. Au fost dezvoltate un număr de unități DT-II pentru a implementa întregul proces, de la monitorizarea liniilor de fabricație până la detectarea defectelor pe produse, identificarea dispozitivelor problematice, generarea și verificarea modelelor digitale pentru piese de protecție, realizarea pieselor și, în final, până la montarea pieselor cu dispozitivele de asamblare în liniile de fabricație. Potrivit teoriei *Axiomatic Design* (ADT), soluțiile de concepție (DSs) din figura 3.22 au fost dezvoltate pentru a îndeplini cerințele funcționale (FRs) identificate.

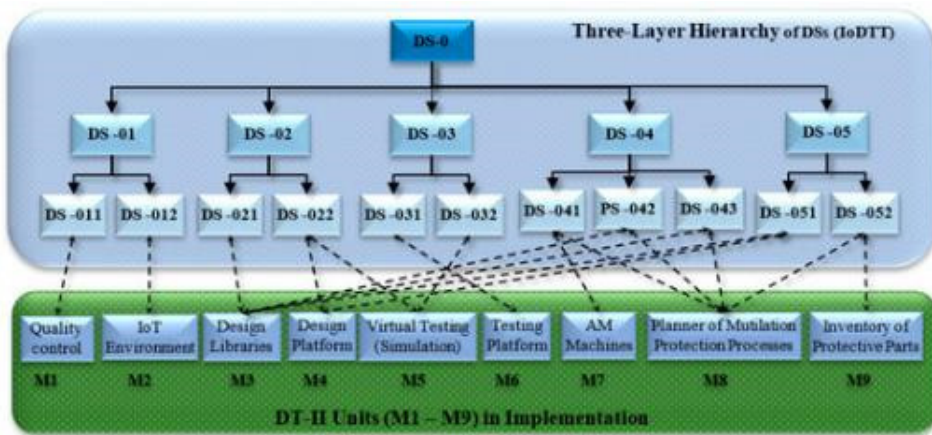


Fig. 3.22. Soluții digitale propuse (Bi ș.a., 2021-2)

### 3.2.4. Concepția unui sistem de fabricație inteligent de tip flux

Deși sistemul de fabricație inteligent de tip flux are relații de cuplare mai puțin complexe între echipamente și resurse, în comparație cu sistemul de fabricație inteligent de tip discret, concepția unui sistem de fabricație inteligent de tip flux are un prag industrial și tehnic ridicat, în funcție de cerințe individualizate, cum ar fi capacitatea de producție, costul de construcție și integrarea echipamentelor vechi.

Concepția unui sistem de producție inteligent de tip flux implică de obicei selecția echipamentelor, proiectarea configurației, planificarea mișcării și a acțiunii, compilarea scripturilor de control, construcția rețelei de control și dezvoltarea motorului de execuție. În contextul de personalizare în masă și

individualizare în masă, schimbarea rapidă a sistemului de fabricație inteligent a devenit din ce în ce mai frecventă și reduce semnificativ ciclul de concepție și configurare a sistemului. O abordare de concepție bazată pe gemeni digitali (*Digital Twin*) pentru sistemele de fabricație inteligente de tip flux, în contextul Industriei 4.0 a fost propusă de Liu ș.a. (2021) și este dezvoltată în cele ce urmează.

### 3.2.4.1. Modelul de concepție a unui sistem de fabricație inteligent de tip flux

Esența procesului de concepție a sistemului de fabricație inteligent de tip flux este maparea domeniilor pentru a satisface nevoile individualizate, cum ar fi constrângerea de plasare, capacitatea de producție, integrarea echipamentelor moștenite și eficiența producției. Relațiile de mapare a domeniilor sunt redată în figura 3.23.

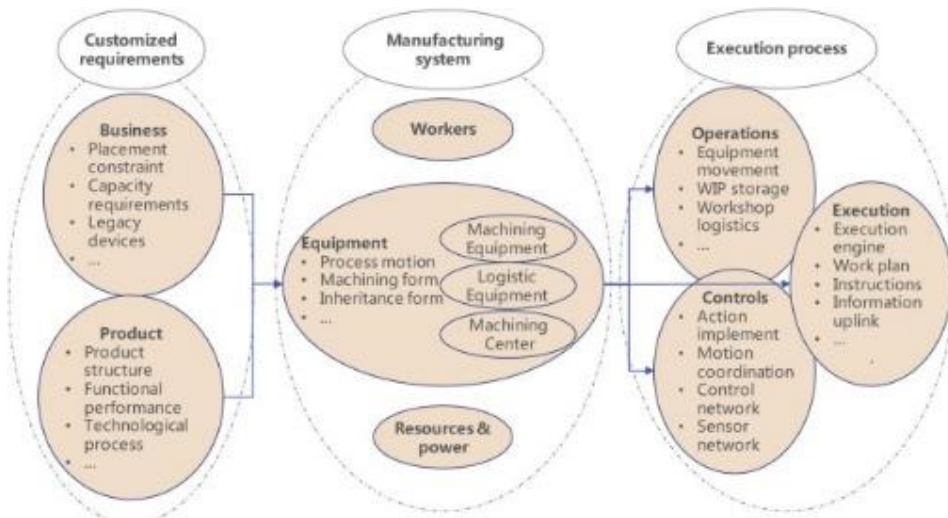


Fig. 3.23. Relațiile de mapare a domeniilor în concepția sistemului de fabricație inteligent de tip flux (Liu ș.a., 2021)

După cum se arată în figura 3.24, există un transfer de similitudine între geometria produsului, procesul de fabricație, mișcarea echipamentului, mișcarea WIP, execuția de fabricație și structura de optimizare cuplată. Asemănarea ar putea fi exprimată abstract la un nivel superior. Pentru a caracteriza similitudinea

unui sistem de fabricație inteligent de tip flux în mod abstract, se folosește **modelul de concepție CMCO** (Configurație-Mișcare-Control-Optimizare).

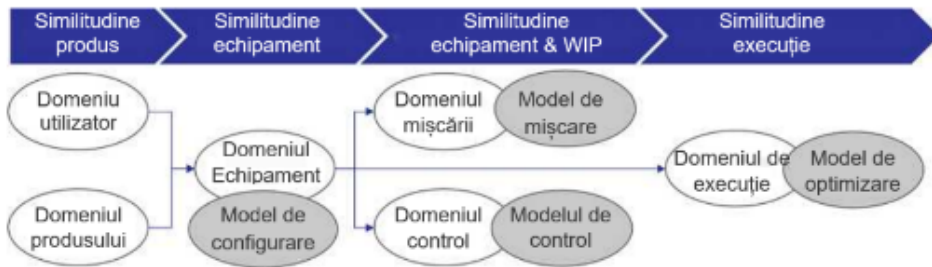


Fig. 3.24. Transferul de similitudine între configurație, mișcare, control și optimizare, după (Liu ș.a., 2021)

**Modelul de configurare** se referă la structura topologică și configurația statică a sistemului inteligent de producție de tip flux, inclusiv planificarea procesului, tipologia și structura spațială a sistemului, selectarea și alocarea echipamentului, precum și relația de conexiune și constrângerile dintre echipamente.

**Modelul de mișcare** se referă la forma de mișcare a sistemului inteligent de fabricație de tip flux, inclusiv forma de mișcare a echipamentului și forma de mișcare a WIP.

**Modelul de control** se referă la structura sistemului de control și la sistemul autonom al sistemului de producție inteligent de tip flux, inclusiv structura rețelei de control industrial, modelul de achiziție și prelucrare a datelor, divizia de unități autonome și setările de control al unității.

**Modelul de optimizare** se referă la problemele de optimizare și structura lor de cuplare în întregul proces de operare a sistemului de fabricație inteligent de tip flux.

În concepția unui sistem de fabricație inteligent de tip flux, cheia pentru îmbunătățirea corectitudinii și rapidității proiectării include reutilizarea eficientă a cunoștințelor, paralelizarea modelelor și coordonarea proceselor. Proiectarea rapidă a unui sistem de fabricație inteligent de tip flux ar putea fi încheiată în patru etape, și anume: proiectarea configurației, planificarea mișcării, dezvoltarea controlului și decuplarea optimizării.

**Proiectarea configurației** se referă la: analiza cerințelor; planificarea procesului; determinarea tipologiei sistemului; tipuri de aspect geometric în funcție de constrângerea spațiului; configurația echipamentului și a tamponului în funcție de prioritatea de funcționare, durata ciclului și balanța de încărcare pe ruta de proces. Un model de mașină-unealtă reconfigurabilă cu arhitectura deschisă care poate fi integrată rapid cu diverse module, este baza în această etapă pentru a obține o reconfigurabilitate rapidă.

**Planificarea mișcării** se referă la: definirea secvenței de mișcare a echipamentelor (echipamente de producție și echipamente logistice); secvența acțiunii de livrare materiale; coordonarea mișcării mai multor procese în funcție de traseul procesului și de cerințele procesului; planificarea rutelor logistice pentru a evita în mod eficient coliziunile și blocajele inutile; planificarea modului de suspendare și cache al WIP, în acord la mișcarea echipamentului.

**Dezvoltarea controlului** se referă la: stabilirea rețelei de control și senzori, a canalelor de informare ascendente, a colectării datelor și a mecanismului de prelucrare în funcție de modelul de configurare și mișcare al producției, astfel încât să se realizeze interconectarea și interoperabilitatea modelului cibernetic, a echipamentelor fizice și a sistemului de control; proiectarea divizării sistemului de control pentru fiecare unitate de producție autonomă în funcție de formele segmentului de proces, astfel încât să se realizeze inteligența decizională online în fiecare model de control al unității. În această etapă s-ar putea utiliza conceptul de arhitectură a transferului de stat (REpresentational State Transfer, REST), pentru a permite sistemului să reconfigureze și să controleze în mod dinamic echipamentele prin utilizarea unui set uniform și predefinit de operațiuni apatride.

**Optimizarea decuplării** se referă la: extragerea problemei de optimizare a procesului de fabricație a fiecărui echipament, problema de mizare a operațiunii conținută în celula de fabricație sau secțiunea procesului și problema planificării producției; analizarea relației lor de cuplare și stabilirea unui sistem de decuplare; dezvoltarea algoritmului de soluție, care, la rândul său, servește ca motor de execuție care conduce funcționarea sistemului de fabricație. Această etapă este crucială pentru realizarea capacităților inteligente ale sistemului de fabricație din Industria 4.0.



Arhitectura modelului de concepție CMCO (fig. 3.25) se prezintă sub forma unei modalități de optimizare iterativă ierarhică, în care fiecare proces de iterație respectă obiectivul specific de proiectare și constrângerile optimizării.

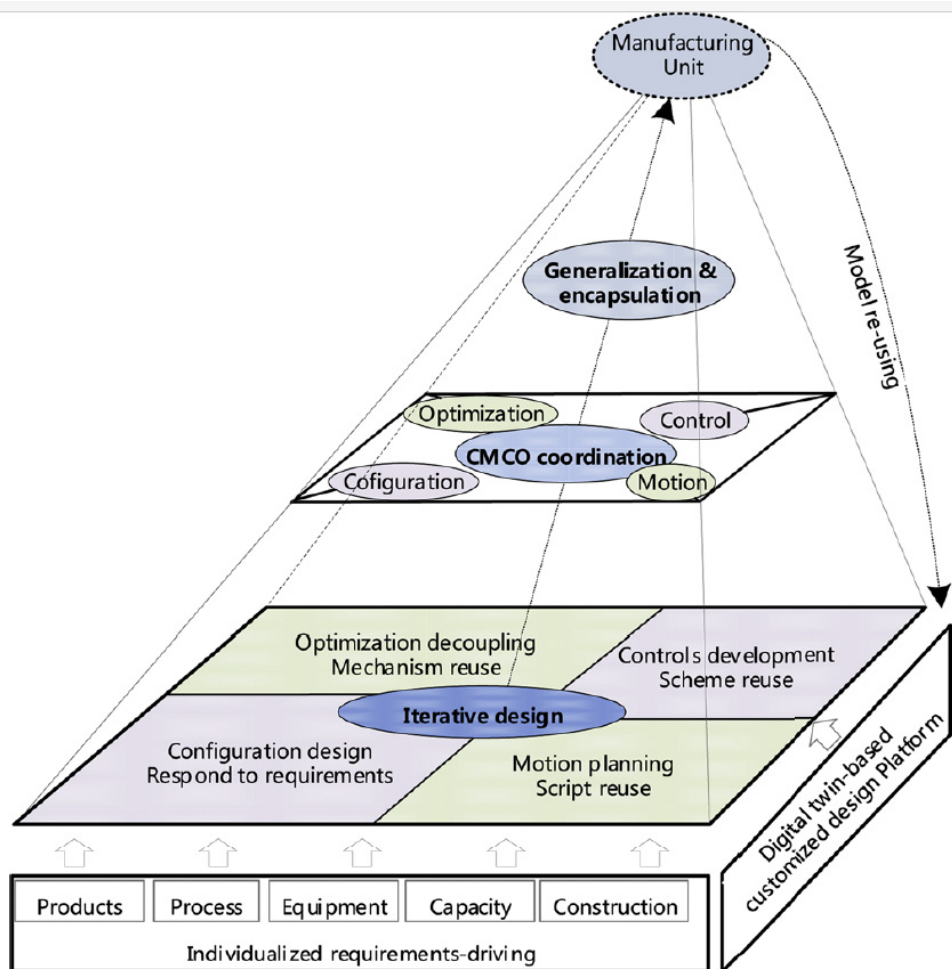


Fig. 3.25 Arhitectura modelului de concepție CMCO (Liu ș.a., 2021)

După cum se arată în figura 3.26, arhitectura de concepție CMCO ar putea fi refăcută ca o structură bi-nivel. Designul configurației și planul de mișcare pot fi rezumate ca nivel de proiectare fizică. Dezvoltarea controlului și decuplarea optimizării pot fi rezumate ca nivel de proiectare logică. După implementarea proiectării logice, evaluarea performanței sistemului, reglarea flexibilității și



fragilitatea/robustețea sistemului pot fi efectuate pentru a îmbunătăți performanța operațională a proiectării logice.

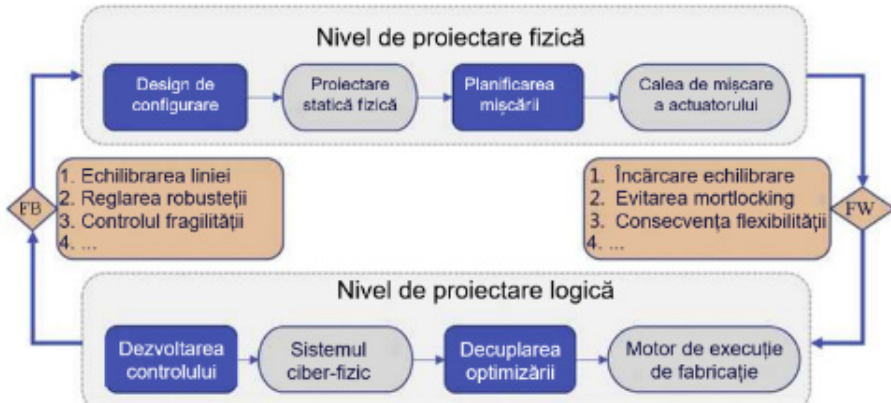


Fig. 3.26. Iterație bi-nivel a modelului de concepție CMCO, după (Liu ș.a., 2021)

#### 3.2.4.2. Simularea unui sistem de fabricație inteligent de tip flux

Geamănul digital (*Digital Twin*) pentru simularea *hardware-in-the-loop* a unui sistem de fabricație inteligent de tip flux este stabilit prin construirea unui *down-link* în timp real în canalul de construcție și a canalului de date *up-link* pentru a realiza vizualizarea multiplă (adică vizualizarea fizică, vizualizarea simulării, vizualizarea execuției și vizualizarea monitorizării). Sincronizarea în timp real realizează interconectarea și capacitatea de interoperabilitate a modelului cibernetic și a echipamentelor fizice, așa cum se arată în figura 3.27.

Diferit de metoda tradițională de simulare off-line, geamănul digital integrează simularea *hardware-in-the-loop* cu modelul de proiectare optimizat prin:

- sincronizarea sistemului cibernetic și fizic, și anume, stabilirea canalului de comandă și informare între motorul de execuție (vizualizare) și modelul de simulare (vizualizare), astfel încât motorul de execuție să poată controla nu numai mișcarea echipamentului fizic, ci și modelul de simulare;
- optimizarea Iterativă între configurația statică și execuția dinamică, și anume efectuarea unei „ajustări-executare-analiză-executare” pentru a

asigura o optimizare echilibrată a schemei de configurare și a motorului de execuție.

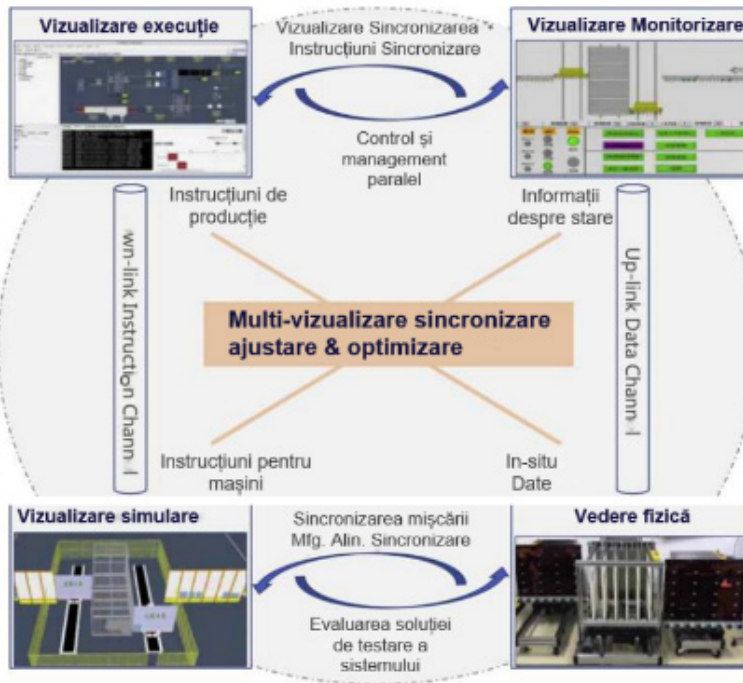


Fig. 3.27. Sincronizare multi-vizualizare pentru construirea unui gemăn digital al sistemului de fabricație inteligent de tip flux, după (Liu ș.a., 2021)

Geamănul digital se bazează pe:

- modelarea geometrică, și anume, sistemul de fabricație inteligent de tip flux, iar relația dintre echipamente este modelată geometric și semantic;
- modelarea matematică, care se bazează pe abstractizarea matematică a parametrilor capacității, modul de control și relațiile de echipare ale sistemului;
- optimizarea calculului, și anume, algoritmul de optimizare inteligent corespunzător este dezvoltat ca motor de execuție a sistemului în conformitate cu modelul matematic stabilit. Pe de o parte, geamănul digital poate realiza în mod rezonabil simularea *hardware-in-the-loop* pentru înlocuirea testării fizice, reducând ciclul de verificare și

costurile. Pe de altă parte, poate, de asemenea, să optimizeze configurația și execuția în mod sincron și, în cele din urmă, să producă schema de proiectare și motorul de execuție, care pot sprijini implementarea rapidă a sistemului de fabricație inteligent de tip flux.

### 3.2.4.3. Prototipul de sistem *Digital Twin*

Verificarea raționalității unui sistem de producție inteligent de tip flux este de obicei efectuată continuu în procesul de proiectare și implementare. Costul verificării fizice este costisitor din cauza transportului și asamblării costisitoare a echipamentelor și a creșterii timpului de proiectare. Pentru a îmbunătăți capacitatea actuală de analiză insuficientă a procesului de execuție a producției, pentru concepția sistemului de fabricație inteligent de tip flux este propus un prototip de sistem *Digital Twin* (fig. 3.28), dezvoltat pe baza motorului de vizualizare Unity3D (<https://unity.com/>), care afișează configurația modelului de simulare, aspectul și calea logistică, mișcarea echipamentului/WIP și procesul de operare al sistemului de fabricație inteligent de tip flux.

Sistemul *Digital Twin* ar putea oferi modele diferite de sisteme de fabricație. Acesta poate colecta, colecta și utiliza date în timp real pentru a simula procesul de fabricație. Acesta cuprinde ca module: *Requirements Analysing Module*, *Resource Analysing Module*, *Decision Engine* și *Deployment Module*. Toate aceste patru module sunt dezvoltate în limbajul C# programming bazat pe două tehnologii generice esențiale, și anume încapsularea generalizată a modelelor CMCO și tehnologia de sincronizare multi-vizualizare.



Fig. 3.28. Prototipul de sistem *Digital Twin* (Liu ș.a., 2021)

Încapsularea generalizată a modelelor CMCO ar putea sprijini testarea și reconfigurarea la distanță a echipamentelor de la diferiți furnizori. Pentru a realiza sincronizarea mișcării și mișcării între modelul digital și echipamentul fizic este stabilit un canal de comunicare în rețea extins între modelul digital și echipamentul fizic. Tehnologia de sincronizare multi-vizualizare asigură interacțiunea în timp real între echipamentul fizic și modelul digital în intervalul de precizie necesar. El elimină influența perioadei de eșantionare asincronă și a timpului de comunicare PLC între echipamentele fizice și modelul digital pentru a realiza o monitorizare paralelă transparentă a sistemului de fabricație.

Pe lângă aplicarea fundamentală ca simulare *hardware-in-the-loop* de înaltă fidelitate a proceselor și echipamentelor fizice, sistemul *Digital Twin* se caracterizează prin capacitatea sa unică de testare a integrării distribuite a întregului sistem de fabricație inteligent de tip flux, care suportă echipamente multi-furnizor integrate cu un model digital dublu pentru evitarea blocajelor, scurtarea ciclului de integrare și reducerea costurilor de integrare.

### **3.3. Dezvoltarea sistemelor de fabricație reconfigurabile**

#### **3.3.1. Reconfigurarea sistemului de fabricație**

Sistemul de fabricație inteligent (SMS) este un tip de sistem reconfigurabil sustenabil în timp. O configurație de sistem a unui sistem de fabricație reconfigurabil (RMS) constă dintr-un set de blocuri funcționale care sunt selectate și asamblate din activele de producție fizice și virtuale disponibile pentru sarcini specifice. Un sistem reconfigurabil permite adăugarea, îndepărtarea și modificarea modulelor funcționale fără a afecta funcțiile altor module, iar acest lucru ajută la scalarea capacității de producție.

##### *3.3.1.1. Metode de reconfigurare*

În ceea ce privește metodele de reconfigurare, acestea ar putea fi clasificate în două categorii, și anume (Leng ș.a., 2020):

- metode de raționament bazate pe cunoștințe;
- metode de optimizare bazate pe inteligență artificială.

Pentru primul tip, tehnologiile de automatizare a cunoștințelor ale RMS au atras un interes considerabil. Se disting astfel:

- abordarea de agent bazată pe ontologie pentru a realiza reconfigurarea rapidă;
- folosirea unui indice opțional de măsurare a schemei de reconfigurare a ratei de utilizare a resurselor și a timpului de reconfigurare bazat pe teoria Axiomatic Design (ADT);
- reconfigurarea bazată pe modelul de joc; s-a adoptat o strategie de inspecție periodică pentru a obține stările de supraîncărcare și subîncărcare ale mașinii, pentru a ghida procesul decizional în mod dinamic;
- strategia de întreținere a oportunităților RMS, cu luarea în considerare a ferestrei de întreținere a oportunității în procesul reconfigurabil;
- reconfigurare automată a controlerelor de rețea Petri pentru sisteme de fabricație reconfigurabile cu o abordare îmbunătățită bazată pe sistemul de rescriere a rețelei.

Metodele de optimizare de al doilea tip se bazează pe utilizarea tehnicilor avansate de inteligență artificială, cum ar fi *Deep Learning* și *Big Data Analytics*:

- optimizarea integrată a procesului de planificare pentru RMS;
- integrarea reconfigurării sistemului cu planificarea producției și concepția produsului.

### ***3.3.1.2. Reconfigurare rapidă digitală prin intermediul unui model de arhitectură deschisă***

Tehnologiile digitale gemene (*Digital Twin*) oferă un instrument de simulare online puternic pentru a sprijini reconfigurarea sistemului de fabricație (Tao ș.a., 2018-2).

Leng ș.a. (2020) propun o abordare digitală bazată pe gemeni pentru reconfigurarea rapidă a sistemelor de fabricație automate. Prin intermediul unei platforme de reconfigurare rapidă digitală, metoda formează o nouă reconfigurare după ce analizează diferența dintre două produse și deduce dacă sistemul actual poate fabrica produsele date.

Metodologia integrează planificarea procesului cu controlul execuției prin utilizarea unui sistem *Digital Twin* care se ocupă de procesul de reconfigurare la nivelul încorporat al sistemului de fabricație. Programarea pe două niveluri a reechilibrării productivității de nivel superior și a costurilor de

reconfigurare la nivel inferior este integrată pentru obținerea unei soluții optime de reconfigurare. În cele din urmă, se realizează o implementare fizică pentru a verifica eficacitatea abordării propuse în ceea ce privește obținerea performanței îmbunătățite a sistemului, minimizând în același timp cheltuielile generale ale procesului de reconfigurare prin automatizarea și optimizarea rapidă a acestuia.

Așa cum se arată în figura 3.27, un RMS poate fi ușor reconfigurat la nivel de sistem (schimbarea configurației aspectului), la nivelul mașinii (adăugarea unui dispozitiv nou) și la nivelul de control (integrarea unui nou modul de programare) (Leng ș.a., 2020).

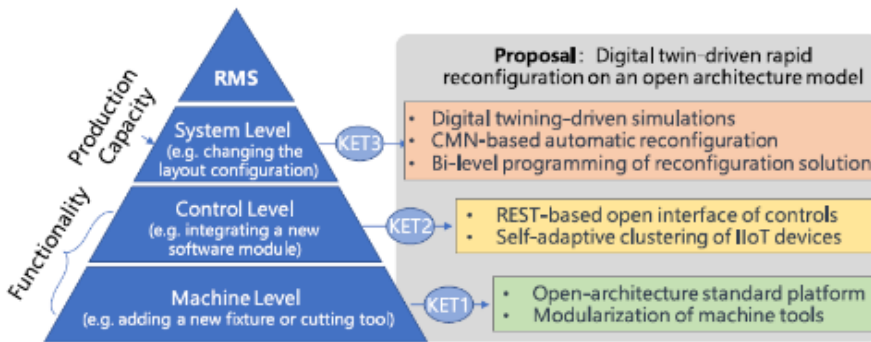


Fig. 3.29. Tehnici de abilitare cheie (KET) în reconfigurarea digitală bazată pe *Digital Twin* (Leng ș.a., 2020).

Capacitatea de reconfigurare la nivel de mașină este baza RMS pentru obținerea funcționalității. RMS este o combinație de mașini CNC, mașini dedicate și mașini-unelte reconfigurabile (*Reconfigurable Machine Tool*, RMT). RMT este componenta critică pentru realizarea reconfigurabilității sistemului de fabricație.

O arhitectură deschisă a RMT, numită mașină-unealtă cu arhitectură deschisă (*Open-Architecture Machine Tool*, OAMT), este definită ca o platformă standard fixă și diverse module individualizate care pot fi adăugate și schimbate rapid, module independente, actualizabile și interschimbabile, care funcționează reciproc între ele conform unui set de interfețe interne și/sau externe bine definite prin standarde deschise și/sau disponibile sub o licență *open source*.

După cum se arată în figura 3.30, OAMT include o platformă și module standardizate *plug-and-play*: canal de procesare extensibil, dispozitiv modular

reconfigurabil, dispozitiv de circulație *plug-and-play* și buffer intermitent reglabil.

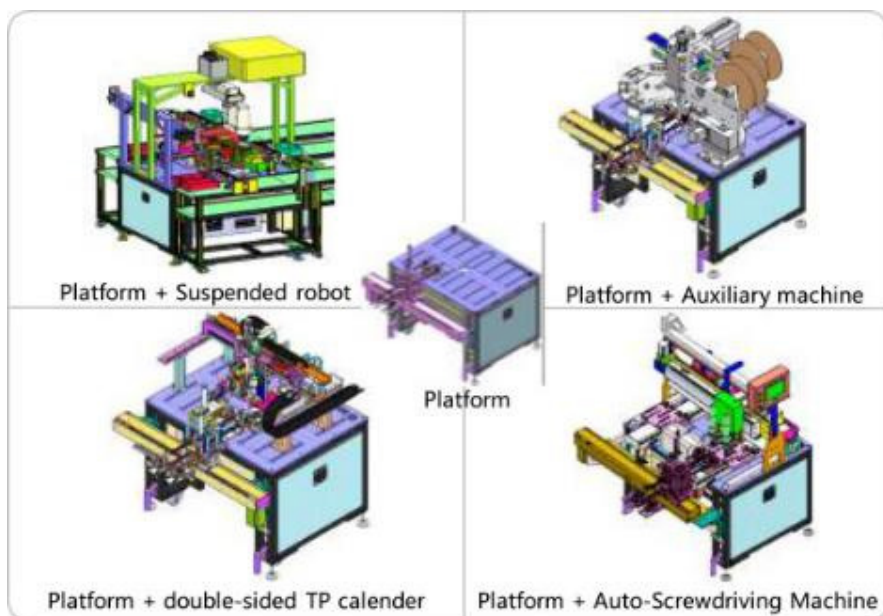


Fig. 3.30. Platformă standardizată care se integrează cu diverse module  
(Leng ș.a., 2020)

Capacitatea de reconfigurare îmbunătățită rezultată din arhitectura deschisă implică necesitatea modelării acestui echipament de fabricație reconfigurabil (inclusiv elemente, parametri și componente reconfigurabile), ceea ce duce la un spațiu de calcul mai mare atunci când se caută o soluție optimă de reconfigurare pentru produsul dat. Prin urmare, este nevoie de un algoritm de optimizare eficient.

Modelarea matematică a RMS este o rețea de fabricație complexă (*Complex Manufacturing Network, CMN*) cu trei straturi, și anume stratul de piese, stratul de activitate și stratul de resurse, și este folosită ca fundament teoretic al reconfigurării computaționale. Pe baza modelării CMN, analiza complexă a rețelei va fi utilizată pentru evaluarea metricilor de sistem ale fiecărei soluții de reconfigurare, precum și pentru ghidarea procesului de optimizare.

Modelarea RMS bazată pe OAMT solicită un sistem IIoT reutilizabil și extensibil (include în principal resurse de senzori) pentru reconfigurare flexibilă

în aplicațiile software. Pentru a satisface nevoile de partajare a datelor resurselor eterogene subiacente din diferite aplicații software este necesar să se proiecteze un model flexibil de organizare a resurselor în platforma *middleware* a sistemului IIoT al RMS. Toate obiectele operaționale sunt abstractizate ca resurse în stilul arhitectural *REpresentational State Transfer* (REST).

Stabilirea unui sistem *Digital Twin* integrat pentru depanarea reconfigurării virtuale este esențial pentru scurtarea ciclului de timp al trecerii la fabricație. Geamănul digital cuprinde două părți, simularea semi-fizică care mapează datele sistemului și furnizează date de intrare pentru a doua parte, care este optimizarea. Rezultatele părții de optimizare sunt transmise înapoi la simularea semi-fizică pentru verificare.

### 3.3.1.3. Modelare reconfigurabilă digitală

Sistemele de fabricație bazate pe *Digital Twin* (DT) și robotică contribuie la îmbunătățirea inteligenței, eficienței și siguranței acestora. Zhang ș.a. (2021) au propus o abordare de modelare reconfigurabilă activată de *Digital Twin*, inclusiv un model de fuziune în cinci dimensiuni pentru sistemele de fabricație inteligente. Această soluție nu numai că reduce semnificativ costul forței de muncă și timpul pentru reconfigurarea sistemelor de fabricație complexe bazate pe DT și robotică, dar scurtează și perioada de concepție și optimizare a acestora.

Cadrul sistemului de fabricație bazat pe geamăn digital reconfigurabil (*Reconfigurable Digital Twin based Manufacturing System*, RDTMS), așa cum se arată în figura 3.31, este de a construi sisteme de fabricație bazate pe DT cu fidelitate ridicată, practicabilitate ridicată, flexibilitate ridicată, inteligență ridicată și capacitate ridicată de reconfigurare.

Modelul de fuziune în cinci dimensiuni al entității virtuale DT (*Digital Twin Virtual Entity*, DTVE) este nucleul RDTMS, așa cum se arată în figura 3.32, care descrie în mod realist informațiile, capabilitățile și regulile aferente diferitelor resurse de fabricație și medii ale spațiului fizic (Zhang ș.a., 2019).

Avantajele sistemului de fabricație bazat pe DT față de cel tradițional sunt:

- poate vizualiza procesul de fabricație și datele aferente;
- poate realiza controlul reciproc al sistemului de fabricație virtual și al sistemului de fabricație fizic în timp real în timpul funcționării sincrone;



- poate analiza și partaja datele despre produse și datele de fabricație;
- poate integra și fuziona date cu factor complet, proces complet și servicii complete;
- poate proiecta, evalua și optimiza produse în mediul virtual.

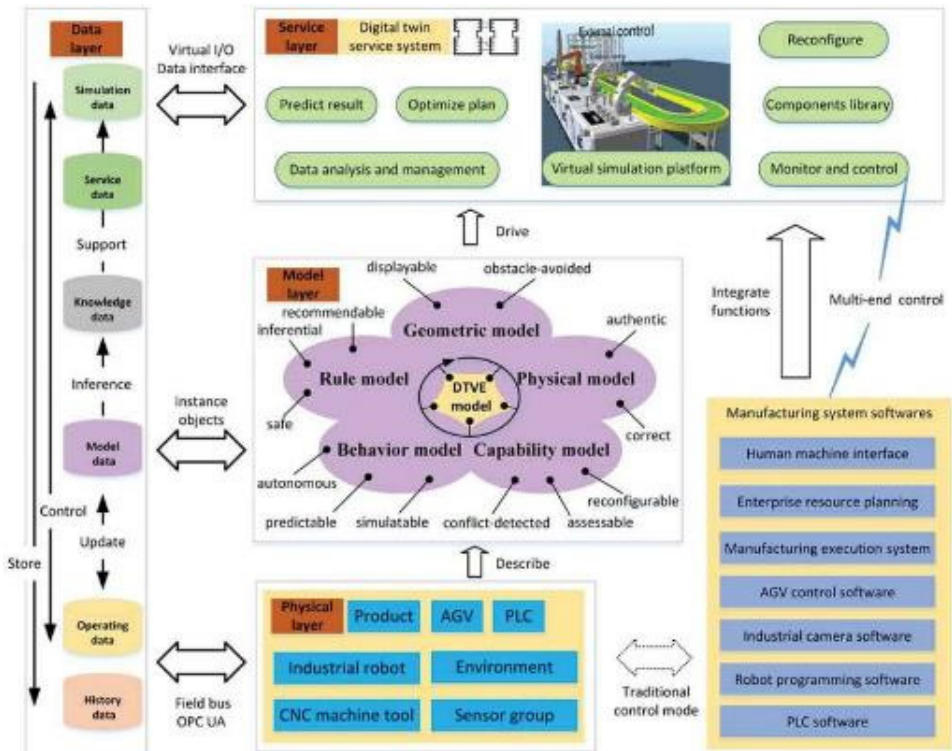


Fig. 3.31. Cadrul de fuziune bazat pe modele cinci dimensiuni a RDTMS (Zhang ș.a., 2021)

De asemenea, sistemul dobândește următoarele capacități puternice:

- poate obține cunoștințe despre structura sistemului prin parametrii modelului de inferență;
- poate reconfigura RDTMS automat și rapid;
- poate obține noi funcții de sistem bazate pe o combinație flexibilă de SFB.

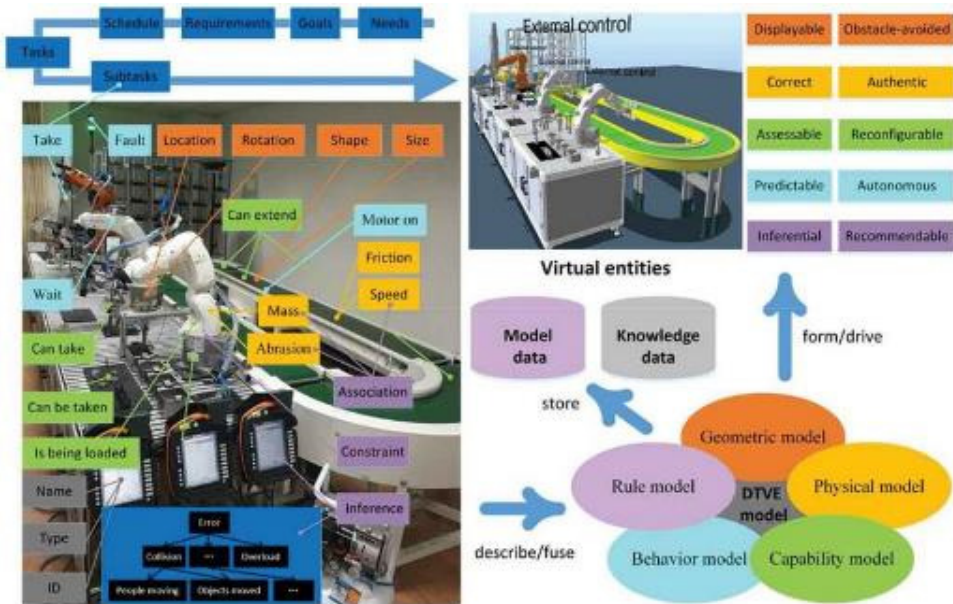


Fig. 3.32. Modelul de fuziune în cinci dimensiuni al DTVE (Zhang ș.a., 2019)

Pentru a implementa capacitățile de mai sus, sunt propuse cadrul RDTMS și modelul în cinci dimensiuni al DTVE (Zhang ș.a., 2019), (Zhang ș.a., 2021).

Cadrul RDTMS are următoarele caracteristici:

- design modular bazat pe SFB;
- maparea bidirecțională în timp real, bazată pe modele de fuziune în cinci dimensiuni, între spațiul fizic și cel digital;
- conexiune bazată pe date între serviciile DT și controlul fizic.

Cadrul conține în principal patru straturi:

- stratul fizic, care constă din echipamente de fabricație, senzori, mediu etc.;
- stratul de model, care conține modelul de fuziune în cinci dimensiuni și entități virtuale instanțiate de datele în timp real și informațiile de bază, care descrie toate tipurile de entități din stratul fizic;
- stratul de servicii, care este și interfața om-calculator, este compus din tipuri de servicii și funcții în RDTMS;

- stratul de date include diverse baze de date, structuri de date și fluxuri de date, care integrează date eterogene în timp real și informații din cele trei straturi de mai sus și publică date valoroase celorlalte entități și servicii desemnate ca conexiuni între diferite straturi.

Modelul DTVE are cinci dimensiuni, inclusiv model geometric (GM), model fizic (PM), model de capacitate (CM), model de comportament (BM) și model de reguli (RM). Aceste cinci modele sunt construite independent pe baza diferitelor tipuri de obiecte și pot fi proiectate de diferiți experți. Procesul de fuziune a acestora în DTVE se bazează pe tipuri și pe informațiile lor de bază.

O caracteristică evidentă a sistemului de fabricație bazat pe DT este că operatorii pot observa întreaga scenă și procesul de fabricație al sistemului fizic de fabricație în detalii folosind realitatea virtuală și realitatea augmentată, ceea ce face monitorizarea și managementul mai eficiente, intuitive și precise.

Fiecare entitate din sistemul fizic de fabricație are operațiuni specifice pentru a efectua un proces complet de fabricație sau pentru a implementa unele funcții. Entitățile virtuale care au capacități de producție, cum ar fi roboții industriali și mașinile-unelte cu control numeric computerizat, ar trebui tratate ca unități funcționale independente care pot efectua o serie de acțiuni autonome în condiții specificate.

Problemele reconfigurabile în RDTMS au patru niveluri, inclusiv cele trei granularități de reconfigurare a părții fizice în RDTMS și unul dintre servicii. Reconfigurarea la nivelul sistemului de fabricație este implementată pe baza a patru acțiuni de bază reconfigurabile: adăugare, ștergere, înlocuire și ajustare. Cunoașterea structurii sistemului este necesară atunci când sunt efectuate cele patru acțiuni de bază de reconfigurare de mai sus, în special pentru acțiunea de adăugare.

Reconfigurarea este unul dintre cele mai complexe servicii în RDTMS pentru a implementa diferite tipuri de funcții și pentru a sprijini funcționarea normală a sistemului.

### **3.3.2. Sistem de fabricație reconfigurabil pentru individualizarea în masă**

Sistemul de fabricație reconfigurabil (*Reconfigurable Manufacturing System*, RMS) tradițional pentru producția de volum mare se concentrează pe îmbunătățirea capacității de răspuns a sistemului la piețele în schimbare și

sustenabilitatea acestuia în producerea mai multor generații de produse cu un randament ridicat. După cum se arată în figura 3.33, o arhitectură RMS tradițională constă din mai multe etape conectate în serie, în care fiecare etapă este compusă din mașini paralele identice care efectuează operații identice.

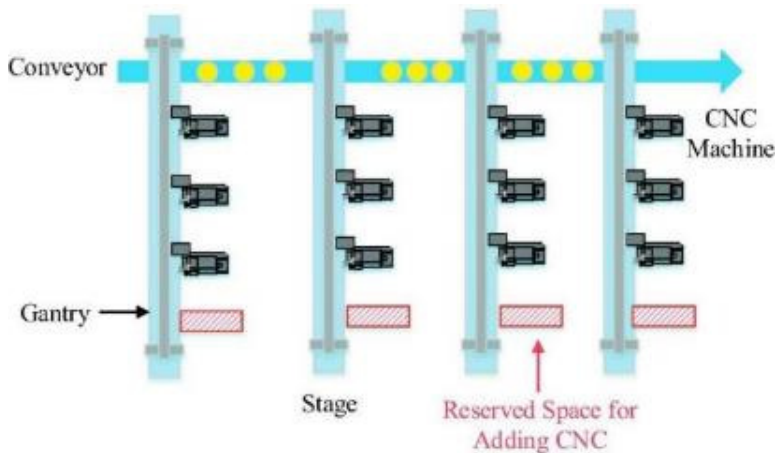


Fig. 3.33. Arhitectură RMS pentru fabricație de mare volum (Koren ș.a. (2018))

Aceste mașini pot fi mașini CNC, mașini reconfigurabile sau mașini de inspecție. Mașinile sunt integrate prin intermediul unor portaluri (unul pe treaptă) și un transportor înainte (sau portal) care deplasează piesele prin sistem. Tamponarele sunt construite între etape. Acest sistem de manipulare a materialelor oferă arhitecturii RMS un nivel ridicat de flexibilitate. Principala provocare în producerea unei varietăți de produse individualizate este aceea că variația timpului ciclului crește dramatic, ceea ce, în consecință, scade eficiența RMS-urilor tradiționale (Koren ș.a. (2018)).

Pentru a face față acestei provocări, Gu și Koren (2018) prezintă o nouă arhitectură de sistem care poate îndeplini cerințele paradigmei de individualizare în masă – adică o arhitectură care poate oferi o fabricație de volum redus/mix mare la costuri accesibile. Această arhitectură este modificată pe baza unui RMS tradițional, astfel încât posedă și cele șase caracteristici de bază ale RMS (Koren ș.a., 2018).

Un exemplu de arhitectură propusă de Gu și Koren (2018) este reprezentat în figura 3.34, unde etapa A conține mașini de frezat CNC, etapa B mașini de fabricare aditivă, etapa C un alt tip de mașini CNC, etapa D mașini de inspecție,

iar asamblarea diferitelor părți se face în etapa E fie de oameni, fie în colaborare om-robot. În acest exemplu, patru variante diferite de produs sunt produse simultan.

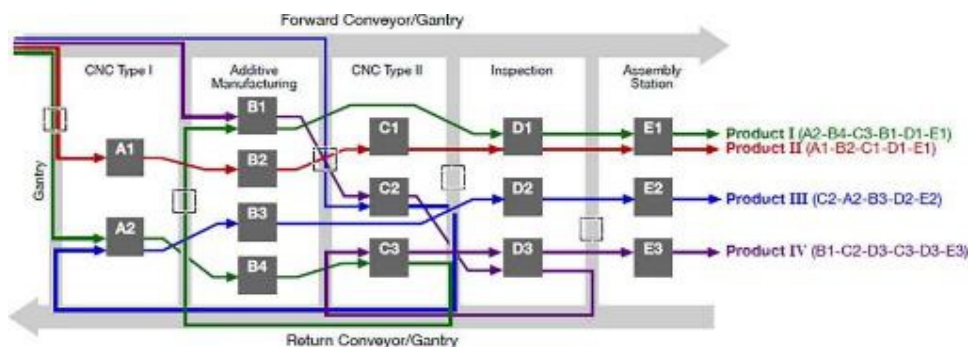


Fig. 3.34. O arhitectură RMS pentru individualizarea în masă (Gu și Koren, 2018)

Principala diferență arhitecturală dintre RMS tradițional și arhitectura propusă pentru individualizarea în masă este adăugarea transportorului de retur (sau portalului de retur) care poate transfera piesele înapoi. Prin implementarea atât a transportoarelor înainte cât și retur, produsele pot fi procesate în trasee extrem de flexibile, îmbunătățind substanțial eficiența sistemului și utilizarea resurselor. Mutarea pieselor înapoi este utilă dacă o piesă care este procesată pe CNC (C2, de exemplu), trebuie transferată la CNC A2 pentru procesare ulterioară, (de exemplu, Produsul III) sau dacă o piesă nu reușește, inspecția și este necesară o corecție (de exemplu, Produsul IV este detectat de către stația de inspecție D3 ca fiind neconform și este trimis înapoi la etapa C prin transportorul de retur pentru Reprocesare).

Variația mare a timpului de procesare pentru produsele individualizate crește timpul de așteptare a produsului în sistem. Pentru a face față acestui lucru, în arhitectura propusă sunt necesare tamponuri cu capacități relativ mari.

### 3.3.3. Sistem de fabricație inteligent auto-reconfigurabil

Sistemele de fabricație inteligente trebuie să se reconfigureze rapid pentru a satisface cerințele tot mai mari ale clienților, în condițiile personalizării inteligente, a personalizării și individualizării în masă. Lee și Ryu (2022) propun un sistem de fabricație inteligent auto-reconfigurabil (*Smart Self-Reconfigurable Manufacturing System*, SSRMS) bazat pe un sistem de fabricație fractal (*Fractal*

*Manufacturing System*, FrMS). SSRMS prezintă o structură fractală, care permite distribuirea caracteristicilor de control; aceasta constituie și baza fundamentală a funcționării autonome și reconfigurării între fiecare fractal. Arhitectura SSRMS include utilizarea de date mari, facilități digitale și simulări.

### ***3.3.3.1. Arhitectura sistemului de fabricație inteligent auto-reconfigurabil***

Majoritatea analizelor, optimizărilor și funcțiilor autonome pentru sistemele de fabricație inteligente (SMS) se bazează pe date care pot fi obținute din diverse surse, inclusiv echipamente, sisteme moștenite, mediu etc. Prin urmare, sistemul de fabricație inteligent auto-reconfigurabil (SSRMS) implică și conceptul de sistem de fabricație inteligent bazat pe date.

Caracteristicile sistemului de fabricație *Smart Self-Reconfigurable* (SSRMS) sunt următoarele:

- auto-asemănarea, este o caracteristică unică a structurii fractale, în care întreaga formă și forma parțială sunt similare;
- auto-organizarea, se referă la abilitatea prin care fiecare unitate fractală poate dezvolta procesul de fabricație prin ea însăși prin orientarea spre obiectiv. Fiecare fractal are suficiente informații cu privire la datele de performanță ale fiecărui fractal, relația de precedență și scopul sistemului; astfel, sistemul poate organiza procesele de fabricație;
- orientarea spre obiectiv, permite fiecărui fractal să determine un scop individual în cadrul obiectivului sistemului; dacă fractalul de cel mai înalt nivel poate decide singur obiectivul, atunci și ceilalți fractali pot determina singuri scopul, deoarece fiecare fractal are aceeași structură logică;
- auto-învățarea, este una dintre caracteristicile critice pentru reconfigurarea unui sistem de producție; implică faptul că fiecare fractal poate salva și învăța din deciziile trecute și, astfel, poate lua o mai bună luare a deciziilor, în comparație cu deciziile anterioare, pentru a-și îmbunătăți performanța;
- auto-decizia, se referă la abilitatea prin care fiecare fractal poate decide comportamentul, scopurile și negocierea dintre fractali;
- auto-reglementarea, este o caracteristică a unui sistem bazat pe date, iar rolul său implică controlul echipamentului pe baza datelor interne;

- auto-execuția, are ca scop controlul echipamentului prin date interne și externe.

Pe baza caracteristicilor menționate, arhitectura concepută pentru un SSRMS se prezintă în figura 3.35.

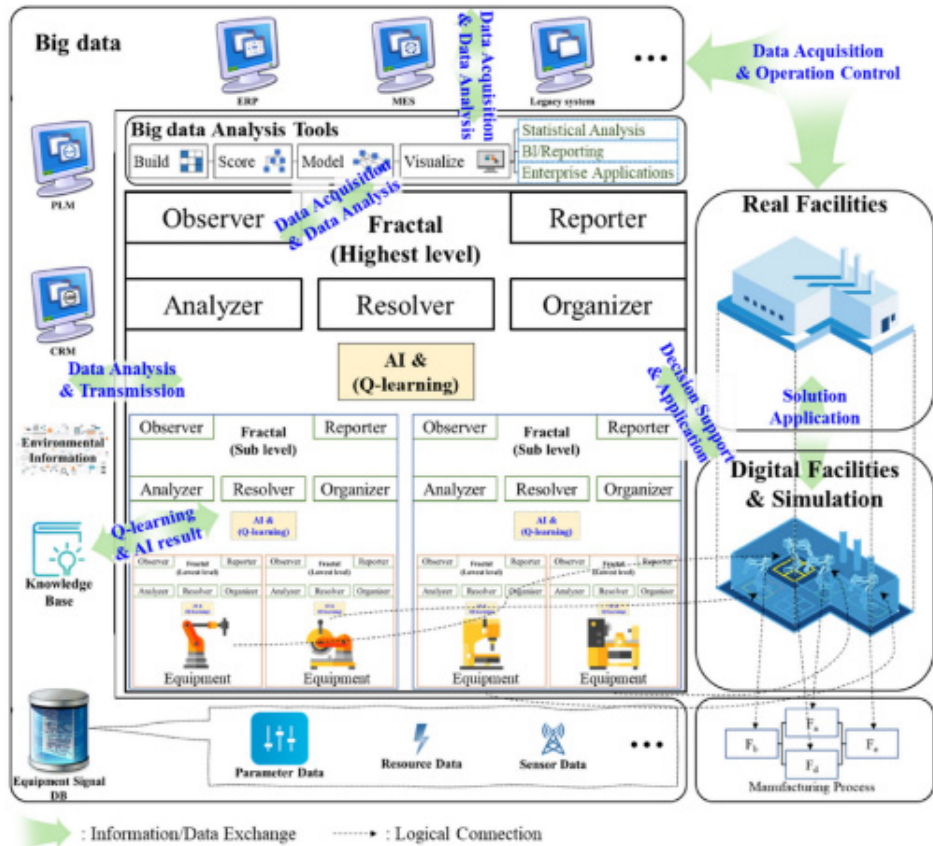


Fig. 3.35. Arhitectura SSRMS (Lee și Ryu, 2022)

Arhitectura propusă constă din date mari, instrumente de analiză a datelor mari, gemeni digitali (simulare) și o structură fractală. Structura fractală prezintă o formă recursivă, în care fractalul de cel mai înalt nivel (super-fractal) este format din doi fractali (sub-fractali). În plus, acești fractali cuprind fractalul de nivel inferior (nivelul cel mai scăzut). Fiecare fractal are cinci agenți: observatorul, reporterul, analizatorul, rezolvitorul și organizatorul. De asemenea, SSRMS încorporează un modul AI și Q-learning pentru a sprijini agentul de



rezolvare. El execută căutarea de noi obiective, negocierea între fractali, optimizarea statusului fractal, auto-învățarea și procesele de restructurare. Facilitățile și simulările digitale sunt câteva forme ale geamănului digital. Înainte ca SSRMS să adopte un nou obiectiv, structură sau proces de fabricație, facilitățile și simulările digitale sunt utilizate pentru a simula facilitățile digitale cu soluția derivată. Aceste facilități digitale pot ajuta la îmbunătățirea stabilității fabricii, la reducerea pierderilor accidentale și la îmbunătățirea acurateței auto-învățării.

Big Data cuprind date despre echipamente, baza de cunoștințe, informații despre mediu și datele sistemului moștenit. Datele echipamentelor sunt colectate folosind semnalul echipamentului din baza de date, care constă din datele senzorului, datele parametrilor, datele despre utilizarea energiei, datele despre utilizarea resurselor, datele rezultatelor negocierilor, meta-datele AI antrenate, datele despre starea de optimizare a fiecărui fractal etc. Baza de cunoștințe conține informații și date esențiale necesare pentru inteligențizarea sistemului de fabricație cu auto-reconfigurare. În plus, informațiile de mediu includ cantități semnificative de informații ambigue din lumea reală, cum ar fi tendințele costului materialelor, informații despre bursă, știri despre noi tehnologii și alte informații care pot afecta sistemul de producție.

Figura 3.36 ilustrează modelarea bazată pe date a datelor mari în SSRMS.

Datele necesare pentru reconfigurarea procesului sau modificările obiectivelor sunt furnizate de sistemele moștenite, informațiile despre mediu și BD de semnal de echipament. Reconfigurarea procesului și schimbarea scopului sunt efectuate prin modelul de decizie a obiectivului, modelul de negociere și metoda de evaluare a durabilității în fractal. Rezultatul reconfigurării acestui proces și al schimbării scopului este apoi restaurat în baza de cunoștințe. Instalațiile digitale execută simulări pentru a verifica rezultatele din fractali. În plus, facilitățile reale aplică reconfigurarea procesului și schimbarea obiectivului folosind fractali. Aceste noi obiective și procesele de fabricație sunt apoi actualizate la toți fractalii.

### ***3.3.3.2. Metode de auto-reconfigurare în SSRMS***

Pentru reconfigurarea procesului se pot folosi trei metode.



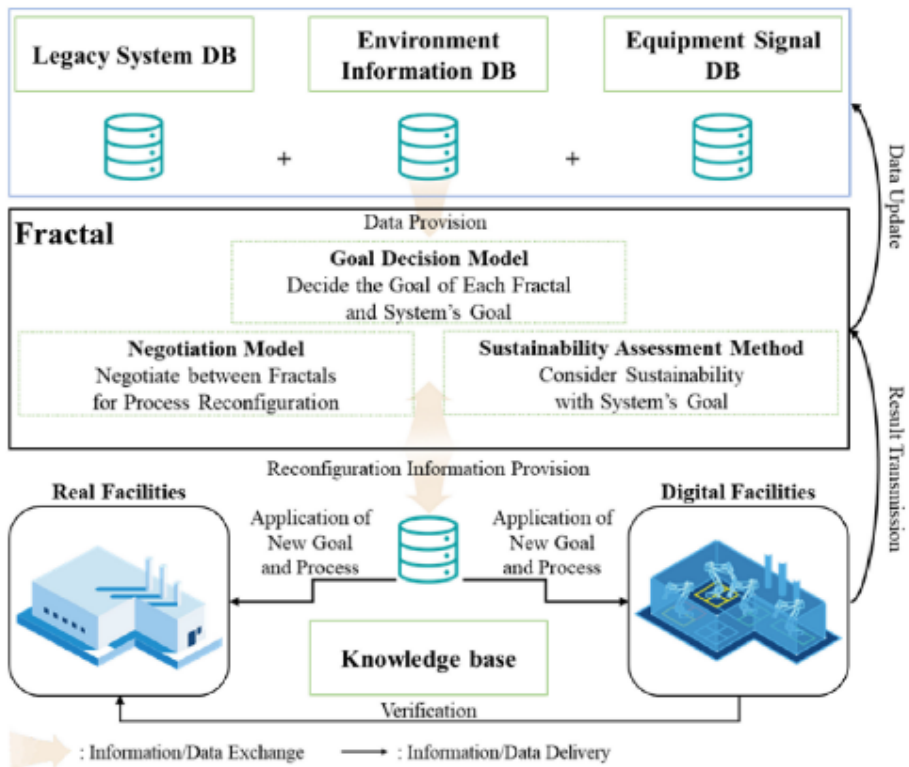


Fig. 3.36. Modelarea bazată pe date a datelor mari pentru SSrMS (Lee și Ryu, 2022)

**Metoda de decizie a obiectivelor** se încadrează în categoria metodelor orientate către obiectiv. Cu toate acestea, modelul de decizie a obiectivelor de referință nu poate reprezenta toate obiectivele în profunzime, deoarece obiectivele pentru sistemul de fabricație sunt complicate, din cauza interdependențelor dintre obiective.

Pentru implementarea modelului de decizie a obiectivelor și pentru a efectua experimente, a fost dezvoltat un model de rețea neuronală (*Neural Network*, NN), folosindu-se Python 3.12 (<https://www.python.org/>). La dezvoltarea modelului NN au fost luate în considerare rezultatele optimizării NN furnizate de biblioteca Matlab.

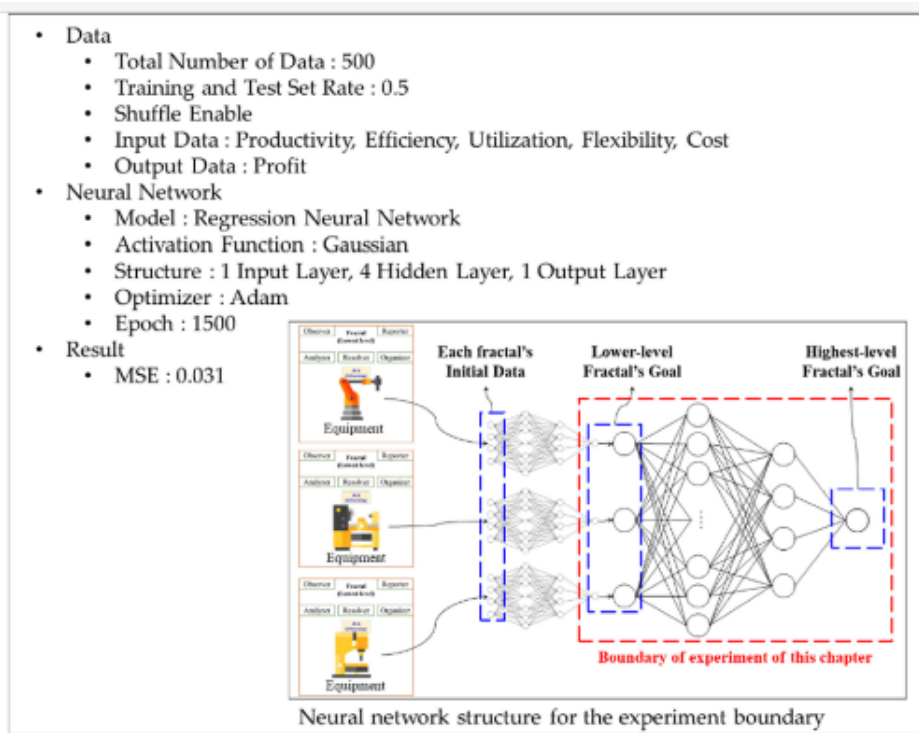


Fig. 3.37. Experimental pentru modelul de decizie a obiectivelor (Lee și Ryu, 2022)

Așa cum se arată în figura 3.37, prin verificarea tendinței datelor de la Matlab, funcția de activare a NN este o funcție de distribuție normală (gaussiană). Prin urmare, NN include un model de regresie cu o funcție de activare gaussiană. Numărul total de date a fost de 500, iar dimensiunile datelor pentru testare și validare au fost de 50% fiecare. Numărul de perioade de instruire a fost de 1000. Datele utilizate în acest studiu sunt realizate artificial, similar cu datele reale ale companiei. Acest lucru se datorează faptului că datele reale au multe valori lipsă și pot avea un impact negativ asupra instruirii și validării. NN este format dintr-un strat de intrare (5 noduri), patru straturi ascunse (32-64-32-5 noduri) și un strat de ieșire (1 nod). După cum se arată în figura 3.36, datele pentru experiment constau în productivitate, eficiență, utilizare, flexibilitate, cost și profit. Valorile productivității, eficienței, utilizării, flexibilității și costurilor variază de la 0 la 1, dar cea a profitului variază de la 0 (adică, profit zero) la 10 (adică, profit maxim). După cum este ilustrat în figură, fiecare fractal are propriul său NN pentru a-și realiza scopul, iar rezultatul fiecărui fractal poate fi folosit ca valoare de intrare

pentru a realiza scopul sistemului. Pe baza valorii derivate a obiectivului sistemului, NN poate obține valoarea optimizată a parametrului fiecărui fractal. Pe baza structurii NN, fractalii individuali pot decide un nou obiectiv sub obiectivul sistemului pentru a reseta obiectivul. În plus, sistemul de fabricație poate reseta obiectivul sau poate executa reconfigurarea parțială în sistem folosind modelul propus. Cu toate acestea, semnalul și datele de proces nu pot fi obținute cu ușurință pentru experimente. Prin urmare, experimentul este limitat în caseta punctată ilustrată în figură.

Pentru a verifica rețeaua neuronală antrenată, au fost comparate rezultatele originale și cele ale experimentului, așa cum este ilustrat în tabelul 3.2.

Tab. 3.2. Rezultatele originale și cele ale experimentului, după (Lee și Ryu, 2022)

	Obiectivul sistemului (valoarea profitului)	Diferență (%)
Valoarea reală	5,61	
Rezultatul rețelei neuronale	5,38	5,28%

Modelul de decizie a obiectivelor din SSRMS funcționează astfel: fiecare echipament din fabrică este conectat cu fiecare fractal; fractalul de cel mai înalt nivel detectează nevoia de a schimba scopul sistemului și mai întâi decide scopul sistemului; apoi, fractalii de nivel inferior își decid obiectivele pentru a-și realiza scopul sistemului.

**Metoda de negociere** poate reduce timpul și costul reconfigurării, prin reconfigurarea unei părți a procesului de fabricație, fiind posibil să se realizeze scopul sistemului luând în considerare scopul fiecărui fractal.

Un model de negociere pentru reconfigurarea procesului de fabricație cu multe negocieri este ilustrat în figura 3.38.

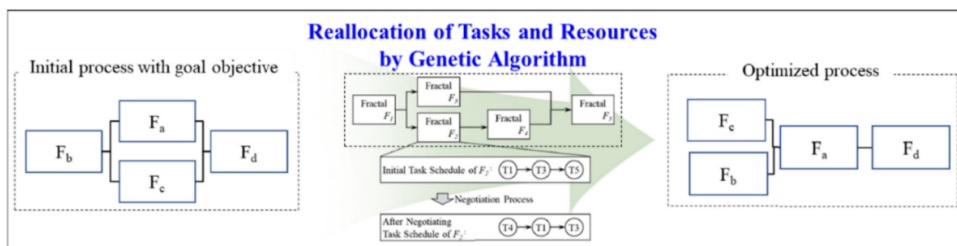


Fig. 3.38. Modelul de negociere în SSRMS (Lee și Ryu, 2022)

Metoda de negociere constă din trei mecanisme: negociere bazată pe resurse, negociere bazată pe sarcini și negociere de tip hibrid.

Negocierea de tip hibrid presupune utilizarea unui algoritm genetic (*Genetic Algorithm*, GA) pentru a realiza procesul de optimizare. Pentru a executa negocieri de tip hibrid s-au sugerat cinci module de agent: manager de oferte, dispecer de agent, agent de activitate, agent de negociere și agent de resurse. Negocierea de tip hibrid poate realoca simultan sarcini și resurse folosind GA. În metoda de negociere de tip hibrid, GA derivă o realocare optimizată. Pe baza rezultatelor realocării din GA, negocierea de tip hibrid realizează optimizarea.

Negocierea de tip hibrid implică trei pași. Pasul 1 începe cu managerul de oferte, care determină fractalul și apoi se alătură unui proces de negociere. Managerul de oferte decide candidații pentru negociere, iar fiecare candidat își verifică sub-fractalii. Dacă, candidații au sub-fractali, atunci toți sub-fractalii intră în procesul de negociere. De asemenea, toți fractalii verifică prioritatea pentru a confirma participanții la negociere odată ce managerul de oferte determină toți candidații. Fractalii cu prioritate insuficientă sunt excluși din negociere. Pe baza pasului 1, fractalii sunt determinați să participe la negociere. În pasul 2, granița finală este determinată în funcție de fractalul de cel mai înalt nivel. Fractalul de cel mai înalt nivel determină granița finală a negocierii. În pasul 3 se realizează procesul de negociere de tip hibrid.

Negocierea de tip hibrid acoperă două cazuri: cazul de negociere 1 și cazul de negociere 2. Cazul de negociere 1 se referă la negocierea între agenți multipli și agenți unici. Cazul 2 de negociere se referă la negocierea între agenți multipli. Un singur fractal împarte resursele sau sarcinile în cazul negocierii 1. În schimb, în cazul negocierii 2, mai mulți fractali atribuie resursele și sarcinile folosind GA.

Pentru a verifica negocierea de tip hibrid, experimentul GA a fost implementat folosind Java Eclipse (<https://www.eclipse.org/>), rezultatul experimentului fiind redat în tabelul 3.3.

Mărimea populației a fost stabilită la 100 de unități, iar numărul de iterații a fost de 700. Raportul de mutație a fost stabilit la 0,1. În GA, un cromozom este format din două părți care indică ID-ul fractalului și sarcinile cu secvența. O genă din cromozom are două tipuri: fractali și sarcini. O genă fractală are informații despre ID-uri fractale unice, care reprezintă fiecare echipament, inclusiv *F1*, *F2*

și  $F_3$ . O genă a sarcinii are informații despre job și sarcină, care reprezintă ID-urile jobului și sarcinii (de exemplu,  $J_1, J_2, J_3, \dots$  și  $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{31}, \dots$ ). Fiecare sarcină are informații cu privire la timpul de procesare a fiecărei alte sarcini. GA are trei obiective, care sunt timpul minim total de finalizare a sarcinii pentru fiecare fractal, sarcina minimă de lucru a fiecărui fractal și volumul minim de lucru total al fractalilor. Cei cinci fractali se alătură procesului de negociere cu patru sarcini. Prin urmare,  $F_1$  operează  $T_{21}$  în  $J_2$ ,  $T_{41}$  în  $J_4$  și  $T_{23}$  în  $J_2$ , în timp ce  $F_3$  operează  $T_{31}$  în  $J_3$ . În acest experiment, sarcina de lucru s-a redus la 32 de minute, iar volumul total de lucru minimizat a fost de 8 minute.

(unitate: min.)

		$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
Job 1	$T_{11}$	2	5	4	1	2
	$T_{12}$	5	4	5	7	5
	$T_{13}$	4	5	5	4	5
Job 2	$T_{21}$	2	5	4	7	8
	$T_{22}$	5	6	9	8	5
	$T_{23}$	4	5	4	54	5
Job 3	$T_{31}$	9	8	6	7	9
	$T_{32}$	6	1	2	5	4
	$T_{33}$	2	5	4	2	4
	$T_{34}$	4	5	2	1	5
Job 4	$T_{41}$	1	5	2	4	12
	$T_{42}$	5	1	2	1	2

Tab. 3.3. Rezultatul experimentului GA pentru modelul de negociere (Lee și Ryu, 2022)

**Metoda de evaluare a sustenabilității** în SSRMS implică efectuarea unei evaluări integrate a optimizării sistemului în ceea ce privește sustenabilitatea. Pentru a obține noul obiectiv, KPI-urile de sustenabilitate obținute luând în considerare obiectivul fiecărui fractal sunt derivate printr-o rețea neuronală cu modelul de decizie a obiectivului. Noul obiectiv obținut prin

modelul propus este apoi simulat în facilități digitale pentru a verifica optimizarea noului sistem cu sustenabilitate.

Metoda de evaluare a durabilității în SSRMS este ilustrată în figura 3.39.

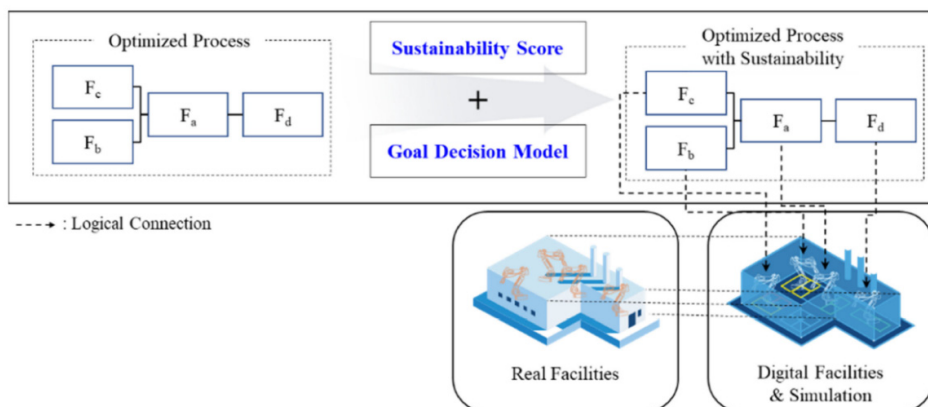


Fig. 3.39. Metoda de evaluare a durabilității în SSRMS (Lee și Ryu, 2022)

Procedura generală pentru evaluarea durabilității este prezentată în figura 3.40.

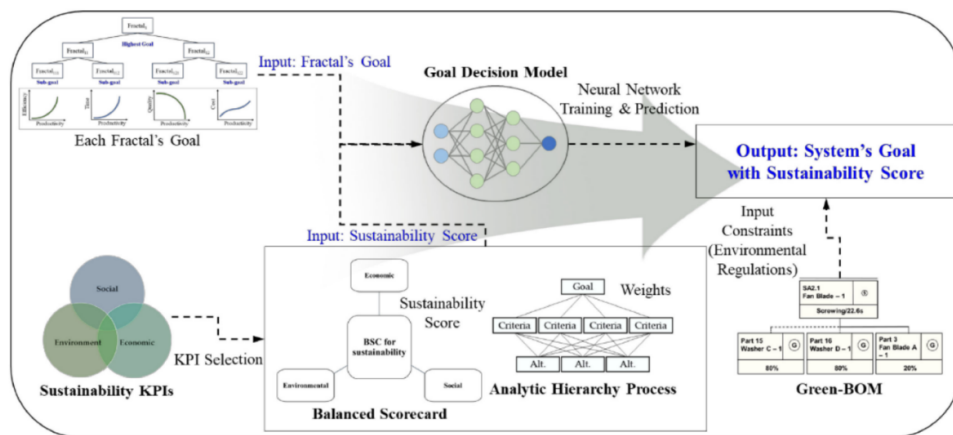


Fig. 3.40. Procedura generală pentru evaluarea durabilității (Lee și Ryu, 2022)

KPIs de sustenabilitate sunt selectate pe baza cadrului inițiativei de raportare globală sau a cererii operatorului de sistem. Pe baza acestor KPIs de sustenabilitate selectate, operatorul de sistem implementează procesul de ierarhie

analitică (*Analytic Hierarchy Process*, AHP) pentru a determina ponderea fiecărui KPI. Apoi este calculat un scor de sustenabilitate pe baza ponderilor din AHP.

Metoda de evaluare a durabilității folosește rețeaua neuronală pentru a evalua sustenabilitatea în raport cu optimizarea obiectivelor sistemului folosind modelul de decizie a obiectivelor. Datele de intrare pentru experiment corespund obiectivului fractalului inferior și includ productivitatea, eficiența, utilizarea, flexibilitatea, costul, scorul de sustenabilitate și profitul.

Structura rețelei neuronale constă dintr-un strat de intrare cu șase noduri, un strat ascuns cu douăzeci și patru de noduri și un strat de ieșire cu șase noduri. S-a presupus că scopul sistemului corespunde maximizării profitului. Rețeaua neuronală folosește funcția gaussiană ca funcție de activare, deoarece, pe baza tendinței de date și a optimizării rețelei neuronale, aplicația Matlab recomandă un model de regresie gaussian.

Pentru a obține rezultatul din rețeaua neuronală s-au presupus câteva constrângeri: scorul de sustenabilitate trebuie să depășească 0,51, utilizarea și costul trebuie să depășească 0,3, costul este fix și utilizarea resurselor este minimă. Un scor de sustenabilitate mai mic de 0,51 este insuficient pentru dezvoltarea durabilă.

Rezultatele inițiale ale rețelei neuronale sunt enumerate în tabelul 3.4. Pe baza acestor rezultate, se poate concluziona că dimensiunea de mediu reduce utilizarea și crește productivitatea prin resursele de muncă și dimensiunea socială.

Tab. 3.4. Valoarea finală a obiectivului metodei de evaluare a sustenabilității prin modelul de decizie a obiectivelor, după (Lee și Ryu, 2022)

KPI-uri	Profit	Productivitate	Utilizare	Flexibilitate	Cost	Eficiență	Durabilitate
Valoare	6.77	0.82	0.3	0.3	0.3	0.38	0.51

Figura 3.41 prezintă arhitectura și metodele propuse pentru auto-reconfigurarea SSRMS. Procesul de auto-reconfigurare începe de la echipamentul din stânga jos. Pentru a stabili un nou obiectiv și procese inițiale de fabricație în SSRMS, modelul de decizie a obiectivelor adoptat determină obiectivele pentru mașini, stații de lucru și întregul sistem.

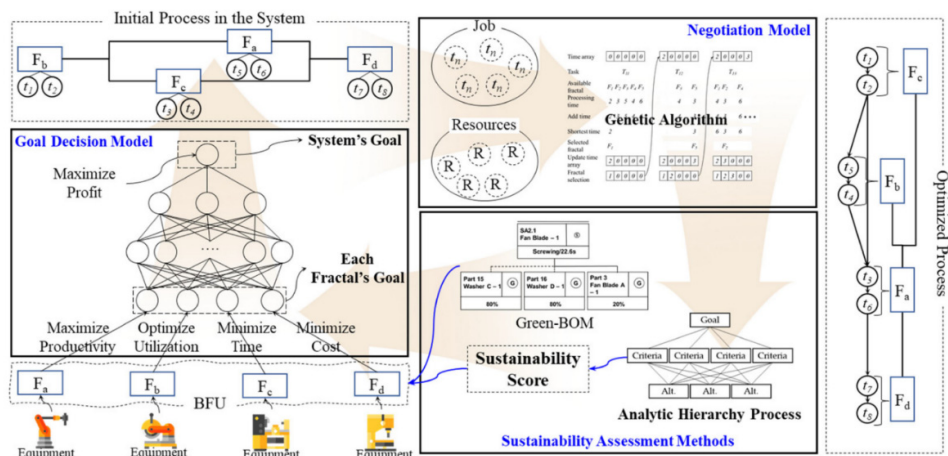


Fig. 3.41. Reconfigurarea procesului cu metodele propuse în arhitectura SSRMS (Lee și Ryu, 2022)

Pentru a optimiza procesele de fabricație, reconfigurarea acestora se realizează prin utilizarea modelului de negociere echipat cu algoritmi genetici (GA). Evaluarea sustenabilității cu modelul de decizie a obiectivelor a fost implementată prin metoda de evaluare a sustenabilității. Pentru a realiza scopul sistemului, un fractal individual își decide propriul scop pe baza scopului sistemului. Procesele de producție sunt reconfigurate prin utilizarea modelului de negociere în scenarii, care implică adăugarea/eliminarea de fractali în sistem sau realocarea sarcinilor/resurselor. Acest model de negociere poate duce la optimizarea procesului. În plus, este luată în considerare sustenabilitatea sistemului, în cazul în care metoda de evaluare a durabilității este utilizată pentru a deriva simultan obiective de sustenabilitate și fractale pe baza modelului de decizie a obiectivelor. Modelul de evaluare propus folosește procesul de ierarhie analitică (AHP), pentru a determina KPI-uri legate de sustenabilitate și Green-BOM, pentru a ține cont de reglementările de mediu.

### 3.4. Sinteza capitolului

În acest capitol, care corespunde celei de-a doua etape a DRM, **Studiul descriptiv I (DS-I)**, s-a urmărit obținerea unei înțelegeri mai bune a situației existente prin identificarea și clarificarea în detaliu a factorilor care influențează criteriile preliminare, finalizarea modelului de referință, incluzând criteriile de



succes și criteriile de măsurare a succesului, sugerarea de factori (posibili factori cheie) care ar putea conduce la o îmbunătățire a situației existente, oferirea unei baze pentru dezvoltarea eficientă a sprijinului, care se adresează acelor factori cu cea mai puternică influență asupra succesului și care pot fi evaluați în raport cu criteriile, furnizarea de detalii care pot fi utilizate pentru a evalua efectele dezvoltării de sprijin în etapa DS-II.

Cunoașterea în profunzime a sistemelor de fabricație a oferit o bază pentru dezvoltarea eficientă a sistemelor de fabricație inteligente, în contextul Industriei 4.0.

Definirea cadrului conceptual al sistemelor de fabricație inteligente și transformarea paradigmei de fabricație în fabricație inteligentă bazată pe date a permis elaborarea cadrului de fabricație inteligentă bazată pe date.

În metodologia generică pentru concepția, analiza și evaluarea sistemelor de fabricație inteligente s-a folosit teoria de concepție axiomatică (*Axiomatic Design Theory*) pentru a crea modelul sistemului de fabricație inteligent în care, pentru a reprezenta un element de sistem abstract al fabricației inteligente s-a folosit conceptul de triadă digitală (*Digital Triad*), care este o extensie a conceptului de geamă digital (*Digital Twin*).

Având în vedere că sistemul de fabricație inteligent este un tip de sistem reconfigurabil sustenabil în timp, au fost analizate metode și modele de reconfigurare și auto-reconfigurare, aplicabile în sistemele de fabricație inteligente, în condițiile personalizării inteligente, a personalizării și individualizării în masă.

Urmează a se studia modalitățile de integrare a unui sistem de fabricație inteligent.

## 4. INTEGRAREA UNUI SISTEM DE FABRICAȚIE INTELIGENT

### 4.1. Obiectivul capitolului

Acest capitol corespunde celei de-a treia etape a DRM, **Studiul prescriptiv (PS)** în care, după înțelegerea obținută în etapa DS-I, pentru a determina cei mai potriviți factori necesari a fi abordați în etapa PS (factorii cheie), în scopul de a îmbunătăți situația existentă, se dezvoltă un model de impact bazat pe modelul de referință și pe modelul inițial de impact, care să descrie situația dorită și îmbunătățită, se selectează partea modelului de impact ce urmează a fi abordată și se determină criteriile de succes, se dezvoltă sprijinul planificat ce vizează abordarea factorilor cheie, se evaluează sprijinul real cu scopul de a determina dacă se trece la etapa DS-II și se dezvoltă un plan de evaluare descriptiv.

**Obiectivul operațional (OP3)** constă în oferirea unei baze pentru integrarea sistemelor de fabricație inteligente pentru serii reduse și personalizare individuală în masă, în contextul Industriei 4.0.

### 4.2. Un cadru general și subsisteme pentru integrarea unui sistem de fabricație inteligent

Pe baza cadrului de sistem de fabricație inteligent (SMS) propus de China (Wei ș.a., 2017), a fost dezvoltat un sistem integrat de fabricație inteligent (*Smart Manufacturing Integrated System*, SMIS). Modelul de referință al SMIS a fost analizat prin intermediul ingineriei de sistem. Pe baza acestui model, a fost propusă arhitectura generală a SMIS, compus din subsistemul fizic, subsistemul de integrare a informațiilor, subsistemul de integrare a rețelei, subsistemul de integrare a datelor și subsistemul de integrare a vizualizării.

### 4.2.1. Cadrul general

Arhitectura sistemului de fabricație inteligent propusă de China include trei dimensiuni (Wei ș.a., 2017): dimensiunea ciclului de viață, dimensiunea ierarhiei sistemului și dimensiunea caracteristicilor inteligente (fig. 4.1). Acest cadru definește doar elementele, straturile, activitățile și funcțiile dimensiunilor separate, dar nu rafinează conținutul specific al subsistemelor generate de intersecția fiecărei dimensiuni.

Localizarea SMIS în arhitectura SMS propusă de China corespunde porțiunii galbene din figura 4.2. Sistemul fizic este definit din punct de vedere al elementelor de resurse de fabricație inteligentă, care sunt echipamente, linia de producție (unitatea), atelierul și întreprinderea. Integrarea sistemului se referă la integrarea echipamentelor inteligente, a liniei de producție inteligentă, atelierului digital și a fabricii inteligente, inclusiv integrarea informațiilor, integrarea în rețea, integrarea datelor și integrarea vizuală.

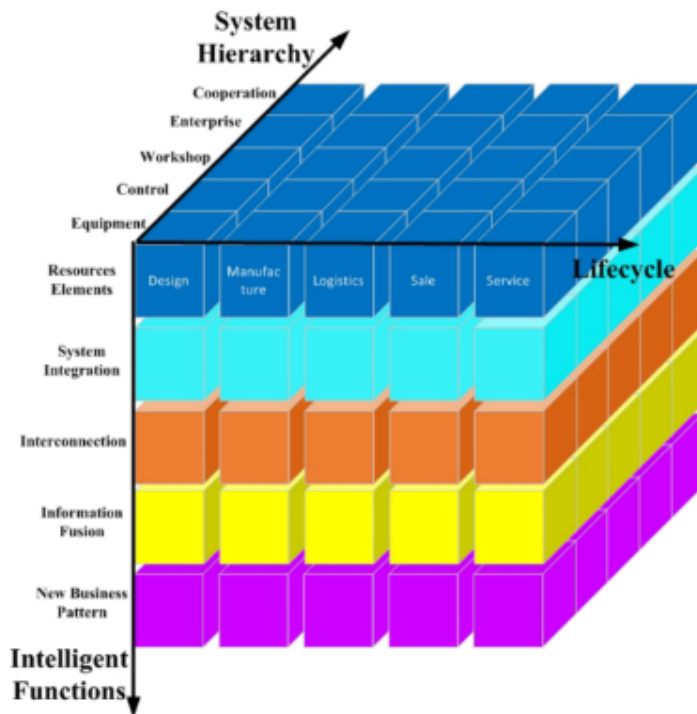


Fig. 4.1. Arhitectura sistemului de fabricație inteligent (Wei ș.a., 2017)

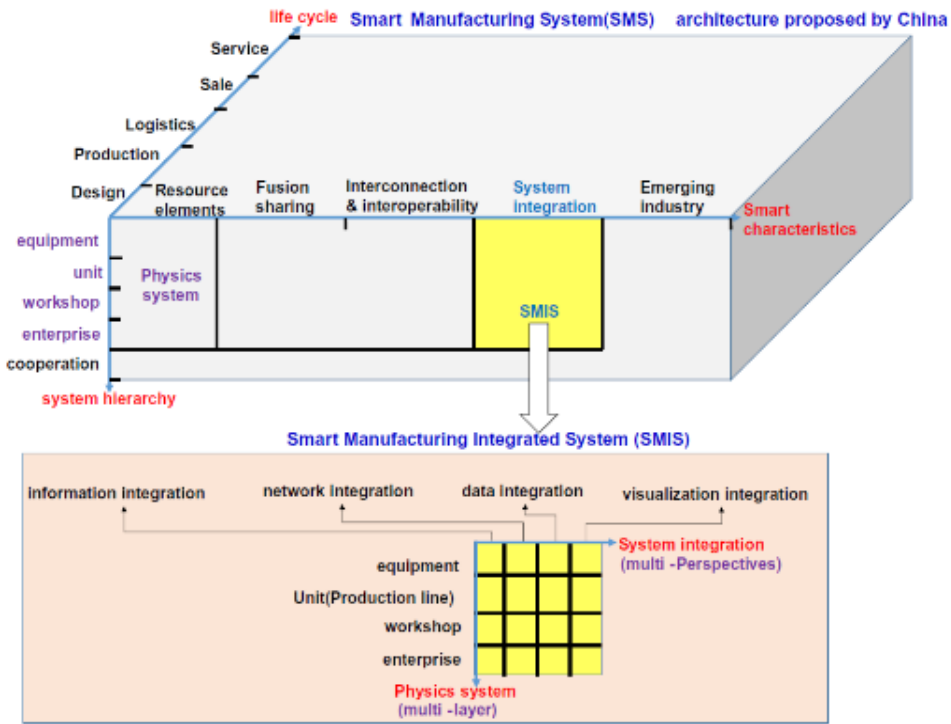


Fig. 4.2. Localizarea SMIS bazat pe arhitectura sistemului de fabricație inteligent propusă de China (Zhang, X. ș.a., 2019)

Modelul SMIS este compus din intrare, ieșire, mediu, structură și mediu. După cum se arată în figura 4.3, intrarea în SMIS este un sistem de fabricație (*Manufacturing System, MS*), care este împărțit în strat de echipament, strat de linie de producție, strat de atelier și strat de întreprindere. Printre acestea, stratul de echipamente al MS este în principal echipamentul tehnologic de bază al sistemului de fabricație. Stratul de linie de producție al MS se referă la linia de fabricație a produsului, cum ar fi procesul de fabricație, aspectul fizic al fabricației, proiectarea liniei de procesare, asamblare și testare. Stratul de atelier al MS include proiectarea și aspectul general al atelierului, rețeaua de comunicații, elementele de susținere și funcțiile atelierului, cum ar fi: încărcarea și descărcarea inteligente, producția echilibrată și monitorizarea în timp real a procesului de producție. Stratul de întreprindere al MS se referă la macro și micro-managementul întreprinderilor, cum ar fi: planificarea strategică a

întreprinderii, planificarea resurselor întreprinderii și managementul ciclului de viață al produsului.

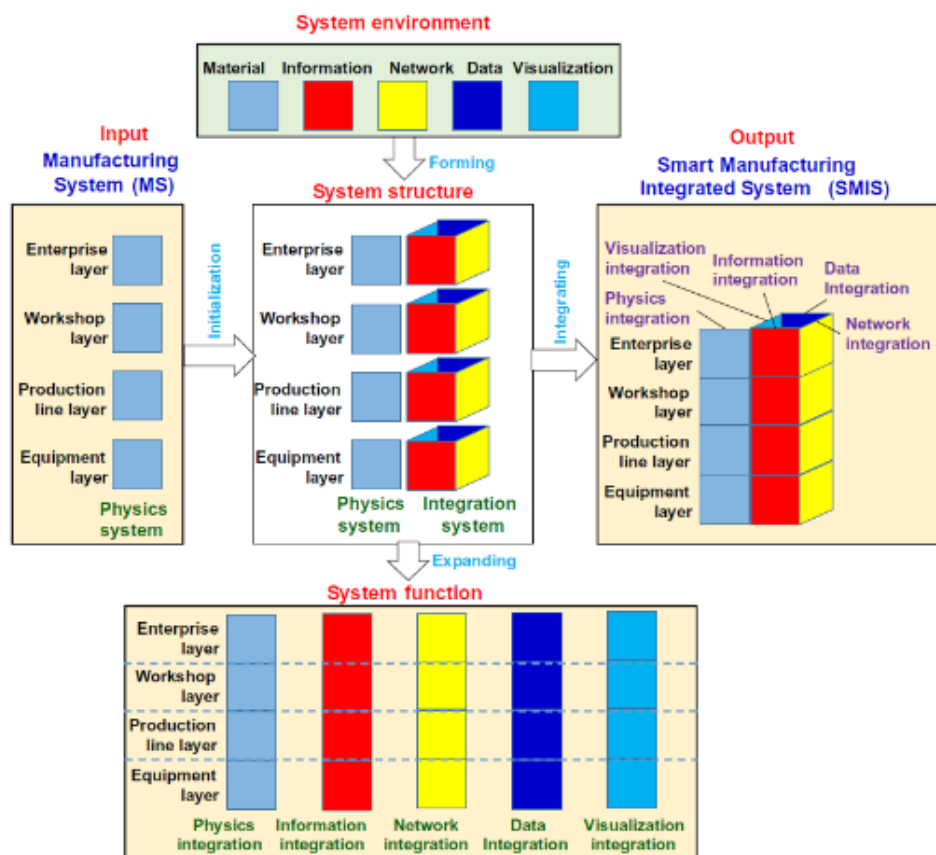


Fig. 4.3. Modelul SMIS din analiza ingineriei de sistem (Zhang, X. ș.a., 2019)

Mediul SMIS include materiale, informații, rețea, date, vizualizare etc. Metoda de inginerie de sistem este utilizată pentru a analiza fluxul de materiale, fluxul de informații, fluxul de rețea, fluxul de date și fluxul de vizualizare al SMIS, iar apoi este dedus mecanismul de sistem al SMIS.

Structura SMIS este în jurul sistemului fizic (inclusiv stratul de echipamente, stratul de linie de producție, stratul de atelier și stratul de întreprindere), formând integrarea materialelor, informațiilor, rețelei, date și vizualizare. Proiecția fiecărui subsistem de integrare (inclusiv subsistem de integrare a informațiilor, subsistem de integrare în rețea, subsistem de integrare

a datelor, subsistem de integrare vizuală) pe subsistemul fizic (inclusiv stratul de echipamente, stratul de linie de producție, stratul de atelier, stratul de întreprindere) este funcția SMIS. În cele din urmă, SMIS este rezultatul, iar subsistemele sunt combinate, interconectate și interacționate.

Modelul de sistem al SMIS este dezvoltat prin analiză sistematică. În continuare se va analiza structura și funcția SMIS, prin studierea cadrului general al SMIS. După cum se arată în figura 4.4, concentrându-se pe sistemul fizic construit de stratul de echipamente (stratul 1), stratul de linie de producție (stratul 2), stratul de atelier (stratul 3) și stratul de întreprindere (stratul 4), cadrul SMIS este construit din dimensiunea integrării informațiilor, a integrării în rețea, a integrării datelor și a integrării vizuale.

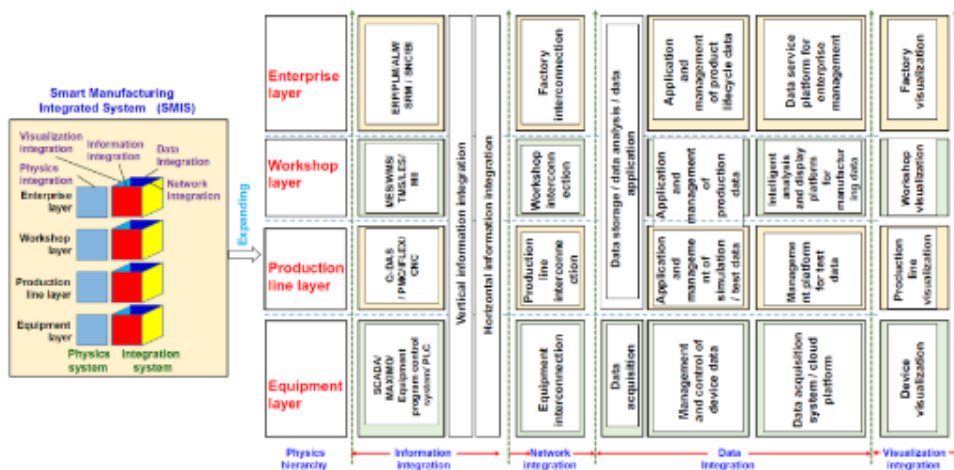


Fig. 4.4. Cadrul general pentru SMIS (Zhang, X. ș.a., 2019)

Ierarhia fizică include în principal stratul de echipamente al echipamentelor centrale de fabricație inteligentă, stratul liniei de producție al liniilor de producție automatizate, stratul atelierului digital și stratul întreprinderii de management inteligent.

Integrarea informațiilor este integrarea verticală și orizontală a sistemelor de informații între stratul de echipamente, stratul de linie de producție, stratul de atelier și stratul de întreprindere. Integrarea informațiilor include integrarea între echipament și linia de producție, integrarea între linia de producție și atelier, integrarea între atelier și întreprindere și integrarea lor reciprocă.

Integrarea rețelei este analizată din perspectiva interconexiunii rețelei, inclusiv interconectarea echipamentelor, interconectarea liniilor de producție, interconectarea atelierelor și interconectarea fabricilor.

Integrarea datelor este analizată din trei dimensiuni: procesul de prelucrare a datelor, managementul datelor și platforma de date. Procesarea datelor include achiziția datelor, stocarea datelor, analiza datelor și aplicarea datelor. Datele și platforma implicate în stratul de echipamente includ managementul și controlul datelor dispozitivului, sistemul de achiziție de date, platforma cloud etc. Datele și platforma implicate în stratul liniei de producție includ date de simulare și testare, platformă de gestionare a datelor de testare etc. Datele și platforma implicată în stratul de atelier includ date de producție, analiză inteligentă, platformă de afișare a datelor de fabricație etc. Datele și platformele implicate în stratul de întreprindere includ date despre ciclul de viață al produsului, platforma de servicii de management al întreprinderii etc.

Integrarea vizualizării este dezvoltată în jurul a patru niveluri: vizualizarea echipamentului, vizualizarea liniei de producție, vizualizarea atelierului și vizualizarea fabricii.

Prin proiectarea integrării informațiilor, a integrării în rețea, a integrării datelor și a integrării vizualizării, în conformitate cu ierarhia sistemului fizic de jos în sus (echipament, linie de producție, atelier, întreprindere), poate oferi întreprinderilor un cadru de implementare de referință și o cale pentru implementarea SMIS.

#### **4.2.2. Subsistemul fizic**

Sistemele fizice ale SMIS (fig. 4.5) sunt împărțite în funcție de mai multe niveluri, inclusiv stratul de echipamente, stratul de linie de producție, stratul de atelier și stratul de întreprindere.

Printre acestea, ierarhia echipamentelor corespunde echipamentului tehnic de bază inteligent și echipamentului specific inteligent. Ierarhia liniei de producție corespunde liniei de producție automatizate, inclusiv produsele principale și părțile importante, structura de defalcare a produselor, fluxul procesului de producție, aspectul producției, producția automată a liniei, asamblarea automată și testarea automată. Ierarhia atelierului corespunde atelierului digital, inclusiv proiectarea atelierului digital, elementele de sprijin ale atelierului digital, modulele funcționale ale atelierului digital și integrarea

logistică inteligentă în atelier. Ierarhia întreprinderii corespunde managementului inteligent al întreprinderii, inclusiv macro-management, micro-management (ciclul de viață al produsului), management local (unitatea de producție), sistemul de management al informațiilor întreprinderii și platforma de management a SMIS.

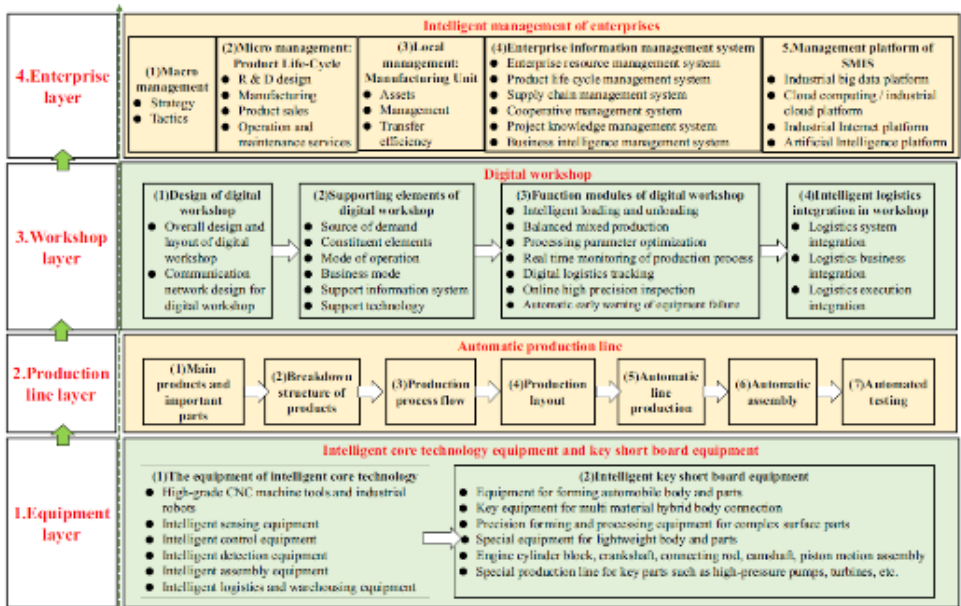


Fig. 4.5. Subsistemul fizic din mai multe straturi pentru SMIS (Zhang, X. ș.a., 2019)

Sistemul fizic al SMIS trebuie analizat din perspectiva controlului și managementului.

Nivelul de echipamente include în principal echipamente cu tehnologie de bază inteligentă și echipamente specifice pentru producția inteligentă. Echipamentele tehnice de bază inteligente sunt constituite din mașini-unelte CNC de înaltă calitate și roboți industriali, echipamente inteligente de detectare, echipamente de control inteligent, echipamente de detectare inteligente, echipamente de asamblare inteligente și echipamente inteligente pentru logistică și depozitare.

Stratul liniei de producție al sistemului fizic pentru SMIS necesită ca prim pas analizarea principalelor produse și componente de pe linia de producție. Pentru producătorii de automobile, acestea sunt întregul vehicul și piesele de



automobile. În al doilea rând, este analizată structura de descompunere a produselor. De exemplu, transmisia auto este descompusă în cablaj, pompă de ulei, ansamblu motor, suport, sistem de roți, sistem de ambreiaj etc. În al treilea rând, este planificat procesul de producție pe baza structurii de defalcare a produsului. Apoi, în conformitate cu procesul de producție, este proiectat aspectul fizic al producției. În continuare, în conformitate cu aspectul fizic, este proiectată o linie de producție automată. În cele din urmă, proiectarea liniei de producție automată este extinsă și sunt proiectate pe rând alte linii de producție: linia de asamblare automată, linia de testare etc.

Studiul stratului de atelier este din patru aspecte: proiectare fizică, elemente de susținere, module funcționale și integrarea logistică a atelierului digitalizat. Proiectarea atelierului digital include proiectarea generală, aspectul și rețeaua de comunicare a atelierului digital. Elementele suport ale atelierului digitalizat includ sursa cererii, tehnologiile suport, elementele constitutive, modul de operare, modelul de afaceri și sistemul informațional. Modulele funcționale ale atelierului digital includ încărcarea și descărcarea inteligentă, producția echilibrată în flux mixt, optimizarea parametrilor de procesare, monitorizarea în timp real a procesului de producție, urmărirea logistică digitală, inspecția on-line de înaltă precizie și avertizare automată a defectarea echipamentului. Integrarea logistică inteligentă a atelierului include integrarea sistemului logistic, integrarea afacerilor logistice și integrarea execuției logisticii.

Stratul de întreprindere este în principal în jurul managementului inteligent în întreprindere, inclusiv macro-management, micro-management (ciclul de viață al produsului), management local (unitate de producție), sistem de management al informațiilor întreprinderii și management platforma SMIS. Macro-managementul întreprinderilor include strategie și tactici. Micro-managementul întreprinderilor se referă la managementul ciclului de viață al produsului, inclusiv servicii de proiectare, producție, vânzări, operare și mentenanță. Managementul local al unei întreprinderi este centrat pe unitatea de producție inteligentă, care include trei elemente: active, management și eficiență a transferului. Sistemul de management al informațiilor include ERP, PLM, SCM, sistem de management cooperativ și sistem de management de business intelligence. Stratul superior este o varietate de platforme de management pentru întreprinderi, inclusiv platformă industrială de date mari, cloud computing și platformă industrial cloud, platformă industrială de internet și platformă de inteligență artificială.

### 4.2.3. Subsistemul de integrare a informațiilor

Integrarea informațiilor pentru SMIS a fost analizată în stratul de echipamente, stratul liniei de producție, stratul atelierului și stratul întreprinderii, așa cum se arată în figura 4.6, inclusiv integrarea informațiilor orizontale și integrarea informațiilor pe verticală.

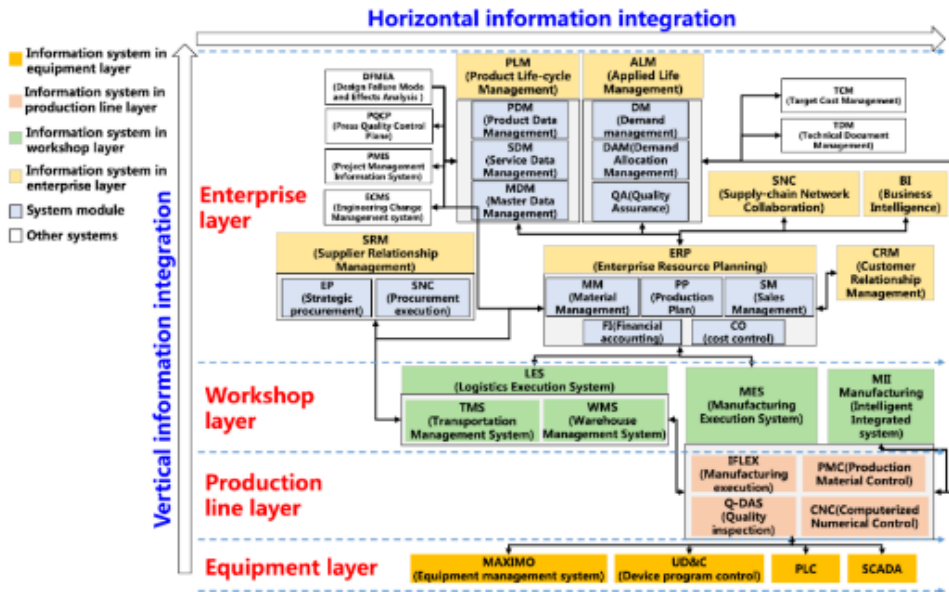


Fig. 4.6. Cadrul de integrare a informațiilor pentru SMIS (Zhang, X. ș.a., 2019)

Stratul 1: Sistemul de informații din stratul de echipamente include în principal sistemul de control al dispozitivului, sistemul de management al dispozitivului și sistemul de achiziție de date. Aceste sisteme de informații sunt integrate cu sistemele de informații de producție, materiale și stocare ale stratului de linie de producție prin gateway inteligent și PLC.

Stratul 2: Sistemul de informații din stratul liniei de producție include în principal controlul material de producție (*Production Material Control, PMC*), control numeric computerizat (CNC), stocarea atașată direct la calitate (*Quality-Direct Attached Storage, Q-DAS*), și IFLEX. Între timp, aceste sisteme informatice aparțin modulului sistemului de execuție al fabricației (*Manufacturing Execution System, MES*) în stratul atelier și sunt integrate cu sistemul de logistică și producție din stratul atelier.

Stratul 3: Sistemele de informații la nivel de atelier includ sistemul de execuție a fabricației (*Manufacturing Execution System*, MES), sistemul de execuție logistică (*Logistics Execution System*, LES) și sistemul integrat inteligent de fabricație (*Manufacturing Intelligent Integrated System*, MIIS). Aceste sisteme informatice sunt integrate cu sisteme la nivelul întreprinderii: gestionarea relațiilor cu furnizorii (*Supplier Relationship Management*, SRM), planificarea resurselor întreprinderii (*Enterprise Resource Planning*, ERP) și managementul relațiilor cu clienții (*Customer Relationship Management*, CRM).

Stratul 4: Pe stratul superior, sistemul de informații la nivel de întreprindere include managementul ciclului de viață al produsului (*Product Life cycle Management*, PLM), managementul vieții aplicației (*Application Life Management*, ALM), colaborarea în rețeaua lanțului de aprovizionare (*Supply Chain Network collaboration*, SNC) și *business intelligence* (BI).

Integrarea verticală a informațiilor este integrarea informațiilor din fabricația fizică, inclusiv integrarea între echipamente și linia de producție, între linia de producție și atelier, între atelier și întreprindere și integrarea lor reciprocă.

Integrarea orizontală a informațiilor este integrarea informațiilor din managementul întreprinderii, inclusiv integrarea între furnizori și întreprinderi, între întreprinderi și clienți, inclusiv integrarea cererii interne, proiectarea, producția, managementul logisticii etc.

Prin urmare, întreprinderile pot construi SMIS din perspectiva integrării informațiilor verticale și a integrării orizontale a informațiilor, pentru a forma un ecosistem informațional dinamic cu interconectare și interacțiune.

#### **4.2.4. Subsistemul de integrare în rețea**

Integrarea în rețea pentru SMIS constă în interconectare și interoperabilitate în patru straturi: stratul de echipamente, stratul de linie de producție, stratul de atelier și stratul de întreprindere, așa cum se arată în jumătatea dreaptă a figurii 4.7.

Stratul 1: Interconectarea între echipamente PLC este utilizată pentru a transmite semnale între echipamente, iar receptorul RF (frecvență radio) este utilizat pentru a colecta date despre sănătate, producție, energie etc. în producție. Apoi, sistemul de control al dispozitivului transferă date către Ethernet prin Gateway prin intermediul rețelei automate. Sistemul de control al atelierului este conectat cu sistemul de control al dispozitivului prin Ethernet. Prin integrarea în

rețea de mai sus se poate realiza interconectarea și interoperarea tuturor echipamentelor din atelier.

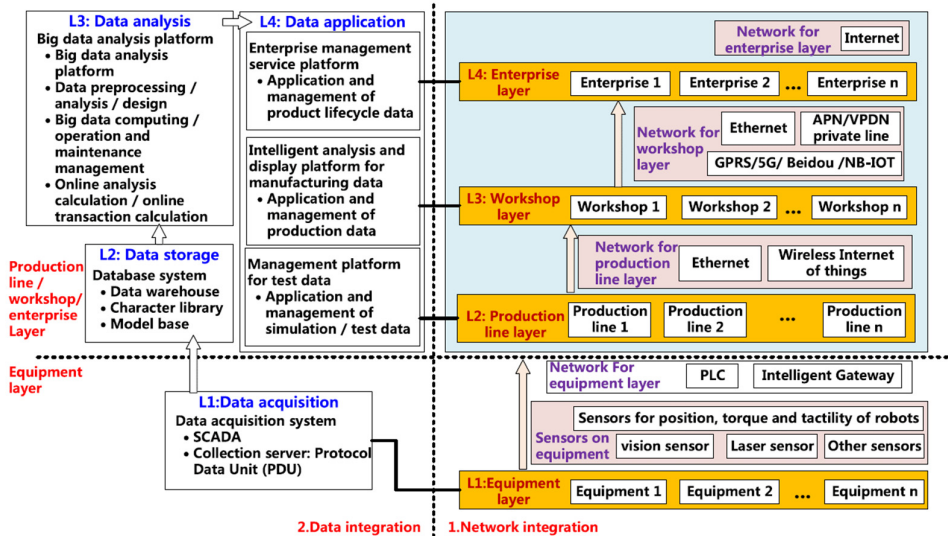


Fig. 4.7. Integrarea în rețea și integrarea datelor pentru SMIS (Zhang, X. ș.a., 2019)

Stratul 2: Interconectarea între liniile de producție. Sistemul de control al dispozitivului colectează date de la dispozitiv printr-un dispozitiv de recepție cu frecvență radio. Apoi, acest sistem este conectat la sistemul de control al liniei de producție prin fibră optică cu fir sau wireless (de exemplu, NB-IoT: *Narrow Band Internet of Things*, Internetul lucrurilor în bandă îngustă). Sistemul de control al liniei de producție transferă date către Ethernet prin Gateway, prin intermediul rețelei automate. Sistemul de control al atelierului este conectat la sistemul de control al liniei de producție prin Ethernet. Prin integrarea în rețea se poate realiza interconectarea și interoperarea tuturor liniilor de producție din atelier.

Stratul 3: Interconectarea între ateliere. Prin rețelele cu fir și fără fir (IoT sau Internet), sistemul de management al atelierului este conectat cu sistemul de management al întreprinderii, pentru a realiza interconectarea tuturor atelierelor din întreprindere. Prin integrarea informațiilor aferente (consum de energie, producție, calitate, echipament, cost etc.) din diverse sisteme informaționale (MES, ERP, QMS și EMS), se realizează interconectarea tuturor echipamentelor și liniilor de producție din toate atelierele din întreprindere.

Stratul 4: Interconectarea între fabrici. Conexiunea dintre fabrici se realizează prin intermediul internetului. Interconexiunea dintre fabrici include interconectarea între producătorii locali, producătorii din afara amplasamentului, producătorii externalizați, producătorii de piese și alte fabrici colaboratoare.

Prin urmare, întreprinderile pot construi SMIS din punctul de vedere al interconectării și interoperabilității din echipamente, linie de producție, atelier și fabrică pentru a forma un mediu de rețea de interconectare și interoperabilitate a sistemului de fabricație inteligent integrat (SMIS).

#### 4.2.5. Subsistemul de integrare a datelor

Integrarea datelor SMIS este realizată prin combinarea integrării în rețea. Cadrul de integrare a datelor și de integrare în rețea pentru SMIS este prezentat în figura 4.7.

Stratul 1 cuprinde:

Achiziție de date. În primul rând, datele din echipamentul tehnic de bază inteligent al stratului de echipamente sunt colectate de controlul de supraveghere și achiziție de date (*Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA*), unitatea de date protocol (*Protocol Data Unit, PDU*) și alte sisteme de achiziție de date. Apoi, datele colectate sunt încărcate în sistemul de achiziție prin gateway inteligent și PLC în rețeaua la nivel de dispozitiv. Sistemul de colectare este încărcat pe serverul întreprinderii prin Ethernet, wireless, Internet etc.

Stocarea datelor. Datele sunt stocate și analizate în întreprindere de către server. Sistemul de stocare a datelor include depozitul de date, biblioteca de caracteristici și biblioteca de modele.

Analiza datelor. Prin intermediul platformei de analiză a datelor mari, datele mari sunt preprocesate, analizate, proiectate, calculate, întreținute, gestionate etc.

Aplicarea datelor. În cele din urmă, datele sunt aplicate în linia de producție, atelier și stratul de întreprindere.

Stratul 2: Printre acestea, datele din stratul liniei de producție sunt datele de simulare, testare etc.

Stratul 3: Datele din stratul atelier sunt tot felul de date de producție în atelier.

Stratul 4: Datele din stratul de întreprindere sunt date despre ciclul de viață al produsului etc.

Prin urmare, întreprinderile pot construi SMIS din punctul de vedere al achiziției de date la nivelul de echipamente, stocarea datelor/analiza datelor/aplicarea datelor la nivelul liniei de producție/atelier/întreprindere, care poate forma un sistem integrat al întregului flux de circulație a datelor în sistemul inteligent de producție.

#### 4.2.6. Subsistemul de integrare a vizualizării

Integrarea vizualizării pentru SMIS, prezentată în figura 4.8, include patru straturi de vizualizare: stratul de echipamente, stratul liniei de producție, stratul atelierului și stratul întreprinderii.

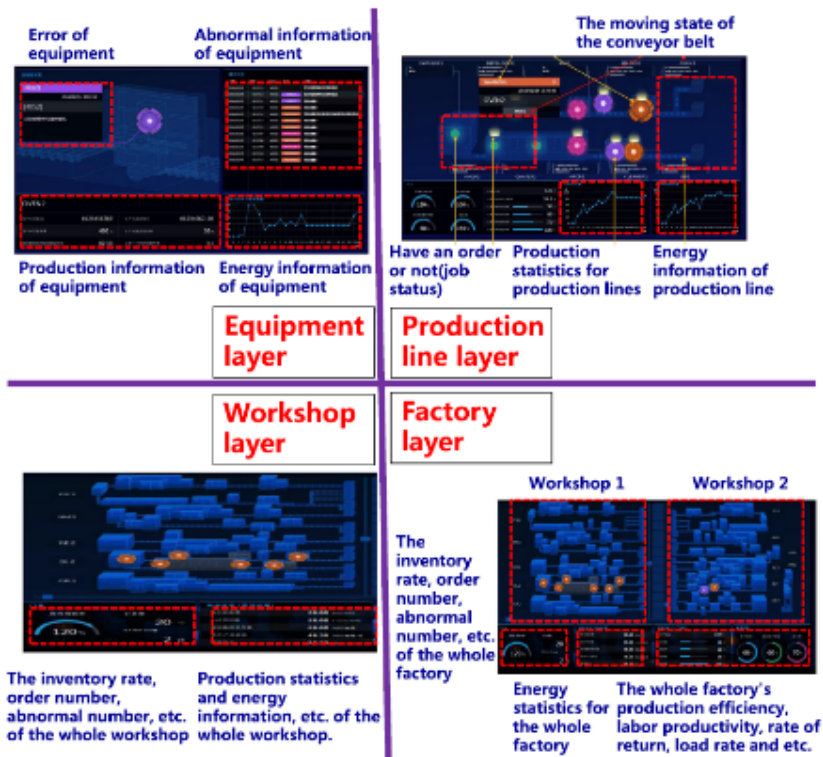


Fig. 4.8. Vizualizarea echipamentelor, liniei de producție, atelierului și fabricii pe baza integrării în rețea (Zhang, X. ș.a., 2019)

#### Stratul 1: Vizualizarea echipamentului

Afișarea în timp real a informațiilor despre echipamente este realizată prin extragerea datelor de pe platforma de date mari, care rulează la viteză mare. Informațiile de vizualizare includ locația, modelul și producătorul echipamentului. De asemenea, include timpul de lucru, starea în timp real și starea consumului de energie al echipamentului. În plus, include și comanda curentă de producție pentru un anumit echipament, rata de finalizare planificată, cantitatea de producție curentă și randamentul la serviciu al echipamentului.

#### Stratul 2: Vizualizarea liniei de producție

Informațiile din linia de producție sunt afișate pe ecranul LED în timp real. Informațiile vizuale includ starea curentă a fiecărui dispozitiv din procesul din linia de producție. De asemenea, include timpul de producție continuu în linia de producție, comenzile și modelele fiecărui echipament la momentul actual; în plus, include și cantitatea de produse din liniile de producție de 24 ore, prima oră de productivitate, rata deșeurilor, consumul de energie, informații de alarmă, eficiența liniei de producție a echipamentelor integrate etc.

#### Stratul 3: Vizualizare atelier

Vizualizarea atelierului se referă la vizualizarea tuturor informațiilor de producție din întregul atelier, inclusiv funcționarea tuturor echipamentelor și liniilor de producție din atelier, a echipamentelor anormale și a liniilor de producție anormale. De asemenea, include dacă există un stoc de produse rămase în fiecare proces. În plus, include și consumul curent de energie al întregului atelier, numărul de comenzi de producție și rata de finalizare.

#### Stratul 4: Vizualizarea fabricii

Vizualizarea fabricii se referă la vizualizarea tuturor informațiilor din întreaga fabrică, inclusiv starea de funcționare a tuturor echipamentelor și liniilor de producție, echipamente anormale și linii de producție anormale, care sunt împărțite de diferite ateliere dintr-o fabrică. Include, de asemenea, consumul curent de energie al întregii fabrici, cantitatea de comenzi de producție și rata de finalizare. Din vizualizarea fabricii se poate compara starea producției între diferite ateliere. În plus, se poate arăta intuitiv că excepția aparține dispozitivului căruia îi aparține linia de producție și anume atelier din fabrică.

Prin urmare, întreprinderile pot construi SMIS din punctul de vedere al vizualizării echipamentelor, liniei de producție, atelierului și fabricii. În cele din

urmă, se formează o platformă de afișare transparentă și vizuală pentru sistemul general de producție inteligentă.

### 4.3. Calea de implementare pentru SMIS

În subcapitolul anterior, SMIS a fost construit din perspectivele integrării informațiilor, integrării în rețea, integrării datelor și integrării vizualizării, fiind analizate etapele de implementare a fiecărei integrări. În continuare, va fi studiată relația dintre acestea și calea de implementare a SMIS dintr-o perspectivă holistică.

După cum se arată în figura 4.9, SMIS a fost propus în jurul a șapte niveluri și 13 pași. Cele șapte niveluri includ sistemul de dispozitiv, sistemul de senzori, sistemul de integrare în rețea, sistemul de integrare a informațiilor, sistemul de integrare a datelor, sistemul de integrare a aplicațiilor și sistemul de integrare a vizualizării. În jurul acestor șapte niveluri, întreprinderile pot efectua SMIS într-un mod ordonat, de jos în sus, în 13 pași.

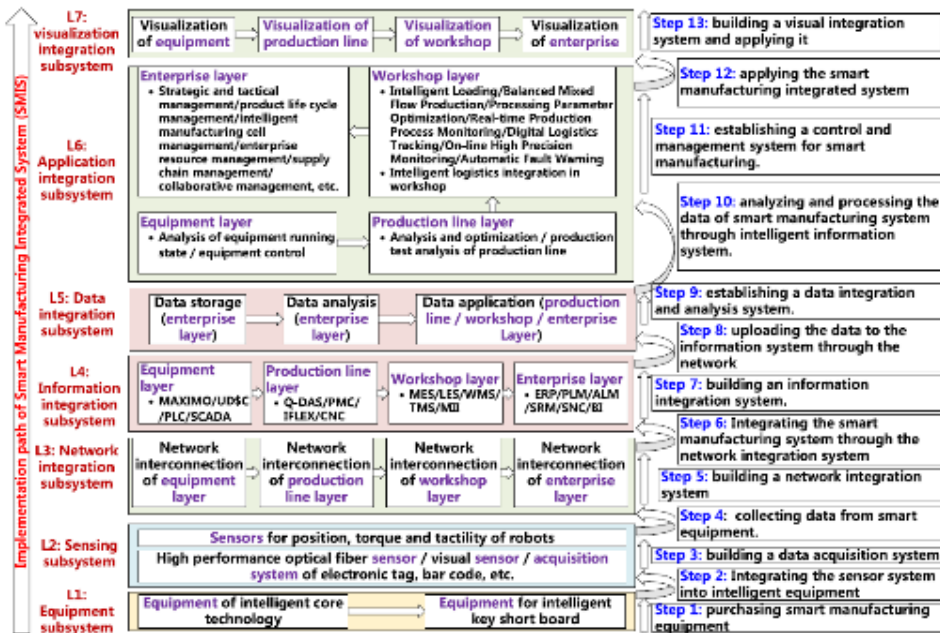


Fig. 4.9. Calea de implementare pentru SMIS (Zhang, X. ș.a., 2019)



Pasul 1: Întreprinderea achiziționează echipamente inteligente, inclusiv echipamente cu tehnologie de bază inteligentă și echipamente inteligente specifice, cum ar fi mașini-unelte CNC de înaltă calitate și roboți industriali, echipamente cu senzori inteligente, echipamente de control inteligente, echipamente de testare inteligente, echipamente de asamblare inteligentă, logistică inteligentă și echipamente de depozitare.

Pasul 2: Se integrează sistemele de senzori în echipamentele inteligente de producție pentru a se pregăti pentru achiziția de date, cum ar fi senzori pentru poziție, cuplu și tactilitate a roboților, senzor de fibră optică de înaltă performanță și senzor vizual, etichetă electronică, cod de bare și alte echipamente ale sistemului de achiziție.

Pasul 3: Se stabilește un sistem de achiziție de date, inclusiv sisteme hardware și software pentru senzor, SCADA, PLC și PDU.

Pasul 4: Se colectează date de la echipamente inteligente prin intermediul sistemului de achiziție de date.

Pasul 5: Se configurează un sistem de integrare în rețea, inclusiv sistemele de interconectare a rețelei la nivel de echipament, la nivel de întreprindere, la nivel de atelier și la nivel de întreprindere.

Pasul 6: Se conectează toate unitățile sistemului de producție inteligentă prin sistemul de integrare în rețea.

Pasul 7: Se stabilește un sistem de integrare a informațiilor. Prin sistemul de integrare în rețea se stabilește integrarea verticală a informațiilor și integrarea orizontală a informațiilor. Sistemul de integrare a informațiilor al întregii întreprinderi este construit în jurul nivelului de echipament, nivel de linie de producție, nivel de atelier și nivel de întreprindere.

Pasul 8: Se încarcă datele colectate în sistemul informațional prin construirea sistemului de integrare în rețea.

Pasul 9: Se configurează un sistem de integrare și analiză a datelor, inclusiv stocarea datelor, analiza datelor și aplicațiile de date.

Pasul 10: Se analizează și se procesează datele colectate prin sistemul de informații al întreprinderii.

Pasul 11: Se stabilește un sistem de control și management din mai multe straturi. Printre acestea, sistemul în stratul de echipamente include sisteme pentru analiza stării de funcționare și controlul echipamentelor. Stratul de sistem în linia

de producție include sisteme pentru optimizare, testare și analiză în linia de producție. Sistemul de strat de atelier este sisteme de control și management în atelier digitizat, inclusiv șapte module funcționale și integrare pentru logistică inteligentă în atelier. Sistemul la nivel de întreprindere include sisteme pentru management strategic și tactic, sistem pentru managementul ciclului de viață al produsului, sistem pentru managementul celulelor de producție inteligentă, platformă de management inteligent al întreprinderii, sistem de management al lanțului de aprovizionare și sistem de management colaborativ.

Pasul 12: Se aplică sistemul integrat de producție inteligentă. Sistemele de control și management în producția inteligentă sunt aplicate activității de producție corespunzătoare, cum ar fi realizarea de alimentare și descărcare inteligente la nivel de atelier, producție echilibrată în flux mixt, optimizarea parametrilor de procesare, monitorizarea în timp real a procesului de producție, urmărirea logistică digitală, monitorizare on-line de înaltă precizie, avertizare automată timpurie a defecțiunilor echipamentelor și integrare logistică inteligentă a atelierului.

Pasul 13: Se stabilește un sistem de integrare vizuală pentru a vizualiza datele de pe platformă, care este propice pentru luarea deciziilor intuitive și precise.

Prin cei 13 pași de mai sus se poate oferi o cale de implementare de referință pentru ca întreprinderea să implementeze SMIS.

Pentru implementarea SMIS în întreprinderile de producție discretă, acestea ar trebui să aibă capacitatea de modelare digitală și de simulare a fluxului de proces și a aspectului și ar trebui să aibă capacitatea de simulare vizuală a proceselor cheie de producție, procesare și asamblare. În plus, întreprinderile ar trebui să dispună de echipamente avansate de detectare, control, detectare, asamblare, logistică și procese inteligente și software de management al producției.

Pentru implementarea SMIS în întreprinderile de proces, acestea ar trebui să aibă capacitatea de vizualizare a procesului de producție și de optimizare previzibilă a procesului de producție. În plus, întreprinderile ar trebui să aibă sisteme de senzori, instrumente, control și analiză în rețea, detecție on-line, monitorizare de la distanță și diagnosticare a defecțiunilor în managementul și controlul producției.

#### 4.4. Sinteza capitolului

După înțelegerea obținută în etapa **DS-I**, pentru a determina cei mai potriviți factori necesari a fi abordați în etapa **PS** a **DRM**, în scopul de a îmbunătăți situația existentă, a fost dezvoltat un model de impact bazat pe modelul de referință și pe modelul inițial de impact, care descriu situația dorită și îmbunătățită, a fost dezvoltat sprijinul planificat ce vizează abordarea factorilor cheie și s-a evaluat sprijinul real cu scopul de a trecere la etapa **DS-II**.

SMIS propus în acest capitol este o îmbunătățire și o completare a cadrului existent de sistem de fabricație inteligent.

Modelul de referință al SMIS a fost analizat prin metoda ingineriei de sistem. Pe baza acestui model, a fost propusă arhitectura generală a SMIS. Cadrul general al SMIS, modelul de referință și subsistemele de referință aferente pot fi utilizate pentru a proiecta, a stabili și a realiza SMIS.

Principalele contribuții includ următoarele:

- (1) cadrul general pentru SMIS bazat pe arhitectura SMS;
- (2) subsistemele de referință pentru SMIS, formate din mai multe straturi și mai multe perspective pentru situația actuală a producției inteligente;
- (3) sistemul fizic detaliat pentru SMIS, format din stratul de echipamente, stratul de linie de producție, stratul de atelier și stratul de întreprindere, pentru a viza arhitectura de implementare a sistemului integrat de producție inteligentă;
- (4) calea de implementare pentru SMIS, pentru a integra diferite subsisteme.

Rezultatele pot constitui o referință pentru întreprinderile care doresc să implementeze un sistem integrat de fabricație inteligent.

## 5. IMPLEMENTAREA UNUI SISTEM INTEGRAT DE FABRICAȚIE INTELIGENT

### 5.1. Obiectivul capitolului

Prezentul capitol corespunde celei de-a patra etape a DRM, **Studiul descriptiv II (DS-II)**, în care se determină dacă sprijinul poate fi utilizat pentru îndeplinirea sarcinii pentru care este destinat, se identifică îmbunătățirile necesare pentru conceptul, elaborarea, realizarea, introducerea și contextul sprijinului, se evaluează ipotezele din spatele situației existente reprezentate în modelul de referință, precum și situația dorită reprezentată în modelul de impact.

**Obiectivul operațional (OP4)** are în vedere implementarea unui sistem de fabricație inteligent integrat, cu aplicare în industria de autovehicule și pentru personalizare individuală în masă, în contextul Industriei 4.0.

### 5.2. Arhitectura generală de referință a sistemului integrat de fabricație inteligent

Cadrul, scenariul de aplicare și calea de implementare a sistemului integrat de fabricație inteligentă au fost studiate prin combinarea ideii de inginerie a sistemului de proiectare de nivel superior cu metoda de validare a cazului specific întreprinderii, care combină teoria cu practica.

Arhitectura generală de referință a sistemului integrat de fabricație inteligent (*Smart Manufacturing Integrated System*, SMIS) a fost studiată în jurul a trei planuri compuse din interacțiunea reciprocă a trei dimensiuni, reprezentate în figura 5.1 (Zhang și Ming, 2021).

Planul compus din dimensiunea Caracteristici inteligente (C) și dimensiunea Stratului de sistem (L) a fost împărțit în patru direcții de implementare: C1-L (fabrică automatizată bazată pe resurse), C2-L (fabrică de interconectare bazată pe rețea), C3-L (fabrică de partajare a datelor bazată pe

platformă), C4-L (fabrică de integrare a sistemului informațional). Printre acestea, C1-L a fost împărțit în C1-L1 (echipament pentru tehnologie de bază și tastatură scurtă), C1-L2 (proiectare și simulare digitală), C1-L3 (linie de producție automată), C1-L4 (atelier digital) și C1-L5 (management inteligent în cadrul întreprinderii), conform celor cinci straturi de sistem, care sunt L1 (strat de echipament), L2 (strat de proces), L3 (strat de linie de producție), L4 (strat de atelier) și L5 (strat de întreprindere).

Planul compus din dimensiunea Caracteristici inteligente (C) și dimensiunea Ciclul de viață al produsului (P) a fost definit ca CP (fabrica de modele noi pentru ciclul de viață al produsului). Planul compus din dimensiunea stratului de sistem (L) și dimensiunea ciclului de viață al produsului (P) a fost definit ca LP (fabrica de modele noi pentru personalizare individuală).

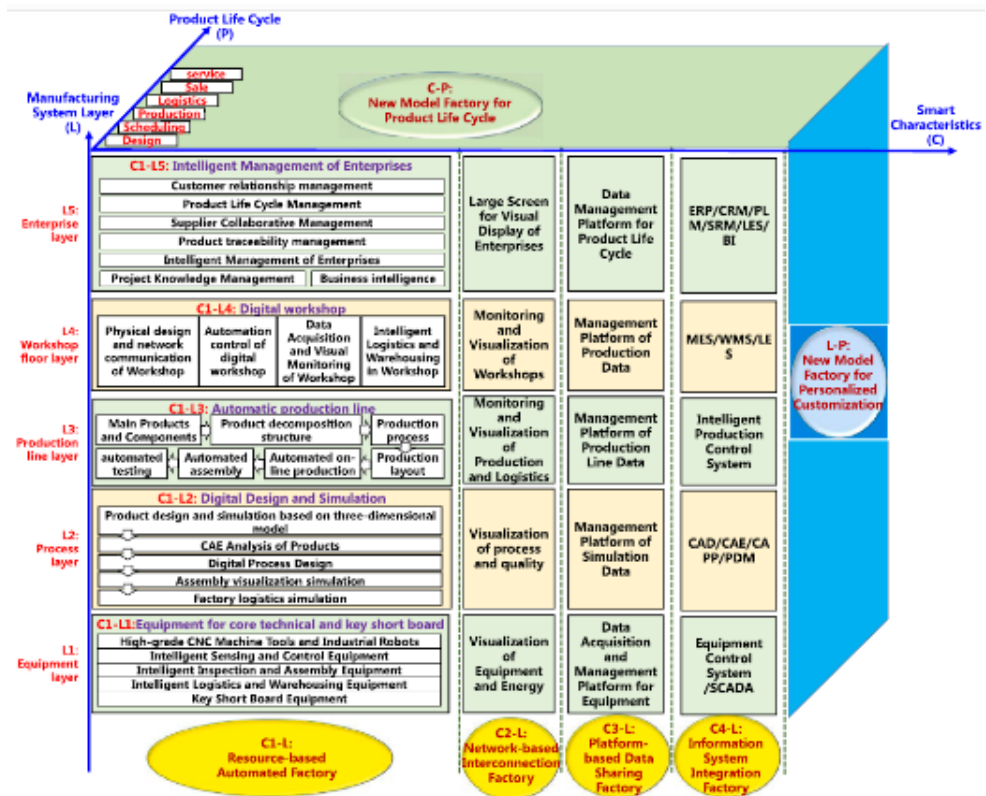


Fig. 5.1. O arhitectură de referință generală pentru SMIS bazată pe model tridimensional (Zhang și Ming, 2021)

### 5.3. Implementarea SMIS

Pe baza analizei arhitecturii de referință pentru SMIS, implementarea SMIS este împărțită în șase pași mari (fig. 5.2).

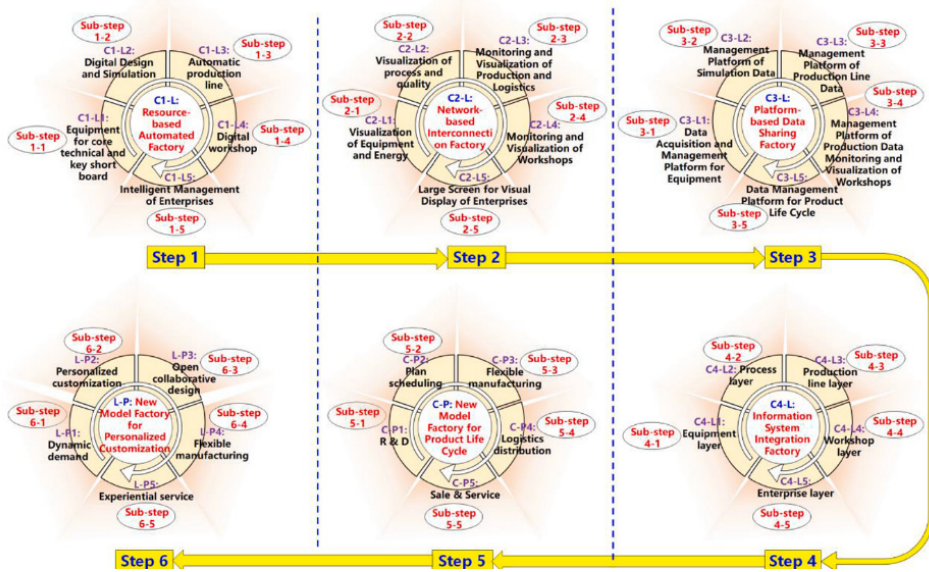


Fig. 5.2. Implementarea SMIS (Zhang și Ming, 2021)

Pașul 1 constă în înființarea unei fabrici automatizate bazate pe resurse, care include cinci sub-pași: echipamente pentru tehnologie de bază și tastatură scurtă, proiectare și simulare digitală, linie de producție automată, atelier digital și management inteligent al întreprinderii.

Pașul 2 este înființarea fabricii de interconectare bazată pe rețea, care include cinci sub-pași: vizualizarea echipamentelor și a energiei, vizualizarea procesului și a calității, monitorizarea și vizualizarea producției și logisticii, monitorizarea și vizualizarea atelierelor și ecran mare pentru vizualizări în cadrul întreprinderii.

Pașul 3 este înființarea unei fabrici de partajare a datelor bazată pe platformă, care include cinci sub-pași: platformă de achiziție și gestionare a datelor pentru echipamente, platformă de gestionare a datelor de simulare, platformă a datelor liniei de producție, platformă de gestionare a datelor de

producție, monitorizarea și vizualizarea atelier și platformă de gestionare a datelor pentru ciclul de viață al produsului.

Pasul 4 este înființarea fabricii de integrare a sistemului informațional, care include cinci sub-pași: integrarea sistemului informațional pentru ierarhia echipamentelor, ierarhia proceselor, ierarhia liniei de producție, ierarhia atelierului și ierarhia întreprinderii.

Pasul 5 este înființarea unei noi fabrici de modele pentru ciclul de viață al produsului, care include cinci sub-pași: inovarea de noi modele de cercetare și dezvoltare, planificare și programare, producție flexibilă, logistică inteligentă, vânzare și service.

Pasul 6 este înființarea noii fabrici de modele pentru personalizare individuală, care include cinci sub-pași: inovarea de noi modele de cerere dinamică, personalizare, proiectare colaborativă deschisă, fabricație flexibilă și servicii experimentale.

## **5.4. Studiu de caz al implementării SMIS în industria de autovehicule**

Automobilele au o structură de produs relativ complexă, iar întreprinderile din acest domeniu aparțin industriei de producție tipice cheie. Pentru a analiza etapele specifice de implementare a SMIS se va lua ca exemplu industria auto.

Scopul întreprinderii este transformarea și upgrade-ul la intelectualizare sub condiția de a avea automatizare (cu linii de producție automate) și informatizare (cu sisteme de informare de bază de producție și management). În plus, modul de producție al întreprinderilor trebuie să facă ajustări flexibile, ca răspuns la nevoile dinamice și personalizate ale achiziției de mașini ale clienților actuali.

Pentru atingerea obiectivelor de mai sus este studiată în detaliu calea de implementare a SMIS.

### **5.4.1. Pasul 1: C1-L (Fabrica automatizată bazată pe resurse)**

Fabrica automatizată bazată pe resurse a fost dezvoltată din elementele de resurse ale producției inteligente pentru această întreprindere de automobile. A

fost împărțit în C1-L1: echipamente pentru tehnologie de bază și tastatură scurtă, C1-L2: simulare și proiectare digitală, C1-L3: linie de producție automată, C1-L4: atelier digital și C1-L5: management inteligent a întreprinderilor.

### 5.4.1.1. Sub-etapa 1-1: C1-L1 (Echipamentul tehnic de bază)

În industria de automobile, secvența, sursa majoră și procesul de echipamente inteligente au fost date pentru referință și sunt prezentate în figura 5.3. Echipamentul pentru tehnologia de bază și placa scurtă a tastelor au fost dezvoltate din perspectiva elementelor de resurse din stratul de echipamente (L1) și a fost împărțit în cinci categorii, în funcție de diferitele funcții intelectualizate (digitizare, detecție, control, intelectualizare etc.) și utilizări (prelucrare, testare, asamblare, logistică, depozitare etc.)

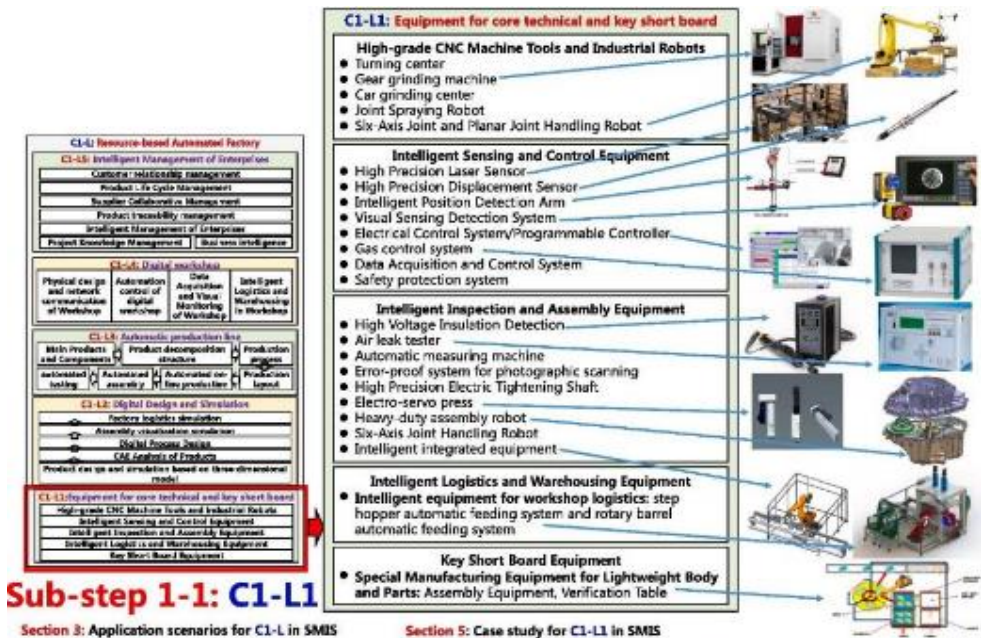


Fig. 5.3. Echipamente tehnice de bază pentru fabrici automatizate (Zhang și Ming, 2021)

### 5.4.1.2. Sub-etapa 1-2: C1-L2 (Proiectarea și simularea digitală)

În industria de automobile, secvența, sursa majoră și procesul de proiectare și simulare digitală au fost date pentru referință și sunt prezentate în



figura 5.4. Proiectarea și simularea digitală au fost dezvoltate din perspectiva elementelor de resurse din stratul de proces (L2).

Acesta a fost împărțit în cinci module, în funcție de secvența, sursa și procesul de construcție pentru proiectarea și simularea digitală, care include: proiectarea și simularea produsului, analiza CAE a produselor, proiectarea procesului digital, asamblare simulare de vizualizare și simulare a logisticii fabricii.

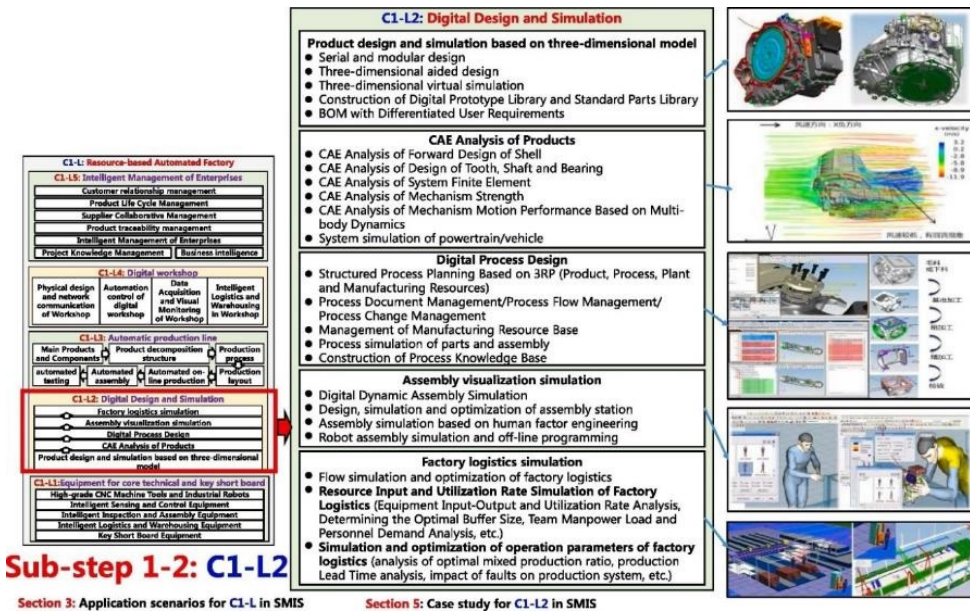


Fig. 5.4. Proiectare și simulare digitală pentru fabrici automatizate (Zhang și Ming, 2021)

### 5.4.1.3. Sub-etapa 1-3: C1-L3 (Linia de producție automată)

În industria de automobile, așa cum se arată în figura 5.5, secvența, sursa majoră și procesul de proiectare și simulare digitală au fost date pentru referință. Linia de producție automată este compusă din diferite elemente de resurse în stratul de linie de producție (L3).

Acesta a fost împărțit în șapte module, în funcție de secvența, sursa și procesul de construcție pentru linia de producție, care include: produse majore,

structura de descompunere a produsului, procesul de producție, aspectul de producție, producție automatizată, testare automată a ansamblului automat etc.

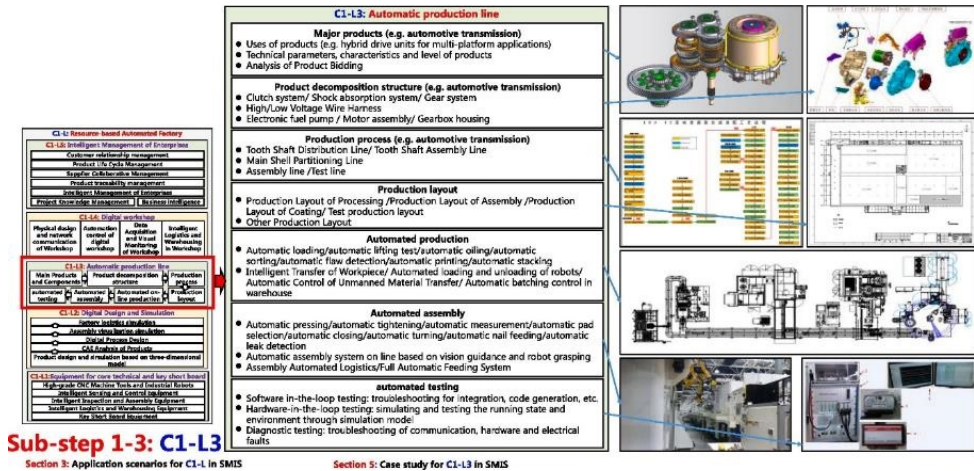


Fig. 5.5. Linie automată de producție pentru fabrici automatizate (Zhang și Ming, 2021)

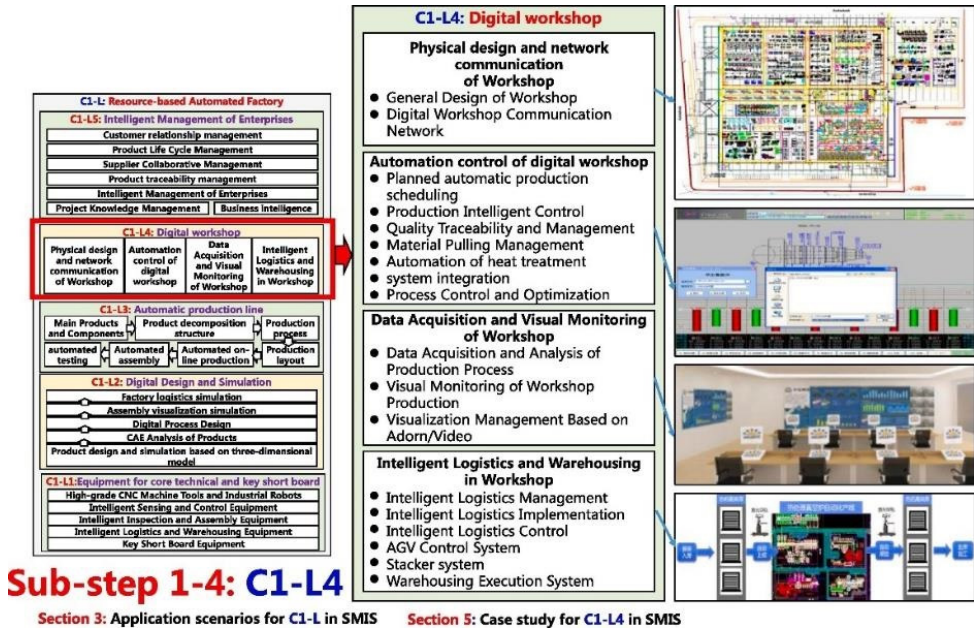


Fig. 5.6. Atelier digital pentru fabrici automatizate (Zhang și Ming, 2021)

5.4.1.4. Sub-etapa 1-4: C1-L4 (Atelierul digital)

În industria auto, secvența, sursa majoră și procesul atelierului digital au fost date pentru referință și sunt prezentate în figura 5.6. Atelierul digital a fost dezvoltat din perspectiva elementelor de resurse din atelier (L4).

A fost împărțit în patru module, în funcție de secvența, sursa și procesul de construcție pentru atelierul digital, care include: aspect fizic atelier, sistem de achiziție de date, sistem de control automat, afișare vizuală și monitorizare, logistică inteligentă în atelier, stocare inteligentă în atelier, comunicare cu informații în rețea etc.

5.4.1.5. Sub-etapa 1-5: C1-L5 (Managementul inteligent al întreprinderilor)

În industria auto, secvența, sursa majoră și procesul de management inteligent al întreprinderilor au fost date pentru referință și sunt prezentate în figura 5.7. Managementul inteligent al întreprinderilor a fost dezvoltat din perspectiva elementelor de resurse din întreprinderi (L5).

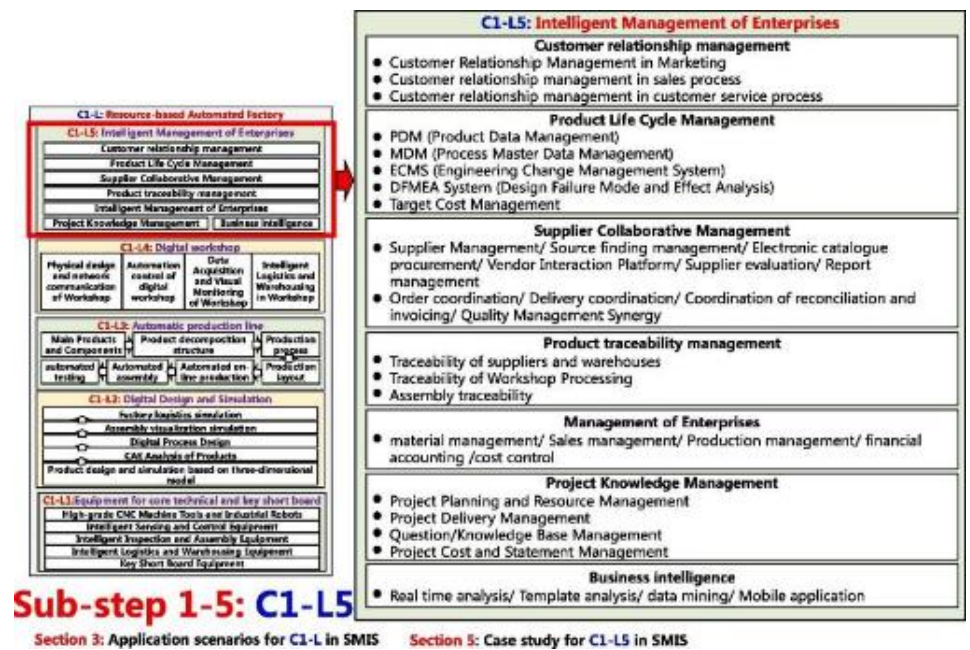


Fig. 5.7. Managementul inteligent al întreprinderilor pentru fabrici automatizate (Zhang și Ming, 2021)

Acesta a fost împărțit în șapte module în funcție de secvența, sursa și procesul de construcție pentru managementul inteligent al întreprinderilor, care include: managementul ciclului de viață al produsului orientat spre produs, managementul relațiilor cu clienții orientat către client, managementul colaborativ al furnizorilor orientat spre lanțul de aprovizionare, managementul trasabilității produsului, managementul de întreprinderi, managementul cunoștințelor de proiect, business intelligence etc.

#### **5.4.1. Pasul 2: C2-L (Fabrica de interconectare bazată pe rețea)**

În industria de automobile, secvența, sursa majoră și procesul fabricii de interconectare bazată pe rețea au fost date pentru referință și sunt prezentate în figura 5.8. Luând ca exemplu al patrulea strat al cadrului (L4, monitorizarea și vizualizarea atelierelor), acesta se referă la monitorizarea conținutului și scena producției în atelier, incluzând funcționarea echipamentelor în atelier, consumul total de energie curent al tuturor echipamentelor din atelier, echipament defect în atelier, materiale în procesul curent, linie de producție, lotul de producție curent și cantitatea de comandă, rata de finalizare a produsului etc. În conformitate cu pașii și compoziția acestui cadru de referință, întreprinderile pot realiza o fabrică de interconectare bazată pe rețea pentru referință.

#### **5.4.2. Pasul 3: C3-L (Fabrica de partajare a datelor pe platformă)**

În industria auto, secvența, sursa majoră și procesul fabricii de partajare a datelor bazate pe platforme au fost date pentru referință și sunt prezentate în figura 5.9. În partea dreaptă a figurii este integrarea în rețea. Fluxul de date se bazează pe transmisia prin rețea. Schimbul de date în diferite straturi este suportat de diferite rețele. Echipamentele de conectare la rețea și linia de producție includ rețea de senzori, PLC, gateway inteligent etc. Rețelele care conectează liniile de producție și atelierelor includ: Ethernet, Internetul wireless al lucrurilor etc. Atelierul și întreprinderea de conectare la rețea includ, de asemenea, GPS, 5G, Beidou, NB-IOT etc. Luând ca exemplu al patrulea strat (L4, platforma de gestionare a datelor de producție) al cadrului, acesta se referă la platforma de monitorizare, gestionare și analiză a datelor produse în atelier, inclusiv platformă de analiză și afișare în timp real a datelor de fabricație, platforma MII (*Manufacturing Integration and Intelligence*) etc.



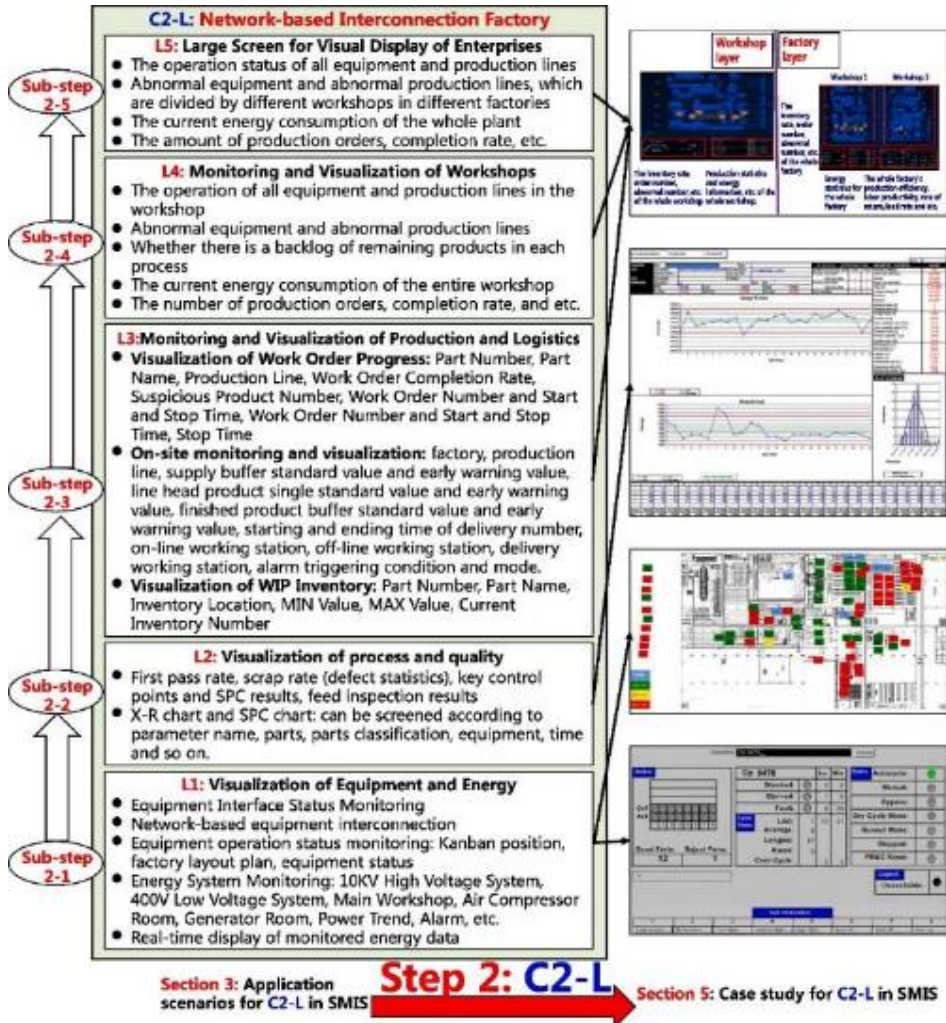


Fig. 5.8. Fabrica de interconectare în rețea (Zhang și Ming, 2021)

### 5.4.3. Pasul 4: C4-L (Fabrica de integrare a sistemului informațional)

În industria de automobile, secvența, sursa majoră și procesul fabricii de interconectare bazată pe rețea au fost date pentru referință și sunt prezentate în figura 5.10. Colaborarea sistemelor informatice în lanțul de producție (integrare verticală) se bazează pe rețele de comunicații și aplicații mobile, inclusiv:

integrarea între dispozitive, integrarea între liniile de producție, integrarea între ateliere, integrarea între întreprinderi și integrarea între cele trei de mai sus.

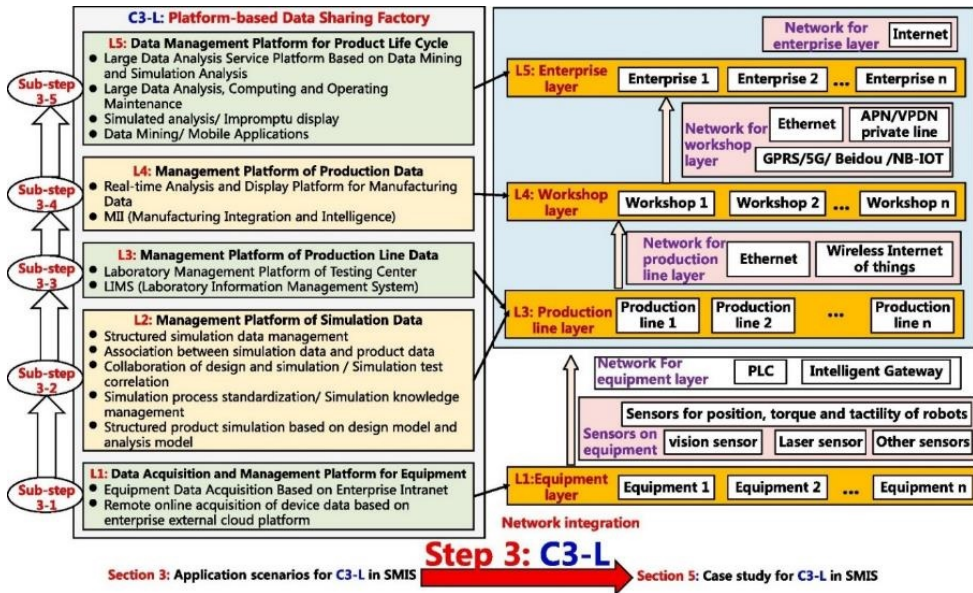


Fig. 5.9. Fabrica de partajare a datelor bazată pe platformă (Zhang și Ming, 2021)

Integrarea informațională a ciclului de viață al produsului este integrare orizontală, inclusiv cercetare și dezvoltare asistată de tehnologia informației avansate (R&D), integrarea informațiilor de monitorizare pentru planificare și execuție (Plan de producție), integrarea informațiilor în procesul de achiziție (Achiziție), integrarea informațiilor în proces de producție (Producție) și integrarea informațiilor de calitate, trasabilitate și prevenirea erorilor (Testări de calitate) etc.

#### 5.4.4. Pasul 5: CP (Fabrica de modele noi pentru ciclul de viață al produsului)

În industria de automobile, secvența, sursa majoră și procesul noului model de fabrică pentru ciclul de viață al produsului au fost date pentru referință și sunt prezentate în figura 5.11. Inteligența cercetării și dezvoltării include: proiectarea inovatoare a rețelei deschise de sinergie ecologică, dezvoltarea modulară și proiectarea proceselor bazate pe personalizare.

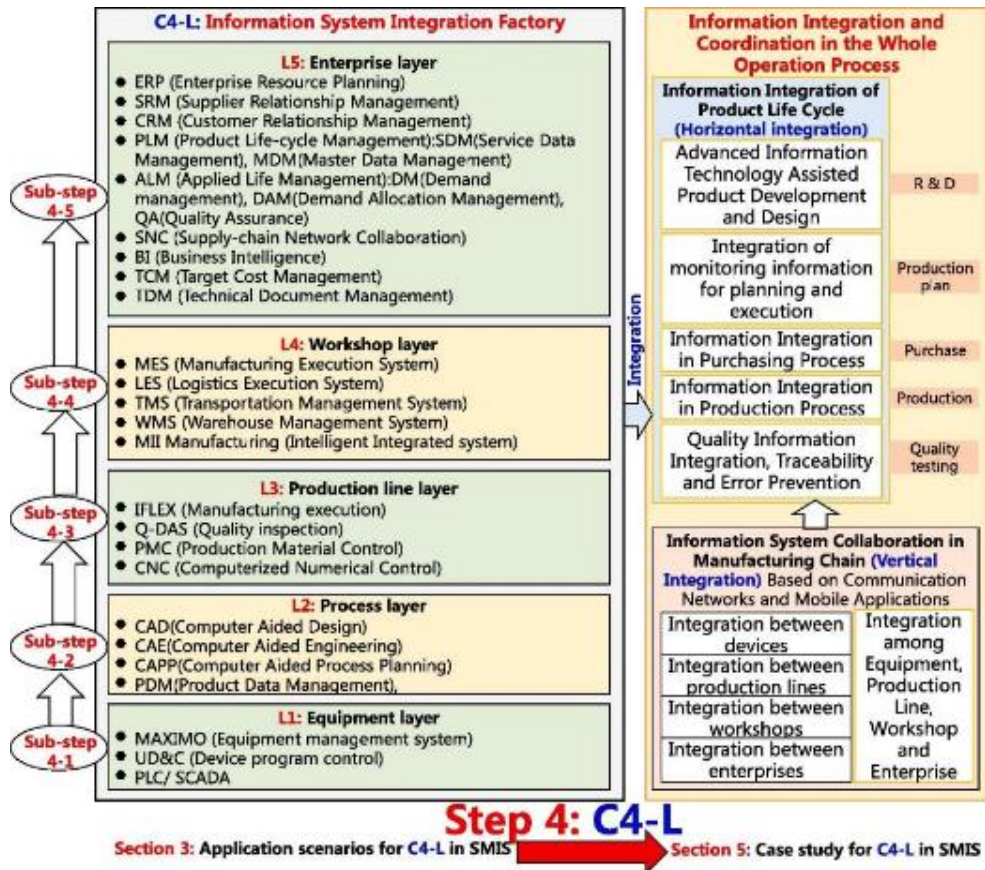


Fig. 5.10. Fabrica de integrare a sistemului informațional (Zhang și Ming, 2021)

Programarea inteligentă se bazează pe comenzile clienților, cum ar fi: planul de producție în timp real bazat pe comanda în timp real a clientului și timpul de finalizare dinamică a comenzii bazat pe negocierea cu clientul, modelul de planificare a producției bazat pe configurație etc. Luarea celui de-al treilea strat (producție flexibilă) din cadrul de exemplu se referă la flexibilitatea procesului de producție, incluzând: producție flexibilă, producție în linie mixtă multiplatformă, asamblare modulară și vizuală etc. Printre acestea, producția flexibilă include: producție produs coliniar multiplatformă, prevenție fiabilă și perfectă a erorilor, eficiență ridicată și fabricație flexibilă etc. Producția în linie mixtă multiplatformă include: strategia de amestecare, optimizarea comutării



colorilor și modelelor, tragere accesorii, producție de piese standard, producție de piese individualizate etc.

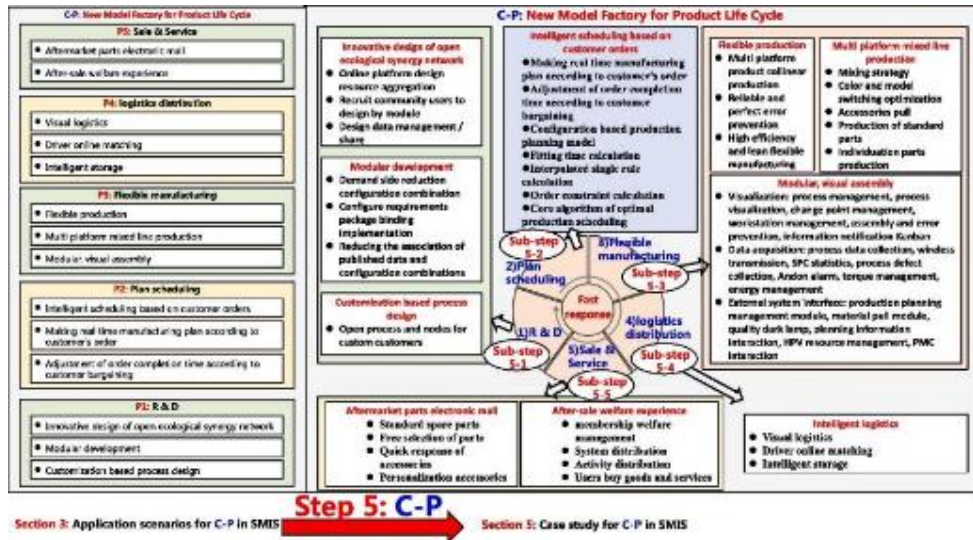


Fig. 5.11. Fabrica de modele noi pentru ciclul de viață al produsului (Zhang și Ming, 2021)

### 5.4.5. Pasul 6: LP (Fabrica de modele noi pentru personalizare individuală)

În industria de automobile, secvența, sursa majoră și procesul fabricii de modele noi pentru personalizare individuală au fost date pentru referință și sunt prezentate în figura 5.12. Procesul ciclului de viață al produsului a fost redefinit ca: (C) cerere dinamică pentru client, (B) afaceri pentru personalizare individuală, (D) proiectare colaborativă deschisă, (M) fabricație flexibilă și (S) servicii experimentale.

În etapa cererii clientului, procesul de implementare a SMIS include recunoașterea cererii, monitorizarea cererii, achiziția cererii, predicția inteligentă a cererii dinamice, clasificarea cererii, managementul cererii etc. În etapa de personalizare a afacerii, procesul SMIS include prognoza precisă a vânzărilor, personalizarea produselor, personalizarea comenzilor etc. Procesul de proiectare al SMIS include: schema de proiectare, căutare online de resurse de design comunitar, potrivire rezonabilă și optimizare a resurselor de design comunitar etc.



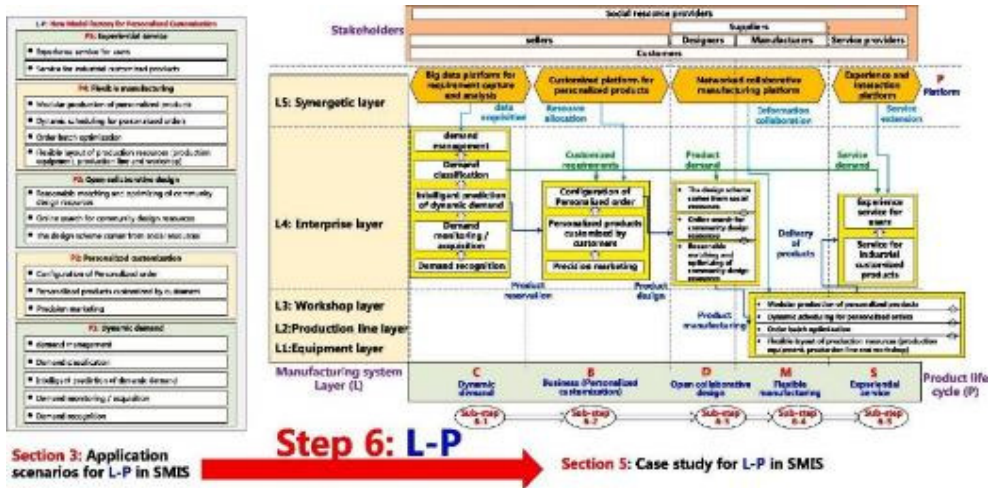


Fig. 5.12. Fabrica de modele noi pentru personalizare individuală (Zhang și Ming, 2021)

Procesul flexibil de fabricație al SMIS include: disponerea flexibilă a resurselor de producție (echipamente de producție, linie de producție și atelier), optimizarea loturilor de comenzi, programare dinamică pentru comenzi personalizate, producție modulară de personalizare individuală etc. Procesul de service al SMIS include serviciul de experiență a utilizatorului și serviciul industrial de personalizare individuală etc.

În plus, platforma de colaborare în rețea include: platformă de analiză și achiziție a cererii clienților pe baza datelor mari în faza C, platformă de personalizare pentru produs în faza B, platformă de producție colaborativă în rețea în faza D și M, platformă de servicii pentru experiență și interacțiune în faza S.

### 5.4.6. Evaluarea și analiza SMIS

Pentru a evalua și analiza SMIS în industria auto este adoptată metoda Fuzzy DEMATEL, pașii fiind următorii (Zhang și Ming, 2021-2):

Pasul 1: Sunt inițializați factorii SMIS în industria auto.

Factorii SMIS sunt exprimați în  $F_1, F_2, \dots, F_{29}, F_{30}$  (tabelul 5.1).

Pasul 2: Se determină gradul de impact și se construiește matricea A.

Scorul se bazează pe aplicarea dimensiunilor și nivelurilor cadrului SMIS în industria de automobile. Criteriile de selecție ale experților combină experți interni și externi. În procesul de punctare, experții se concentrează pe analiza valorii cuprinzătoare a suportului de personal, suport financiar, alocarea resurselor, facilități hardware, platformă de sistem, impact asupra mediului etc. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 5.2, cu scoruri variind de la 0 la 10.

Tab. 5.1. Inițializarea factorilor de influență ai SMIS, după (Zhang și Ming, 2021)

Nr. Categorie	Simboluri Factori	
1. C1-L: Fabrică automatizată bazată pe resursă	F1	C1-L1: Echipamente cu competitivitate de bază
2.	F2	C1-L2: Simulare și proiectare cu capacitate digitală
3.	F3	C1-L3: În amonte și în aval de linia de producție cu grad ridicat de automatizare
4.	F4	C1-L4: Atelier bazat pe digital twin
5.	F5	C1-L5: Management inteligent al deciziilor
6. C2-L: Fabrică de interconectare bazată pe rețea	F6	C2-L1: Vizualizarea echipamentelor și energiei
7.	F7	C2-L2: Vizualizare în stratul de proces
8.	F8	C2-L3: Vizualizarea logisticii în linia de producție
9.	F9	C2-L4: Vizualizare în stratul atelier
10.	F10	C2-L5: Vizualizare în stratul de întreprindere
11. C3-L: Fabrică de partajare a datelor bazată pe platformă	F11	C3-L1: Platformă de partajare a datelor în stratul dispozitivului
12.	F12	C3-L2: Platforma de management al datelor de simulare
13.	F13	C3-L3: Platformă de gestionare a datelor liniei de producție
14.	F14	C3-L4: Platforma de partajare a datelor a atelierului
15.	F15	C3-L5: Platformă de partajare a datelor în stratul ciclului de viață al produsului
16. C4-L: Fabrica integrată bazată pe sistem informatic	F16	C4-L1: Nivelul de echipamente pentru integrarea sistemului informatic
17.	F17	C4-L2: Stratul de proces pentru integrarea sistemului informatic
18.	F18	C4-L3: Stratul de linie de producție pentru integrarea sistemului informațional
19.	F19	C4-L4: Stratul atelier pentru integrarea sistemelor informatice
20.	F20	C4-L5: Stratul de întreprindere pentru integrarea sistemului informațional
21. CP: Fabrică pentru inovarea în mod nou în ciclul de viață al produsului F21		C-P1: Cercetare și dezvoltare a noului model
22.	F22	C-P2: Planificarea programării noului model
23.	F23	C-P3: Fabricarea flexibilă a noului model
24.	F24	C-P4: Distribuția logistică a noului model
25.	F25	C-P5: Vânzare și service model nou
26. LP: Fabrică de inovație în mod nou în personalizarea personalizată	F26	L-P1: Cerere dinamică
27.	F27	L-P2: Personalizare personalizată
28.	F28	L-P3: Design deschis colaborativ
29.	F29	L-P4: Fabricare flexibilă
30.	F30	L-P5: Serviciu experiențial

Pasul 3: Se construiește matricea de influență directă  $Z$  a ambiguității triunghiulare.

Numărul triunghiular fuzzy  $A$  este definit ca  $(l, m, u)$  și  $0 \leq l \leq m \leq u$ , dacă și numai dacă  $l = m = u$ , atunci  $A=1$  (tabelul 5.3).

Tab. 5.2. Gradul de influență între perechi (Zhang și Ming, 2021)

Factors	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	...	F <sub>23</sub>	F <sub>24</sub>	F <sub>25</sub>	F <sub>26</sub>	F <sub>27</sub>	F <sub>28</sub>	F <sub>29</sub>	F <sub>30</sub>
F <sub>1</sub>	0	5	1	9	7	10	3	...	10	2	7	5	3	6	1	9
F <sub>2</sub>	3	0	6	7	1	5	5	...	9	8	3	9	10	1	8	8
F <sub>3</sub>	1	7	0	9	2	9	7	...	5	5	3	4	5	8	4	6
F <sub>4</sub>	3	3	1	0	6	9	2	...	4	3	9	9	6	9	7	8
F <sub>5</sub>	3	8	6	7	0	5	9	...	7	3	5	2	7	7	10	9
F <sub>6</sub>	9	2	10	6	2	0	8	...	10	2	2	7	6	3	9	3
F <sub>7</sub>	4	1	10	7	9	3	0	...	2	3	9	5	6	2	7	7
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
F <sub>23</sub>	4	5	10	5	2	2	1	...	0	2	4	7	5	2	10	6
F <sub>24</sub>	3	2	8	9	9	8	8	...	10	0	2	8	3	3	7	1
F <sub>25</sub>	2	1	10	1	8	7	5	...	3	4	0	1	8	9	9	5
F <sub>26</sub>	3	6	6	10	4	10	2	...	1	3	4	0	3	4	4	1
F <sub>27</sub>	10	6	1	1	2	6	6	...	5	10	7	1	0	6	5	7
F <sub>28</sub>	8	1	10	2	2	8	7	...	5	10	6	9	8	0	5	1
F <sub>29</sub>	5	9	2	1	3	7	4	...	9	9	9	10	6	5	0	6
F <sub>30</sub>	4	5	10	5	2	2	1	...	0	2	4	7	5	2	10	0

Tab. 5.3. Numărul triunghiular fuzzy A (Zhang și Ming, 2021)

No.	1	2	3	4	5
Triangular fuzzy number	(0.7,0.9,1.0)	(0.5,0.7,0.9)	(0.3,0.5,0.7)	(0.1,0.3,0.5)	(0.0,0.01,0.3)

Funcția de apartenență  $\mu_A(x)$  a lui A este definită după cum urmează:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [l, u] \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m \leq x \leq u \end{cases}$$

În sfârșit, este construită matricea Z, unde  $Z_{ij} = (la_{ij}, ma_{ij}, ra_{ij})$

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{z}_{12} & \dots & \tilde{z}_{1j} \\ \tilde{z}_{21} & 0 & \dots & \tilde{z}_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{z}_{i1} & \tilde{z}_{i2} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Pentru a construi Z se folosește MATLAB R2014a (tab. 5.4).

Pasul 4: Se construiește matricea de standardizare X a gradului de influență.

După standardizarea Z, rezultatul este redat în tabelul 5.5.

Tab. 5.4. Rezultatul Z (Zhang și Ming, 2021)

Factors	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	...	F <sub>28</sub>	F <sub>29</sub>	F <sub>30</sub>
F <sub>1</sub>	(0, 0.1, 0.3)	(0, 0, 0)	(0.1, 0.3, 0.5)	...	(0.1, 0.3, 0.5)	(0, 0, 0)	(0.1, 0.3, 0.5)
F <sub>2</sub>	(0.5, 0.7, 0.9)	(0, 0.1, 0.3)	(0, 0, 0)	...	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)
F <sub>3</sub>	(0.1, 0.3, 0.5)	(0, 0, 0)	(0, 0.1, 0.3)	...	(0.7, 0.9, 1)	(0, 0, 0)	(0.7, 0.9, 1)
...	...	...	...	...	...	...	...
F <sub>28</sub>	(0, 0, 0)	(0.1, 0.3, 0.5)	(0.1, 0.3, 0.5)	...	(0, 0.1, 0.3)	(0, 0, 0)	(0.1, 0.3, 0.5)
F <sub>29</sub>	(0.5, 0.7, 0.9)	(0, 0, 0)	(0.5, 0.7, 0.9)	...	(0, 0, 0)	(0, 0.1, 0.3)	(0, 0, 0)
F <sub>30</sub>	(0.1, 0.3, 0.5)	(0, 0, 0)	(0.7, 0.9, 1)	...	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)	(0, 0.1, 0.3)

Tab. 5.5. Rezultatul X (Zhang și Ming, 2021)

Factors	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	...	F <sub>28</sub>	F <sub>29</sub>	F <sub>30</sub>
F <sub>1</sub>	(0, 0.008, 0.025)	(0, 0, 0)	(0.008, 0.025, 0.042)	...	(0, 0, 0)	(0.008, 0.025, 0.042)	(0, 0, 0)
F <sub>2</sub>	(0.042, 0.059, 0.076)	(0, 0.008, 0.025)	(0, 0, 0)	...	(0.008, 0.025, 0.042)	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)
F <sub>3</sub>	(0.008, 0.025, 0.042)	(0, 0, 0)	(0, 0.008, 0.025)	...	(0, 0, 0)	(0.059, 0.076, 0.085)	(0, 0, 0)
...	...	...	...	...	...	...	...
F <sub>28</sub>	(0, 0, 0)	(0.008, 0.025, 0.042)	(0.008, 0.025, 0.042)	...	(0, 0.008, 0.025)	(0, 0, 0)	(0.008, 0.025, 0.042)
F <sub>29</sub>	(0.042, 0.059, 0.076)	(0, 0, 0)	(0.042, 0.059, 0.076)	...	(0, 0, 0)	(0, 0.008, 0.025)	(0, 0, 0)
F <sub>30</sub>	(0.008, 0.025, 0.042)	(0, 0, 0)	(0.059, 0.076, 0.085)	...	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)	(0, 0.008, 0.025)

$$\tilde{X}_{ij} = \frac{\tilde{z}_{ij}}{\max_{i \leq j \leq n} \left( \sum_{j=1}^n \tilde{z}_{ij} \right)},$$

$$\tilde{X}_{ij} = (ls_{ij}, ms_{ij}, rs_{ij}).$$

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1j} \\ \tilde{x}_{21} & 0 & \dots & \tilde{x}_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{x}_{i1} & \tilde{x}_{i2} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Pasul 5: Se stabilește o matrice de impact cuprinzătoare T.

$$\tilde{T} (T_{ij} = (lt_{ij}, mt_{ij}, rt_{ij}))$$

T se obține în tabelul 5.6, din formulele:

$$\tilde{T} = \lim_{k \rightarrow \infty} \left( \tilde{X}^{-1} + \tilde{X}^{-2} + \dots \tilde{X}^{-k} \right) = \tilde{X} \times (1 - \tilde{X})^{-1}$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} l'_{ij} \\ m'_{ij} \\ r'_{ij} \end{bmatrix} = X_i \times (1-X_i)^{-1} \\ \begin{bmatrix} l'_{ij} \\ m'_{ij} \\ r'_{ij} \end{bmatrix} = X_m \times (1-X_m)^{-1} \\ \begin{bmatrix} l'_{ij} \\ m'_{ij} \\ r'_{ij} \end{bmatrix} = X_r \times (1-X_r)^{-1} \end{cases}$$

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{t}_{12} & \dots & \tilde{t}_{1j} \\ \tilde{t}_{21} & 0 & \dots & \tilde{t}_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{t}_{i1} & \tilde{t}_{i2} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Tab. 5.6. Rezultatul T (Zhang și Ming, 2021)

Factors	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	...	F <sub>28</sub>	F <sub>29</sub>	F <sub>30</sub>
F <sub>1</sub>	(0.013, 0.055, 0.013)	(0.01, 0.045, 0.01)	(0.015, 0.059, 0.015)	...	(0.017, 0.056, 0.017)	(0.006, 0.024, 0.006)	(0.017, 0.056, 0.017)
F <sub>2</sub>	(0.047, 0.083, 0.047)	(0.007, 0.037, 0.007)	(0.003, 0.018, 0.003)	...	(0.004, 0.017, 0.004)	(0.003, 0.014, 0.003)	(0.004, 0.017, 0.004)
F <sub>3</sub>	(0.022, 0.071, 0.022)	(0.012, 0.043, 0.012)	(0.01, 0.043, 0.01)	...	(0.07, 0.11, 0.07)	(0.004, 0.02, 0.004)	(0.07, 0.11, 0.07)
...	...	...	...	...	...	...	...
F <sub>28</sub>	(0.005, 0.023, 0.005)	(0.013, 0.049, 0.013)	(0.013, 0.045, 0.013)	...	(0.004, 0.018, 0.004)	(0.011, 0.039, 0.011)	(0.004, 0.018, 0.004)
F <sub>29</sub>	(0.058, 0.112, 0.058)	(0.016, 0.055, 0.016)	(0.058, 0.107, 0.058)	...	(0.011, 0.046, 0.011)	(0.006, 0.026, 0.006)	(0.011, 0.046, 0.011)
F <sub>30</sub>	(0.02, 0.063, 0.02)	(0.009, 0.035, 0.009)	(0.065, 0.101, 0.065)	...	(0.008, 0.025, 0.008)	(0.003, 0.024, 0.003)	(0.008, 0.025, 0.008)

Pasul 6: Se calculează gradul de influență D<sub>i</sub> și gradul afectat R<sub>i</sub>.

D<sub>i</sub> se calculează prin adăugarea de rânduri în T, iar R<sub>i</sub> se calculează prin adăugarea coloanelor în T (tab. 5.7).

Tab. 5.7. Rezultatul D<sub>i</sub> și R<sub>i</sub> (Zhang și Ming, 2021)

Factors	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	...	F <sub>28</sub>	F <sub>29</sub>	F <sub>30</sub>
$\tilde{D}_i$	(0.64, 1.623, 4.838)	(0.312, 0.894, 2.868)	(0.549, 1.387, 4.128)	...	(0.297, 0.87, 2.782)	(0.792, 1.833, 5.181)	(0.515, 1.202, 3.425)
$\tilde{R}_i$	(1.019, 2.346, 6.52)	(0.928, 2.364, 7.116)	(0.78, 1.9, 5.475)	...	(0.891, 2.087, 5.953)	(0.593, 1.45, 4.266)	(0.451, 1.239, 3.839)

Pasul 7: Matricea de centralitate fuzzy D<sub>i</sub>+R<sub>i</sub> și matricea gradului cauzei fuzzy D<sub>i</sub>-R<sub>i</sub>

Acestea sunt calculate în tabelul 5.8, din formula:

$$\begin{cases} \tilde{D}_i = \left[ \sum_{i=1}^n l'_{ij}, \sum_{i=1}^n m'_{ij}, \sum_{i=1}^n r'_{ij} \right] \\ \tilde{R}_i = \left[ \sum_{j=1}^n l'_{ij}, \sum_{j=1}^n m'_{ij}, \sum_{j=1}^n r'_{ij} \right] \end{cases}$$

Tab. 5.8. Rezultatele Di+Ri și Di-Ri (Zhang și Ming, 2021)

Factors	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	...	F <sub>28</sub>	F <sub>29</sub>	F <sub>30</sub>
$\tilde{D}_i + \tilde{R}_i$	(1.659, 3.969, 11.358)	(1.24, 3.258, 9.984)	(1.329, 3.286, 9.604)	...	(1.188, 2.957, 8.735)	(1.385, 3.282, 9.447)	(0.967, 2.44, 7.2)
$\tilde{D}_i - \tilde{R}_i$	(-0.379, -0.723, -1.682)	(-0.615, -1.469, -4.247)	(-0.231, -0.513, -1.347)	...	(-0.595, -1.217, -3.171)	(0.199, 0.383, 0.915)	(0.064, -0.037, -0.415)

Pasul 8: Matricea de centralitate fuzzy (Di+Ri)<sup>def</sup> și matricea de cauzalitate fuzzy (Di-Ri)<sup>def</sup>

Acestea sunt procesate anti-ambiguitate (tab. 5.9) din λ = 0,4 și formula:

$$\begin{cases} (\tilde{D}_i + \tilde{R}_i)^{def} = \left[ \lambda (\tilde{D}_i + \tilde{R}_i)_{ij}^l + (\tilde{D}_i + \tilde{R}_i)_{ij}^m + (1-\lambda) (\tilde{D}_i + \tilde{R}_i)_{ij}^r \right] / 2 \\ (\tilde{D}_i - \tilde{R}_i)^{def} = \left[ \lambda (\tilde{D}_i - \tilde{R}_i)_{ij}^l + (\tilde{D}_i - \tilde{R}_i)_{ij}^m + (1-\lambda) (\tilde{D}_i - \tilde{R}_i)_{ij}^r \right] / 2 \end{cases}$$

Tab. 5.9. Rezultate (Di+Ri)<sup>def</sup> și (Di-Ri)<sup>def</sup> (Zhang și Ming, 2021)

Factors	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>11</sub>	F <sub>12</sub>	F <sub>13</sub>	F <sub>14</sub>	F <sub>15</sub>
Fuzzy centrality ( $\tilde{D}_i + \tilde{R}_i$ ) <sup>def</sup>	5.724	4.872	4.79	4.196	3.861	4.285	5.796	5.703	4.846	4.293	5.077	4.732	5.818	5.147	5.227
	F <sub>16</sub>	F <sub>17</sub>	F <sub>18</sub>	F <sub>19</sub>	F <sub>20</sub>	F <sub>21</sub>	F <sub>22</sub>	F <sub>23</sub>	F <sub>24</sub>	F <sub>25</sub>	F <sub>26</sub>	F <sub>27</sub>	F <sub>28</sub>	F <sub>29</sub>	F <sub>30</sub>
	4.599	5.743	5.327	4.527	5.726	3.592	4.31	5.223	5.812	5.487	5.296	3.263	4.336	4.752	3.593
Max	5.818														
Min	3.263														
Average	4.541														
Fuzzy causality ( $\tilde{D}_i - \tilde{R}_i$ ) <sup>def</sup>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>11</sub>	F <sub>12</sub>	F <sub>13</sub>	F <sub>14</sub>	F <sub>15</sub>
	-0.942	-2.132	-0.707	1.391	0.412	0.329	0.19	0.224	0.615	-0.114	-0.064	-0.652	1.256	0.06	1.036
	F <sub>16</sub>	F <sub>17</sub>	F <sub>18</sub>	F <sub>19</sub>	F <sub>20</sub>	F <sub>21</sub>	F <sub>22</sub>	F <sub>23</sub>	F <sub>24</sub>	F <sub>25</sub>	F <sub>26</sub>	F <sub>27</sub>	F <sub>28</sub>	F <sub>29</sub>	F <sub>30</sub>
	-0.015	0.511	1.454	-0.604	0.605	0.075	-1.448	0.447	-1.529	-0.824	1.761	-0.032	-1.679	0.506	-0.13
Max	1.761														
Min	-2.132														
Average	-0.185														

Pasul 9: Se folosește un grafic pentru a arăta relația dintre factori, astfel încât să se analizeze contramăsurile

După cum se arată în figura 5.13, unde abscisa este reprezentată de valoarea centralității cuprinzătoare, iar ordonata este reprezentată de valoarea cauzalității cuprinzătoare, treizeci de factori de influență sunt împărțiți în patru domenii de șase linii drepte de minim, medie și maxim de centralitate, minim, medie și maxim de cauzalitate, așa cum se arată în tabelul 5.10.

Caracteristicile factorilor din domeniul 1 sunt: gradul de impact asupra întregului sistem este scăzut, afectarea altor factori este scăzută, iar influențată de alți factori este mare. Caracteristicile factorilor din domeniul 2 sunt: gradul de

impact asupra întregului sistem este scăzut, afectarea altor factori este mare, iar influența altor factori este scăzută. Caracteristicile factorilor din domeniul 3 sunt: gradul de impact asupra întregului sistem este ridicat, afectarea altor factori este mare, iar influența altor factori este scăzută. Caracteristicile factorilor din domeniul 4 sunt: gradul de impact asupra întregului sistem este mare, afectarea altor factori este scăzută, iar influența altor factori este mare. Există 3 factori în domeniul 1, 7 în domeniul 2, 14 în domeniul 3 și 6 în domeniul 4. Dintre aceștia, cei mai influenți factori se încadrează în domeniul 3, în total 14, aproape jumătate.

Articolele de servicii din domeniul 1 și 2 ar trebui să fie șterse, articolele de serviciu din domeniul 3 ar trebui păstrate și utilizate ca servicii avantajoase de bază pentru întreprinderi, iar articolele de servicii din domeniul 4 ar trebui păstrate ca un nou serviciu de provocare pentru întreprindere.

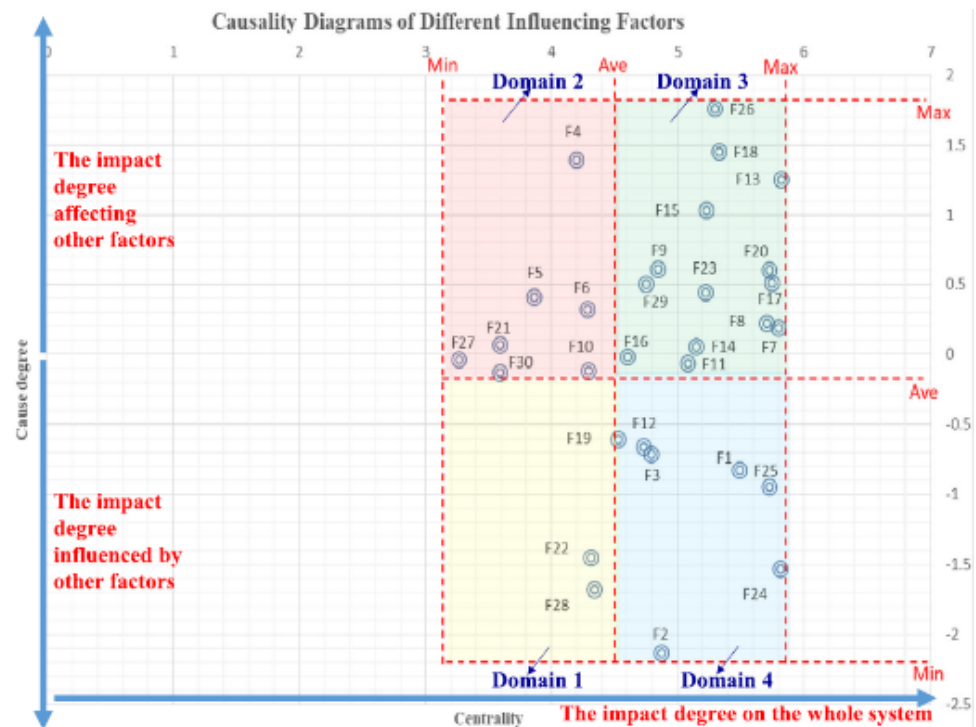


Fig. 5.13. Rezultat: diagrama diferiților factori de influență pentru SMIS (Zhang și Ming, 2021)

Tab. 5.10. Rezultat: 30 de factori de influență împărțiți în patru domenii (Zhang și Ming, 2021)

Domain no.	Domain characteristics	Factors	Action	Result
Domain 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>The impact degree on the whole system: low</li> <li>The impact degree affecting other factors: low</li> <li>The impact degree influenced by other factors: high</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>F<sub>10</sub>: C4-L4: Workshop layer for information system integration</li> <li>F<sub>11</sub>: C-P2: Plan scheduling of new model</li> <li>F<sub>12</sub>: L-P3: Open collaborative design</li> </ul>	Delete	Service items in domain 1 should be deleted: due to the low centrality (importance) of service items in this domain, enterprises should delete these service items in the early service system construction.
Domain 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>The impact degree on the whole system: low</li> <li>The impact degree affecting other factors: high</li> <li>The impact degree influenced by other factors: low</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>F<sub>13</sub>: C1-L4: Workshop based on digital twin</li> <li>F<sub>14</sub>: C1-L5: Intelligent decision management</li> <li>F<sub>15</sub>: C2-L1: Visualization of equipment and energy</li> <li>F<sub>16</sub>: L-P2: Personalized customization</li> <li>F<sub>17</sub>: C-P1: R &amp; D of new model</li> <li>F<sub>18</sub>: L-P5: Experimental service</li> <li>F<sub>19</sub>: C2-L5: Visualization in enterprise layer</li> <li>F<sub>20</sub>: L-P1: Dynamic demand</li> <li>F<sub>21</sub>: C4-L3: Production line layer for information system integration</li> <li>F<sub>22</sub>: C3-L3: Management platform in production line data</li> <li>F<sub>23</sub>: C3-L5: Data sharing platform in product lifecycle layer</li> <li>F<sub>24</sub>: C2-L4: Visualization in workshop layer</li> <li>F<sub>25</sub>: C-P3: Flexible manufacturing of new model</li> <li>F<sub>26</sub>: C4-L5: Enterprise layer for information system integration</li> <li>F<sub>27</sub>: L-P4: Flexible manufacturing</li> <li>F<sub>28</sub>: C4-L1: Equipment layer for information system integration</li> <li>F<sub>29</sub>: C2-L5: Visualization of logistics in production line</li> <li>F<sub>30</sub>: C2-L2: Visualization in process layer</li> <li>F<sub>31</sub>: C3-L4: Data sharing platform of workshop</li> <li>F<sub>32</sub>: C3-L1: Data sharing platform in device layer</li> <li>F<sub>33</sub>: C3-L2: Management platform of simulation data</li> <li>F<sub>34</sub>: C1-L3: Upstream and downstream of production line with high degree of automation</li> <li>F<sub>35</sub>: C1-L1: Equipment with core competitiveness</li> <li>F<sub>36</sub>: C-P6: Sale and Service of new model</li> <li>F<sub>37</sub>: C-P4: Logistics distribution of new model</li> <li>F<sub>38</sub>: C1-L2: Simulation and design with digital capability</li> </ul>	Delete	Service items in domain 2 should be deleted: similarly, due to the low centrality (importance) of service items in this domain, enterprises should delete these service items in the early service system construction.
Domain 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>The impact degree on the whole system: high</li> <li>The impact degree affecting other factors: high</li> <li>The impact degree influenced by other factors: low</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>F<sub>39</sub>: C4-L1: Equipment layer for information system integration</li> <li>F<sub>40</sub>: C2-L5: Visualization of logistics in production line</li> <li>F<sub>41</sub>: C3-L4: Data sharing platform of workshop</li> <li>F<sub>42</sub>: C3-L1: Data sharing platform in device layer</li> <li>F<sub>43</sub>: C3-L2: Management platform of simulation data</li> <li>F<sub>44</sub>: C1-L3: Upstream and downstream of production line with high degree of automation</li> <li>F<sub>45</sub>: C1-L1: Equipment with core competitiveness</li> <li>F<sub>46</sub>: C-P6: Sale and Service of new model</li> <li>F<sub>47</sub>: C-P4: Logistics distribution of new model</li> <li>F<sub>48</sub>: C1-L2: Simulation and design with digital capability</li> </ul>	Retain	The service items in domain 3 should be retained and used as the basic advantage services for enterprises: since the service items in the domain have a high impact on other service elements of the whole system, enterprises should take these service items as basic elements and focus on them.
Domain 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>The impact degree on the whole system: high</li> <li>The impact degree affecting other factors: low</li> <li>The impact degree influenced by other factors: high</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>F<sub>49</sub>: C4-L1: Equipment layer for information system integration</li> <li>F<sub>50</sub>: C2-L5: Visualization of logistics in production line</li> <li>F<sub>51</sub>: C3-L4: Data sharing platform of workshop</li> <li>F<sub>52</sub>: C3-L1: Data sharing platform in device layer</li> <li>F<sub>53</sub>: C3-L2: Management platform of simulation data</li> <li>F<sub>54</sub>: C1-L3: Upstream and downstream of production line with high degree of automation</li> <li>F<sub>55</sub>: C1-L1: Equipment with core competitiveness</li> <li>F<sub>56</sub>: C-P6: Sale and Service of new model</li> <li>F<sub>57</sub>: C-P4: Logistics distribution of new model</li> <li>F<sub>58</sub>: C1-L2: Simulation and design with digital capability</li> </ul>	Retain	The service items in domain 4 should be retained as a new challenge service for the enterprise: since the service items in the domain are highly influenced by other service items of the whole system, the enterprises have more influencing factors on the construction and development of the service items in this domain, and they are regarded as the new challenge services of enterprises.



## **5.5. Studiu de caz al implementării unui sistem de fabricație inteligent pentru individualizare în masă**

Pentru a veni în întâmpinarea nevoilor în schimbare ale clienților, modelul de fabricație a produselor este în continuă adaptare, de la modelul de producție în masă la modelul de personalizare în masă și la modelul de individualizare (personalizare individuală) în masă.

În ceea ce privește conceptul de individualizare în masă, acesta este definit ca pentru a ajuta clienții să ia decizii mai bine informate și, în cea mai mare măsură, să anticipeze satisfacția clienților și să se adapteze la încântarea clientului (Zhou ș.a., 2013). În individualizarea în masă, nevoile clienților individuali vor fi coordonate, iar produsele personalizate sunt realizate pentru a satisface nevoile individuale ale clienților.

Folosind metoda de cercetare a ingineriei de sistem, se studiază modelul sistemului, caracteristica, tehnologia, modelele de aplicație, scenariile de aplicație, căile de implementare a unui sistem de fabricație inteligent pentru personalizare individuală în masă (*Smart Manufacturing Intelligent System for Mass Personalization*, S-MMP), din perspectiva planificării la nivel superior. Modelul de sistem complet al S-MMP propus este în conformitate cu tendința de dezvoltare a industriei de astăzi și răspunde nevoilor urgente ale întreprinderilor, putându-le oferi îndrumări teoretice în modernizarea politicilor, transformarea modelului și reingineria proceselor de afaceri (Zhang și Ming, 2023).

Motivația cercetării este de a analiza fiecare proces și caracteristicile de bază ale lanțului valoric industrial al modelului de fabricație cu personalizare individuală în masă și de a integra tehnologia și metodele inteligente cu aceasta, pentru a realiza funcțiile sistemului inteligent în fabricația personalizată individual (MMP) și de a prevedea calea de implementare.

### **5.5.1. Modelul S-MMP**

Modelul S-MMP este un model multidimensional construit din patru dimensiuni (fig. 5.14). Cele patru dimensiuni ale S-MMP sunt construite în principal din perspectiva cadrului de nivel superior și a structurii ierarhice, iar metoda este, în principal, analiza ingineriei de sistem. Aceste patru dimensiuni sunt: dimensiunea lanțului valoric industrial, dimensiunea caracteristică de bază,

dimensiunea procesului de evoluție și dimensiunea tehnologiei și metodei de inteligență.

Conform metodei de analiză a ingineriei de sistem, pentru a construi un model MMP sistematic, cele patru etape sunt următoarele:

În primul rând este analizat procesul de evoluție al paradigmei de producție, care variază de la producția în masă la personalizarea în masă, personalizarea individuală (individualizarea) în masă și apoi personalizarea inteligentă în masă (așa cum e descris și în scap. 2.3). Acest proces analitic este dimensiunea primară a modelului de sistem.

În procesul de evoluție a apărut scopul sistemului de fabricație în MMP, care include scară largă, personalizare, flexibilitate, personalitate, experiență, conectivitate în rețea, comunitate și inteligență. Acest conținut formează a doua dimensiune a modelului de sistem.

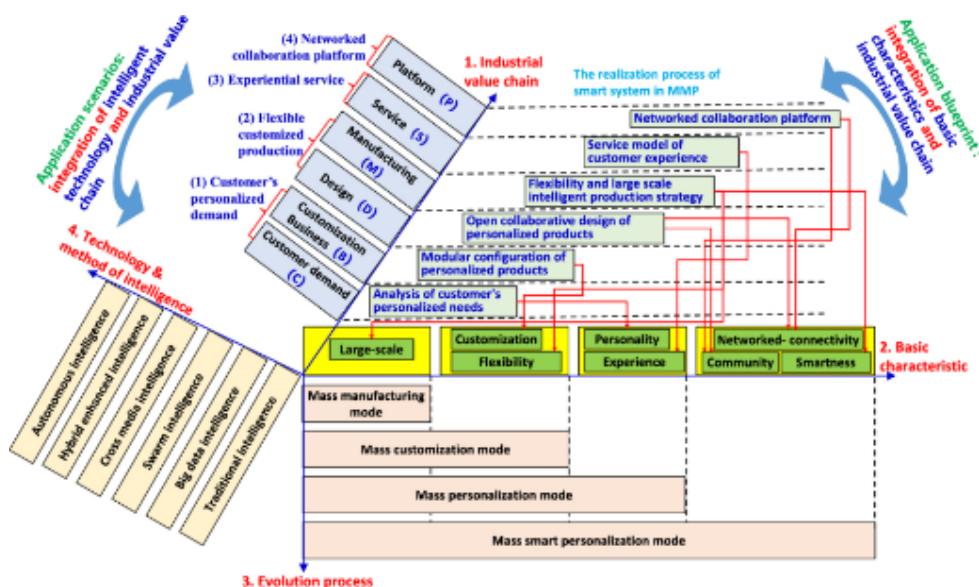


Fig. 5.14. Modelul S-MMP (Zhang și Ming, 2023)

În al doilea rând, pentru a atinge acest obiectiv, trebuie luate soluții corespunzătoare, adică tehnologii și metode cheie inteligente. Acest conținut este a treia dimensiune a modelului de sistem.

În final, prin construirea scenariilor de aplicație și a planurilor de aplicație, elementele specifice, metodele, tehnologiile, modelele, algoritmi,

platformele etc. care trebuie implementate sunt aplicate în procesul lanțului valoric industrial și sunt evaluate efectele acestora. Acest conținut al lanțului valoric al industriei este a patra dimensiune a modelului de sistem.

Integrarea încrucișată a primei dimensiuni și a celei de-a doua dimensiuni formează modelul aplicației pentru S-MMP. Integrarea încrucișată a primei dimensiuni și a celei de-a patra dimensiuni formează scenariul de aplicare pentru S-MMP.

**Dimensiunea lanțului valoric industrial** al sistemului inteligent în MMP se referă la procesul de implementare a modului de personalizare în masă. Cele patru procese ale MMP (cererea personalizată a clientului, producția personalizată flexibilă, serviciul experimental și platforma de colaborare în rețea) sunt împărțite în continuare în șase procese. În primul rând, determinate de cererea clienților (C), întreprinderile se configurează. Produsele, după personalizare, constituie afacerea personalizată (B). După aceea, întreprinderile proiectează (D) și fabrică (M) produse personalizate. Apoi, întreprinderea furnizează service-ul (S), după livrarea produsului către clienți. În cele din urmă, întreprinderile construiesc o platformă de colaborare în rețea (P), pentru a conecta legăturile de mai sus. Sarcina în etapa cererii este de a se ocupa de analiza nevoilor personalizate ale clientului. Sarcina în etapa de personalizare este să se ocupe de configurația modulară a produselor personalizate. Sarcina corespunzătoare în etapa de proiectare este să se ocupe de proiectarea colaborativă deschisă a produselor personalizate. Sarcina în etapa de fabricație este să se ocupe de producția inteligentă flexibilă la scară largă de produse personalizate. Sarcina în etapa de service este să se ocupe de service-ul clientului. Sarcina etapei de colaborare este de a se ocupa de construcția platformei de colaborare în rețea.

**Dimensiunea caracteristică de bază** a sistemului inteligent în MMP se referă la caracteristicile de bază ale acestui sistem inteligent în ansamblu sau într-o anumită etapă de evoluție, inclusiv pe scară largă, personalizare, flexibilitate, personalitate, experiență, conectivitate în rețea, comunitate și inteligență. Pe scară largă se reflectă în principal în caracteristicile producției flexibile în etapa de fabricație. Personalizarea se reflectă în personalizarea produselor. Flexibilitatea se reflectă în amenajarea și producția de resurse flexibile de producție în etapa de fabricație. Personalizarea se reflectă în principal prin faptul că modelul este condus de nevoile personalizate ale clienților. Experimentalul este înglobat în principal în serviciul experimental oferit clienților în faza de

service. Conectivitatea în rețea se reflectă în principal în etapa de colaborare, care se bazează pe colaborarea și cooperarea platformei de rețea. Comunitatea este întruchipată în primul rând în design deschis bazat pe resursele comunității în faza de proiectare. Inteligența se reflectă în principal în producția inteligentă și în sistemul său de suport în faza de fabricație.

**Dimensiunea procesului de evoluție** (transformarea modelului industrial). Procesul de evoluție a sistemului inteligent în MMP este tendința de schimbare a modului de producție, de la un model tradițional la un model inteligent și se referă la traseul de transformare și modernizare inteligentă, pentru ca întreprinderile să implementeze modelul MMP, care este de la modul de producție în masă în etapa inițială, la modul de personalizare în masă, la modul de personalizare individuală (individualizare) în masă și, în final, la modul de personalizare inteligentă în masă. Modelul de producție în masă are caracteristicile producției pe loturi la scară largă, care este condusă de inventar. Modelul de personalizare în masă are caracteristicile unor loturi personalizate pe scară largă, personalizarea produselor și flexibilitatea producției, care este determinată de nevoile similare ale grupurilor de clienți. Pe baza modelului de personalizare în masă, modelul de personalizare individuală în masă integrează personalizarea produsului și caracteristicile de service ale experienței utilizatorului, care sunt determinate de nevoile personalizate ale clientului individual. Pe baza modelului de personalizare individuală în masă, elementele inteligente sunt integrate în modelul de personalizare inteligentă în masă, inclusiv conexiune și platformă în rețea, cooperare comunitară, metode inteligente, tehnologii inteligente, sisteme inteligente etc. Modelul de personalizare inteligentă în masă este un fel de mod de inovare pe internet pentru întreprindere, pentru a satisface nevoile personalizate, sociale și de divertisment ale clienților la scară largă, prin stabilirea unui sistem de producție inteligent de producție și a unei platforme interactive cloud interactive de date mari bazate pe mobilitate, pentru a aduna resurse globale și a atinge obiectivul de livrare a personalizării produsului și de câștig-câștig al părților interesate relevante.

**Dimensiunea tehnologiei și a metodei inteligenței.** Această dimensiune este de a oferi tehnologie și metode pentru sistemul inteligent în MMP. Inteligența industrială se reflectă în principal în integrarea inteligenței computaționale, a inteligenței perceptive, a inteligenței cognitive și a altor metode și tehnologii în activitățile industriale. Inteligența computațională implică date, date mari, software, platformă, hardware etc. Inteligența perceptivă se referă

la percepția inteligentă a mediului, care include recunoașterea vorbirii, imaginea, recunoașterea vizuală, procesarea limbajului natural, realitatea virtuală, realitatea augmentată și alte tehnologii. Inteligența cognitivă se referă la funcții avansate de auto-judecare și de luare a deciziilor pentru lucruri, inclusiv învățarea automată, învățarea profundă, inteligența artificială 2.0 și alte tehnologii. IA 2.0 include inteligență de date mari, inteligență roi, inteligență crossmedia, inteligență hibridă îmbunătățită, inteligență autonomă etc.

### 5.5.2. Caracteristica de bază a S-MMP

Procesul în S-MMP include cererea clienților, personalizarea afacerii, proiectarea, producția, service-ul și platforma. Condușe de nevoile personalizate ale clienților și prin integrarea internetului industrial avansat, a datelor mari industriale, a inteligenței artificiale industriale și a altor tehnologii, s-au format caracteristicile personalizate, individualizate, flexibile, la scară largă, inteligente, experimentale, în rețea, sociale și alte aspecte.

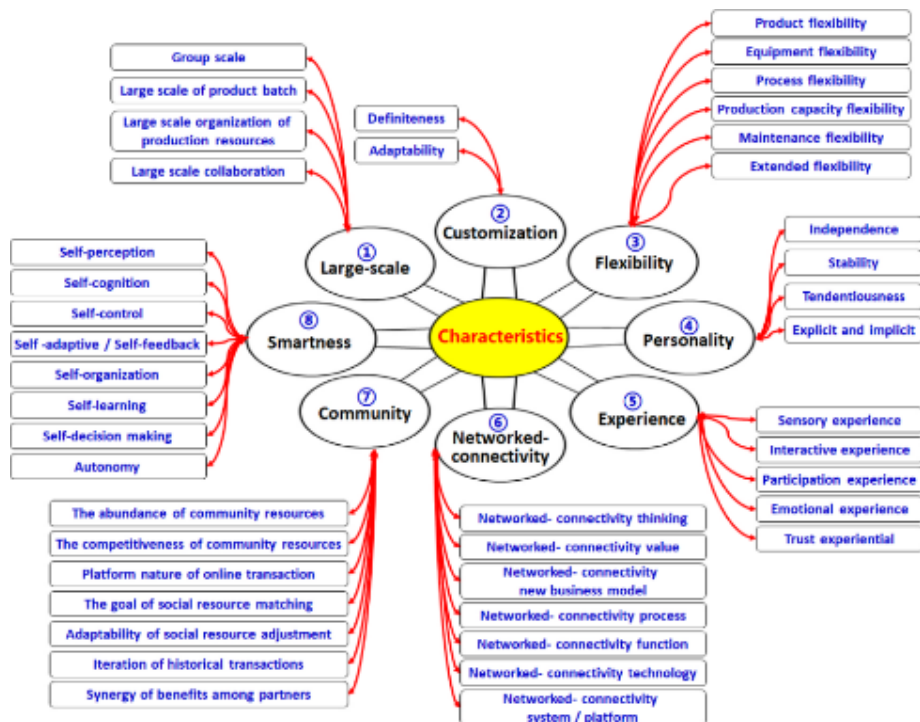


Fig. 5.15. Caracteristica de bază a sistemului inteligent în MMP (Zhang și Ming, 2023)

După cum se arată în figura 5.15, scara mare se referă la ordinea în masă a aceluiași produs personalizat, incluzând scară de grup, scară mare de lot de produse, organizare la scară largă a resurselor de producție și colaborare la scară largă. Personalizarea se referă la personalizarea produselor în funcție de client, inclusiv definiție și adaptabilitate. Flexibilitatea înseamnă că, comenzile personalizate pot fi ajustate în mod flexibil în funcție de schimbările nevoilor dinamice ale clienților, inclusiv flexibilitatea produsului, flexibilitatea echipamentelor, flexibilitatea procesului, flexibilitatea capacității de producție, flexibilitatea extinsă și flexibilitatea întreținerii. Personalitatea se referă la interesele și nevoile unice ale clienților pentru produse, inclusiv independență, stabilitate, tendință, explicit și implicit. Experiența se referă la interacțiunea și experiența personală dintre clienți și produse, inclusiv experiența senzorului, experiența interactivă, experiența de participare, experiența emoțională și încrederea empirică. Conectivitatea în rețea se referă la conexiunea la rețea și la contactul la distanță zero a întregului proces, inclusiv gândirea conectivității în rețea, valoarea conectivității în rețea, autocogniție, autocontrol, auto-adaptativ, auto-feedback, auto-organizare, auto-învățare, autodecizie și autonomie.

### **5.5.3. Tehnologia și metoda S-MMP**

Sistemul tehnic de inteligență în MMP este împărțit în cinci părți, inclusiv metode de susținere, teorie suport, elemente de sprijin, tehnologia inteligenței și funcții inteligente. După cum se arată în figura 5.16, sistemul suport al MMP constă din trei sisteme: metoda suport, teorie și elemente. Tehnologia inteligentă include două părți: tehnologia AI tradițională și tehnologia AI de nouă generație. Prin intermediul tehnologiei inteligente sunt realizate funcții inteligente, inclusiv auto-percepție, autocogniție, autocontrol, auto-adaptare, auto-feedback, auto-organizare, auto-învățare, auto-decizie și autonomie.

Metodele de asistență includ metode (de exemplu, model liniar, regresie logistică, model arbore de decizie, mașină vectorială suport, rețea neuronală și învățare profundă), arhitectură (de exemplu, CIP accelerator, virtualizare, structură distribuită, bibliotecă și cadru de calcul, schemă de vizualizare și serviciu cloud) și altele (de exemplu, spectru de cunoștințe, model de limbaj statistic, sistem expert, algoritm genetic și algoritm de joc).

Elementele suport includ date mari (de exemplu, setul de date, structurarea, calibrarea și cantitatea de date), capacitatea de calcul (de exemplu,

GPU/FPGA și alt hardware, CIP de rețea neuronală și cloud computing) și algoritmi (de exemplu, învățare supravegheată, învățare nesupravegheată, învățare semisupervizată, învățare prin migrare și învățare prin consolidare).

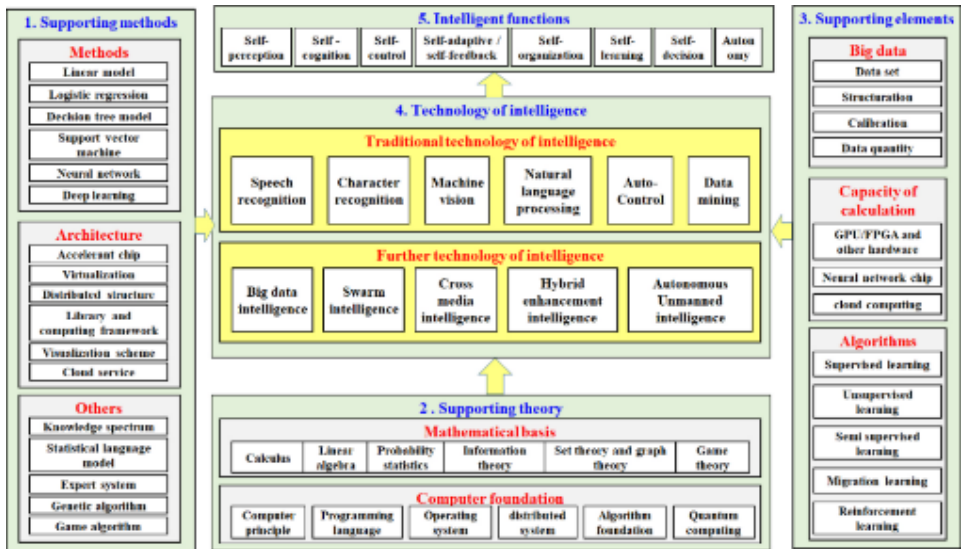


Fig. 5.16. Sistemul de sprijin al sistemului inteligent în MMP (Zhang și Ming, 2023)

Teoria de susținere include baze matematice (de exemplu calcul, algebră liniară, statistici probabilităților, teoria informațiilor, teoria mulțimilor și teoria grafurilor și teoria jocurilor) și fundamentele computerului (de exemplu, principiul computerului, limbajul de programare, sistemul de operare, sistemul distribuit, fundația algoritmului și calcul cuantic).

#### 5.5.4. Planul și scenariile de aplicare a S-MMP

**Integrarea caracteristicilor de bază în lanțul valoric industrial.** Etapa lanțului valoric industrial include cererea clienților (C), personalizarea întreprinderii (B), proiectarea produsului (D), fabricarea produsului (M), serviciile industriale (S) și platforma de colaborare (P). Caracteristicile de bază includ: scară largă, personalizare, flexibilitate, personalitate, experiență, conectivitate la rețea, comunitate și inteligență. Maparea de la caracteristicile de bază la lanțul valoric industrial al sistemului inteligent în MMP este prezentată în figura 5.17. Prin această mapare se poate deduce conținutul de implementare

al caracteristicilor de bază corespunzătoare în fiecare legătură a modului de personalizare în masă.

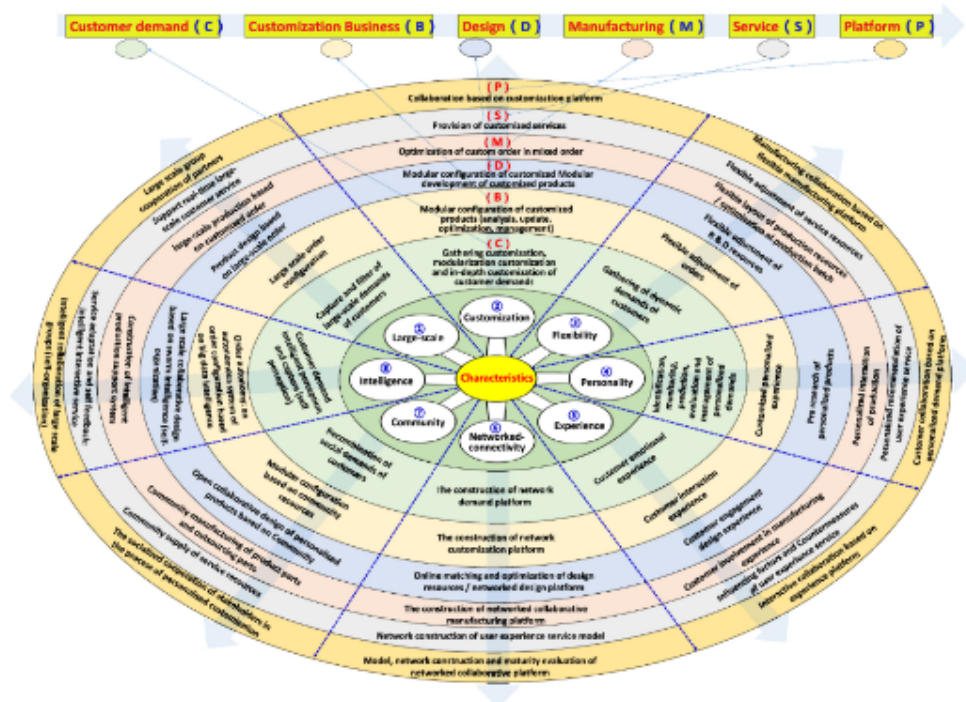


Fig. 5.17. Maparea de la caracteristicile de bază la lanțul valoric industrial al sistemului inteligent în MMP (Zhang și Ming, 2023)

Prin maparea caracteristicilor la scară largă la șase procese (C, B, D, M, S, P) ale lanțului valoric industrial, se obțin următoarele modele de aplicație: captarea și filtrarea cererilor la scară largă ale clienților, configurarea comenzilor la scară largă, design de produs bazat pe o comandă la scară largă, producție la scară largă pe bază de comandă personalizată și sprijin în timp real pentru serviciul clienți la scară largă, cooperarea de grup la scară largă a partenerilor.

Caracteristica de personalizare este mapată la șase procese (C, B, D, M, S, P) ale lanțului valoric industrial și se obțin următoarele modele de aplicație: personalizarea colectării, personalizarea modularizării și personalizarea în profunzime a cerințelor clienților; configurarea modulară a produselor personalizate (analiza, actualizare, optimizare, management); configurație modulară personalizată; dezvoltare modulară de produse personalizate;



optimizarea comenzii personalizate în ordine mixtă; furnizare de servicii personalizate; și colaborare bazată pe platformă de personalizare.

Caracteristica flexibilității este mapată la șase procese (C, B, D, M, S, P) ale lanțului valoric industrial și se obțin următoarele modele de aplicație: colectarea cererilor dinamice ale clienților, ajustarea flexibilă a comenzilor, ajustarea flexibilă a resurselor de cercetare și dezvoltare, aspect flexibil al resurselor de producție, optimizarea lotului de producție, ajustare flexibilă a resurselor de servicii, colaborare în producție bazată pe platformă flexibilă de producție.

În mod similar, caracteristicile personalității, experienței, conectivității în rețea, comunității și inteligenței sunt mapate la cele șase procese (C, B, D, M, S, P).

#### **Integrarea tehnologiei inteligente și a lanțului valoric industrial.**

Scenariile de aplicare se referă la cerințele sau obiectivele multor module funcționale de aplicații industriale, care pot fi realizate sau atinse. Toate modulele funcționale sunt combinate pentru a forma un scenariu complet de aplicație industrială. Prin integrarea tehnologiei inteligente cu lanțul valoric industrial al modului de personalizare în masă se deduce scenariul de aplicare a sistemului inteligent în MMP.

După cum se arată în figura 5.18, fiecare etapă a lanțului valoric industrial al modului de personalizare individuală în masă (adică cererea clienților (C), personalizarea afacerii (B), proiectarea produsului (D), fabricarea produsului (M) și serviciile industriale (S)) este împărțit în șase părți: inteligență de date mari, inteligență roi, inteligență cross-media, inteligență de îmbunătățire hibridă și inteligență fără pilot pentru autonomie.

Tehnologia tradițională de inteligență este mapată la șase procese (C, B, D, M, S, P) ale lanțului valoric industrial și se obțin următoarele scenarii de aplicație: marketing precis al afacerilor bazat pe traseul utilizatorului; percepția și exprimarea emoțiilor multi-modale ale utilizatorului (voce, viziune, text); identificarea inteligentă, localizarea și detectarea fabricii inteligente; design inovator bazat pe învățarea activă a resurselor globale; serviciu de experiență de răspuns automat la întrebări, urmărirea subiectelor și analiza emoțiilor limbajului bazat pe învățarea automată.

În mod similar, tehnologii precum inteligența de date mari, inteligența roiului, inteligența cross-media, inteligența hibridă îmbunătățită și inteligența

autonomă sunt mapate în cele șase procese (C, B, D, M, S, P) ale lanțului valoric industrial.

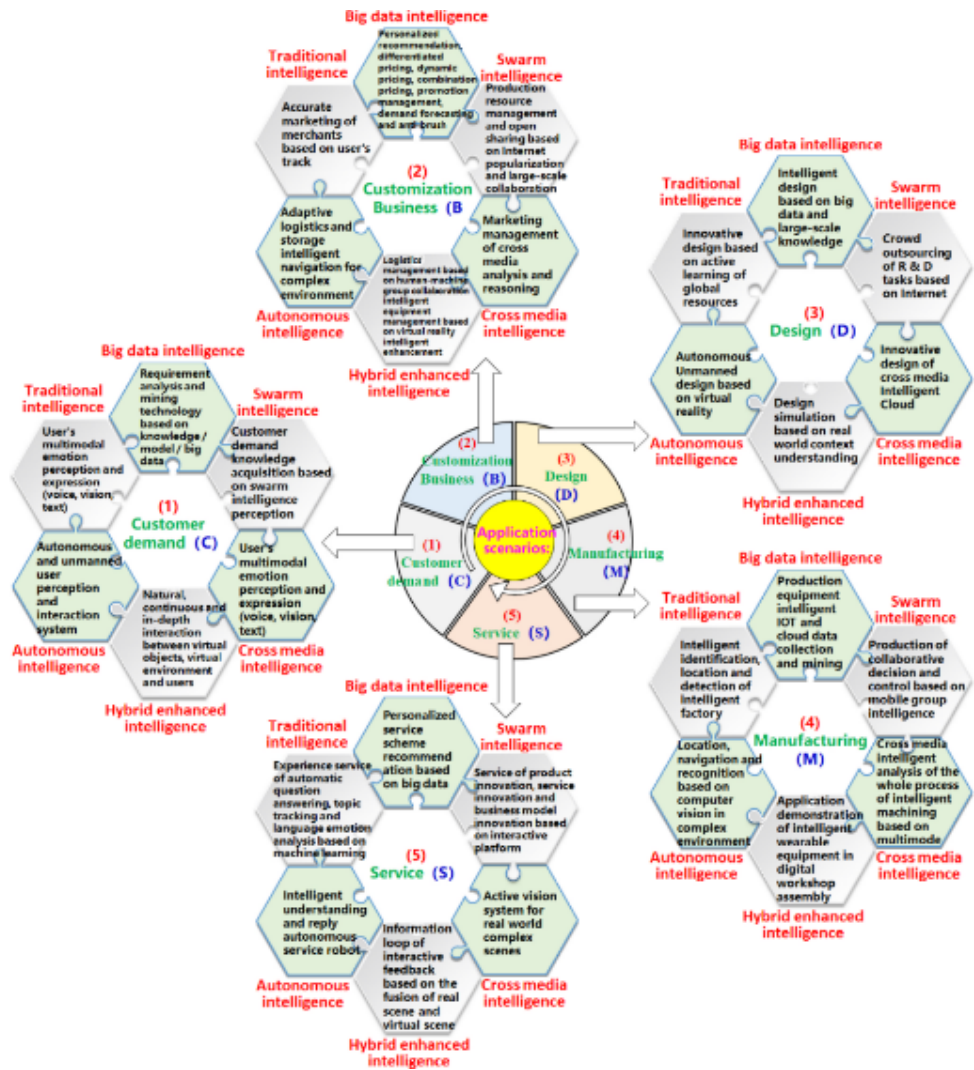


Fig. 5.18. Integrarea tehnologiei inteligente și a lanțului valoric industrial al sistemului inteligent în MMP (Zhang și Ming, 2023)

### 5.5.5. Calea de implementare a S-MMP

Implementarea sistemului inteligent în MMP este împărțită în șase pași: dezvoltarea instrumentelor inteligente, dezvoltarea tehnologiei inteligente, proiectarea funcției inteligente, activarea caracteristicilor inteligente, planificarea scenariilor de aplicații inteligente și extinderea inteligenței în industrie.

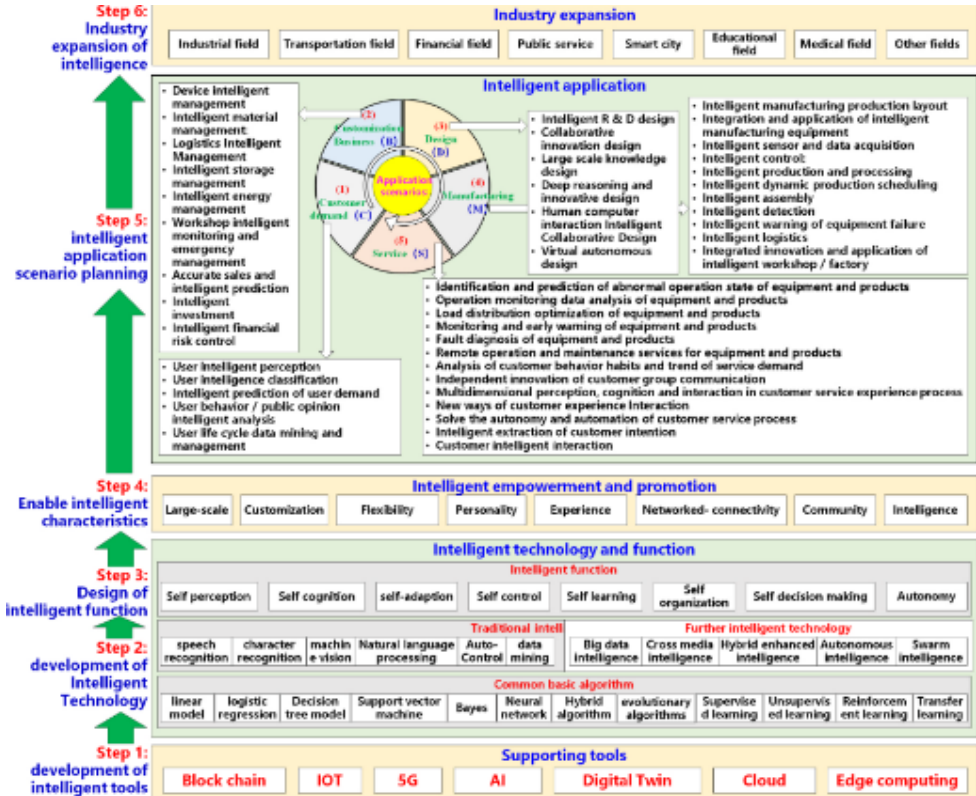


Fig. 5.19. Calea de implementare a sistemului inteligent în MMP (Zhang și Ming, 2023)

După cum se arată în figura 5.19, primul pas este dezvoltarea unor instrumente inteligente, cum ar fi *Block chain*, *IoT*, *5G*, *AI*, *Digital Twin*, *Cloud*, *Edge computing* etc. Al doilea pas este dezvoltarea tehnologiei inteligente, inclusiv algoritmul de bază comun, tehnologia inteligentă tradițională și tehnologia inteligentă în continuare. Al treilea pas este proiectarea unor instrumente inteligente, inclusiv: auto-percepție, autocogniție, auto-adaptare,

autocontrol etc. Al patrulea pas este activarea funcțiilor inteligente, inclusiv personalizare, flexibilitate, personalitate, experiență, conectivitate în rețea etc. Al cincilea pas este planificarea scenariilor de aplicații inteligente în jurul procesului lanțului valoric industrial al MMP. Al șaselea pas este extinderea industriei de inteligență, care include domeniul transporturilor, domeniul financiar, domeniul medical etc.

## 5.6. Sinteza capitolului

Capitolul corespunde celei de-a patra etape a DRM, **Studiul descriptiv II (DS-II)**, în care se propune, pentru început, o arhitectură generală de referință pentru SMIS din perspective de fabrică automatizată bazată pe resurse, fabrică de interconectare bazată pe rețea, fabrică de partajare a datelor bazată pe platforme, fabrică de integrare a sistemelor informaționale, fabrică de model nou pentru ciclul de viață al produsului și fabrică de modele noi pentru personalizare individuală. Apoi, pornind de la cadrul de referință al SMIS, se deduce cadrul de compoziție al fiecărui subsistem al SMIS.

Pe baza analizei arhitecturii de referință pentru SMIS, se stabilește calea de implementare pentru SMIS, care este împărțită în șase pași mari.

Luând ca exemplu industria de autovehicule, subsistemele integrate de mai sus sunt conectate și se prezintă un studiu de caz al implementării SMIS.

Un alt doilea studiu de caz se referă la implementarea unui sistem de fabricație inteligent pentru personalizare individuală (individualizare) în masă. În primul rând, este analizat modul de fabricație cu personalizare individuală în masă (MMP) și sunt prezentate patru elemente de bază în acest mod, inclusiv cererea personalizată a clientului, producția personalizată flexibilă, serviciul experimental și platforma de colaborare în rețea. În același timp, este introdus modelul de sistem al sistemului inteligent în MMP (S-MMP). Apoi, pe baza modelului de sistem, se analizează caracteristicile de bază ale S-MMP, tehnologia inteligentă, integrarea caracteristicilor de bază și lanțul valoric industrial (planul aplicației), precum și integrarea tehnologiei inteligente și lanțul valoric industrial (scenariu de aplicare). În cele din urmă, este dată calea de implementare a S-MMP.

În perspectiva viitoare, va trebui stabilit modelul de optimizare în cadrul acestui sistem S-MMP, pentru a atinge obiectivul de cost minim sub constrângeri de eficiență a producției, timp de livrare, calitate a produsului etc.

## 6. EVOLUȚIA ȘI VIITORUL SISTEMELOR DE FABRICAȚIE ÎN CONTEXTUL INDUSTRIEI 5.0

### 6.1. Obiectivul capitolului

Acest ultimul capitol, de încheiere și de trasare a perspectivelor de continuare a investigațiilor, tratează evoluția și viitorul sistemelor de fabricație în contextul Industriei 5.0.

### 6.2. Industria 5.0

Esben H. Østergaard, CTO al Universal Robots, a numit Industria 5.0 ca fiind transformarea personalizării în masă, posibilă de tehnologiile Industriei 4.0, în personalizare individualizată în masă și, prin urmare, a etichetat-o ca revoluția „*human touch*”. El prevede, de asemenea, o revenire a modului preindustrial de producție, care este susținut de tehnologii în care oamenii joacă un rol critic, mai degrabă decât să fie înstrăinați. Importanța readucerii oamenilor în bucla de producție pentru a oferi personalizare și atingere umană a fost reiterată prin roboți sau „coboți” colaborativi. Prin urmare, se prevede că Industria 5.0 va include cele două elemente cheie lipsă, includerea oamenilor și dezvoltarea durabilă (Raja Santhi și Muthuswamy, 2023).

Conceptul de personalizare individualizată în masă, cu sprijinul tehnologiilor digitale, a evoluat în contextul celei de-a cincea revoluții industriale. Reprezentarea schematică a tehnologiilor prospective ale Industriei 5.0 este redată în figura 6.1. Aceste sunt:

#### **Roboții colaborativi (coboții).**

Deși roboții sunt folosiți în industrie de mult timp, roboții din a patra revoluție industrială sunt proiectați să funcționeze autonom, fără supraveghere umană, și joacă deja un rol activ. Cu toate acestea, în loc să lucreze independent, roboții din generația Industriei 5.0 sunt așteptați să colaboreze cu oamenii și să lucreze sub îndrumarea lor. Progresul tehnologiilor digitale, cum ar fi inteligența

artificială, învățarea automată și robotica convențională, au dat naștere roboților colaborativi de nouă generație sau „coboți”.



Fig. 6.1. Tehnologiile prospective ale Industriei 5.0  
(Raja Santhi și Muthuswamy, 2023)

### **Senzorii inteligenți.**

În timp ce un senzor convențional are doar elementele de detectare de bază, un sistem de senzori inteligenți poate efectua în mod independent colectarea datelor, conversia datelor, procesarea datelor și poate stabili comunicații cu un sistem extern, cum ar fi un server cloud, care sunt unele dintre cerințele critice ale viitoarelor fabrici inteligente.

### **Gemenii digitali.**

Întrucât geamănul digital (*Digital Twin*) este o reprezentare ultra-realistă a unui sistem fizic, acesta poate fi combinat cu alte tehnologii digitale, cum ar fi

IoT, Big Data, inteligența artificială și învățarea automată (*Machine Learning*), pentru a colecta date în timp real și a monitoriza starea de sănătate a sistemului, a prezice durata de viață utilă rămasă și în mentenanță preventivă. Diferitele aplicații ale gemenilor digitali în industrie includ proiectarea de produse și dezvoltarea de noi produse, fabricarea de produse, managementul activelor, monitorizarea și optimizarea proceselor, controlul calității, mentenanța predictivă, managementul lanțului de aprovizionare și asistarea în luarea deciziilor prin sprijinirea interfuncțională.

### **Internetul tuturor lucrurilor și inteligența artificială a lucrurilor.**

Dacă IoT se referă la conectarea obiectelor fizice cu internetul, care este o singură tranziție tehnologică, internetul tuturor lucrurilor (*Internet of Everything*, IoE) conține multe tranziții tehnologice în care IoT este una dintre părți.

Unirea inteligenței artificiale și a internetului lucrurilor dă naștere inteligenței artificiale a lucrurilor (*Artificial Intelligence of Things*, AIoT), care devine un subiect nou tehnologic în automatizarea industrială. Cu AIoT, un dispozitiv fizic conectat câștigă puterea de a rezolva probleme și de a lua decizii care erau imposibile pentru dispozitivele convenționale compatibile cu IoT.

### **Blockchain.**

Este un registru gestionat digital, distribuit și descentralizat, folosit pentru a stoca atât active corporale, cât și necorporale într-o rețea de afaceri sub formă de tranzacții într-un format imuabil. În termeni simpli, tehnologia poate fi definită ca un lanț care conține blocuri de date în secvența cronologică care sunt stocate permanent în formă criptată ca un registru distribuit care este inviolabil sau fals.

### **Edge and Fog Computing.**

Dezavantajele tehnologiei *Cloud Computing* pot fi depășite prin utilizarea *Edge Computing*, care este un cadru de calcul și stocare distribuit în apropierea sursei în care sunt create datele, care păstrează datele pe părțile locale ale rețelei sau pe dispozitivele *Edge*, în loc să utilizeze un server de date centralizat, ceea ce îmbunătățește timpul de răspuns și economisește lățime de bandă a rețelei. Prin urmare, dezavantajul *Cloud Computing*-ului poate fi rezolvat prin arhitecturi *Edge* sau *Fog Computing* care oferă serviciul în apropierea dispozitivului IoT în loc de infrastructura cloud centralizată, care este importantă în aplicații critice, cum ar fi producția în timp real, vehiculele autonome, asistența cognitivă și asistența medicală.



### **Cognitiv computing.**

Se referă la setul de platforme tehnologice care utilizează modele computerizate pentru a imita procesele gândirii umane pentru a rezolva probleme complexe.

### **6G and beyond.**

Acestea pot ajuta să răspundă cerințelor de conectivitate wireless ale dispozitivelor și serviciilor inteligente. Deoarece o rețea 6G, așteptată a fi lansată în 2030, va putea folosi frecvențe mai mari în comparație cu 5G, oferind o capacitate mai mare și o latență mai mică.

### **Realitatea augmentată, realitatea mixtă și holografia.**

Realitatea augmentată (*Augmented Reality*, AR) este o tehnologie folosită pentru a suprapune informații digitale în aplicații din lumea reală, pentru a oferi utilizatorilor o imagine compozită. Realitatea mixtă (*Mixed Reality*, MR), așa cum sugerează și numele, este un amestec de lumi reale și virtuale, în care utilizatorii pot, de asemenea, interacționa și manipula mediul virtual cu sprijinul tehnologiilor de detectare și imagistică de ultimă generație. Holografia este un alt instrument de vizualizare, care se mai numește și fotografie tridimensională. Tehnica înregistrează caracteristica unui obiect 3D folosind lasere care sunt reconstruite digital, pentru a reproduce cu acuratețe obiectele originale.

Pe baza analizei detaliate a literaturii, se poate constata că tehnologiile din Industria 4.0 și 5.0 pot fi clasificate în trei: tehnologii de bază, tehnologii de sprijin și tehnologii benefice. Tehnologii precum IoT, IoE, AIoT, AI, calculul cognitiv, automatizarea și robotica pot fi considerate drept tehnologiile de bază în jurul cărora s-a construit următoarea revoluție industrială. Tehnologiile precum *Cloud Computing*, *Edge Computing*, *Big Data*, *Blockchain*, 6G și securitatea cibernetică pot fi considerate drept tehnologii de sprijin care asigură infrastructura critică pentru funcționarea tehnologiilor de bază. Sistemele cibernetice, fabricarea aditivă, roboții, gemenii digitali, senzorii inteligenți și realitatea extinsă sunt câteva dintre tehnologiile benefice care se bazează pe tehnologiile de bază și suport pentru funcționalitatea lor și obțin beneficii de pe urma acestora.

Cum mai mult de două treimi din industrii încă nu au adoptat Industria 4.0, există posibilitatea să se poată sări direct în tehnologiile din industria 5.0. Comparația evoluției Industriei 4.0 în tehnologiile Industriei 5.0 este prezentată în tabelul 6.1.

Tab. 6.1. Comparația tehnologiilor Industriei 4.0 și Industriei 5.0 (Raja Santhi și Muthuswamy, 2023)

S#	Industry 4.0 technologies	Industry 5.0 technologies
1	Mass customization	Mass personalization
2	Highly automated autonomous systems	Individualized human-machine interactions
3	Automation and Industrial robots	Intelligent automation, Collaborative robots
4	Artificial intelligence, Machine learning	Cognitive computing
5	Internet of Things (IoT), Industrial Internet of Things (IIoT)	Internet of Everything (IoE), Artificial Intelligence of Things (AIoT)
6	Cloud computing	Edge computing, Fog computing
7	Simulations	Digital twins
8	Centralized traditional databases	Decentralized blockchain
9	LAN, Internet	Ultra-low latency high speed internet
10	Virtual reality	Extended reality (AR, MR, Holography) and Metaverse

### 6.3. Evoluția și viitorul sistemelor de fabricație

Sistemele de fabricație au cunoscut schimbări semnificative de-a lungul multor decenii, influențate de produsele fabricate, tehnologiile utilizate și strategiile de afaceri utilizate (fig. 6.2).

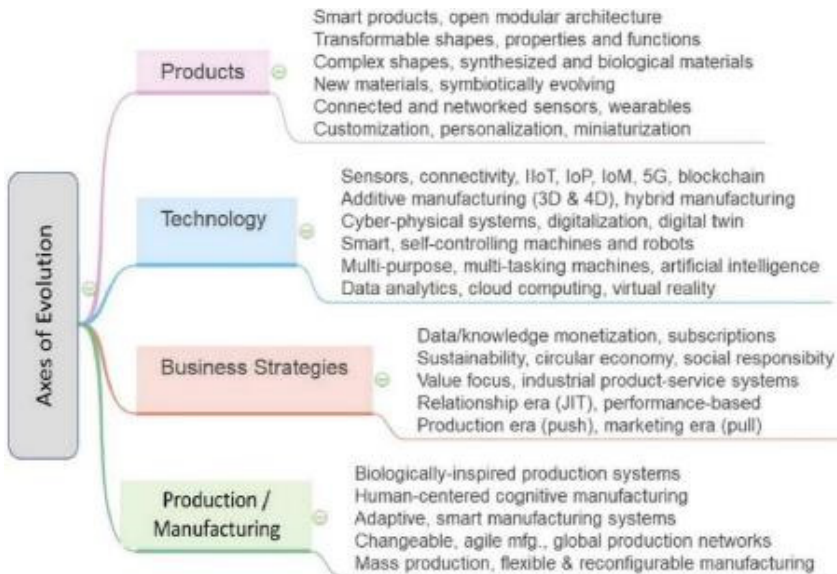


Fig. 6.2. Cele patru axe ale evoluției (ElMaraghy ș.a., 2021)

Sistemele de fabricație continuă să evolueze în ceea ce privește proiectarea, configurarea, operarea și controlul, într-un ecosistem caracterizat de

factori mai avansați și tehnologii și modele de afaceri perturbatoare. Evoluțiile socio-tehnice și strategiile de afaceri le vor modela viitorul (ElMaraghy ș.a., 2021).

Urmărirea și analizarea efectelor revoluțiilor industriale asupra schimbărilor în sistemele de producție și activarea axelor de evoluție este un bun predictor al ceea ce va urma și a ceea ce spun industria și experții despre evoluțiile necesare. În figura 6.3 se prezintă tendințele și domeniul de aplicare al evoluției sistemelor de fabricație.

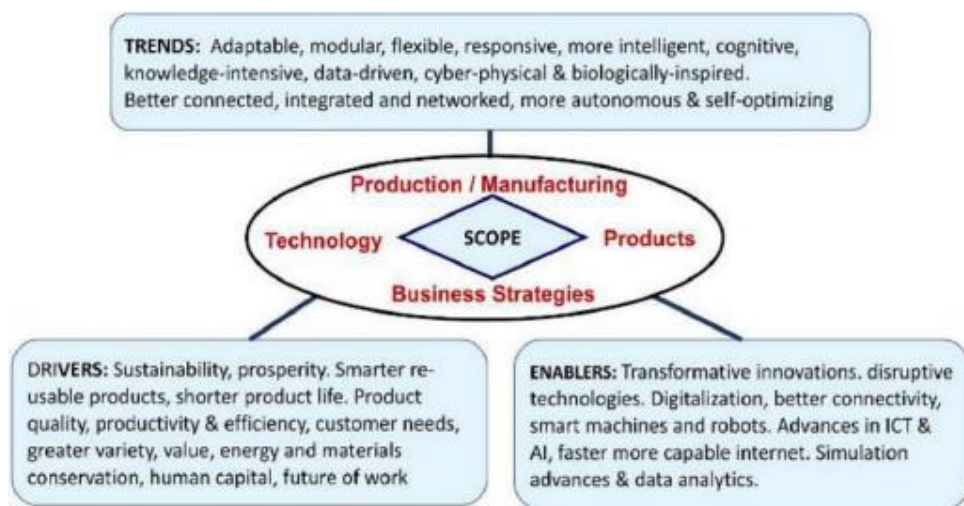


Fig. 6.3. Tendințele și domeniul de aplicare al evoluției sistemelor de fabricație (ElMaraghy ș.a., 2021)

Schimbările sistemelor de producție de-a lungul mai multor decenii sunt determinate de progresele în producție și alte tehnologii, introducerea de noi materiale și produse complexe care necesită noi tehnici de procesare, strategii organizaționale care urmăresc să minimizeze costurile, să crească calitatea și fiabilitatea, să maximizeze profitul și preocupările legate de obiectivele societale și de durabilitate, precum și interacțiunea oamenilor cu elementele sistemelor și viitorul muncii.

Sistemele de fabricație cuprind atât aspectele fizice, cât și logice ale producției. Configurația lor fizică constă în mașini, stații de lucru, roboți și alte echipamente aranjate în diverse configurații și integrate sau conectate fizic prin echipamente de manipulare a materialelor și logic prin control computerizat și

aplicații software. Oamenii sunt parte integrantă a sistemelor de producție și joacă un rol important în proiectarea, planificarea, operarea și controlul lor. Calculatoarele au jucat un rol semnificativ în operarea și controlul sistemelor de producție și al modulelor acestora, inclusiv aplicații software pentru proiectarea asistată de computer și fabricarea asistată de calculator (CAD/CAM), control numeric computerizat (CNC), managementul ciclului de viață al produsului (PLM), planificarea proceselor, planificarea și programarea producției, inspecția, controlul calității, întreținerea, inventarul și managementul lanțului de aprovizionare.

Paradigma sistemelor de fabricație a evoluat de-a lungul timpului, influențată de schimbările produse, tehnologia și procesele de producție, volumul producției și diferitele grade de automatizare, inteligență și adaptare, așa cum este prezentat în figura 6.4 (ElMaraghy ș.a., 2021).

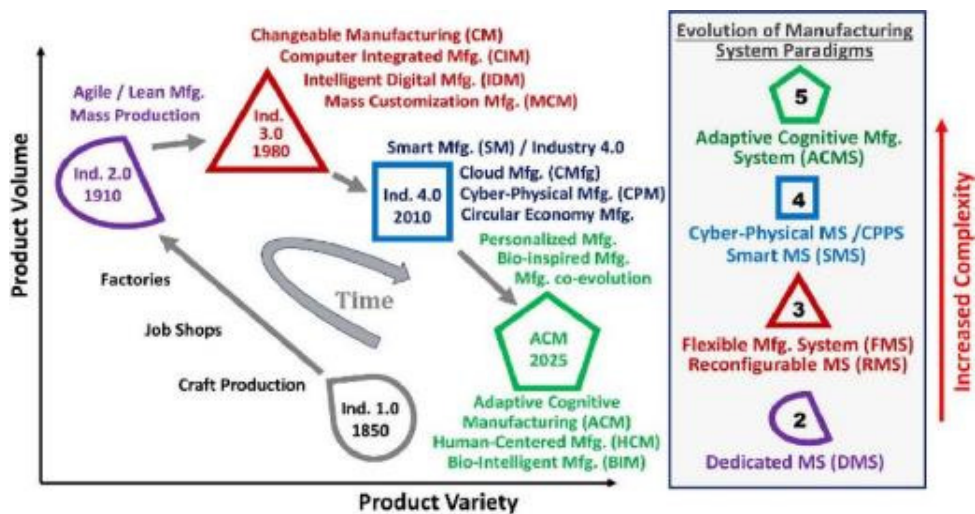


Fig. 6.4. Paradigme de fabricație și paradigme de sisteme de fabricație (ElMaraghy ș.a., 2021)

Fabricația cognitivă adaptivă (*Adaptive Cognitive Manufacturing*, ACM) folosește tehnologiile Industriei 4.0 și 5.0, inclusiv analizele de date mari și inteligența artificială și generează informații utile și interacțiuni între oameni și mașini. Toate vor fi activate și susținute de module AI, senzori inteligenți, informații extinse și analiză a datelor și acțiunile și metodele de execuție

automatizate, cognitive și hibride de adaptare om-mașină, precum și experiența și înțelepciunea umană (ElMaraghy ș.a., 2021).

Evoluția sistemelor de fabricație și tendințele viitoare către fabricația inteligentă cognitivă este discutată în contextul evoluției producției de-a lungul revoluțiilor industriale, de la producția artizanală la era actuală a producției inteligente și într-o viitoare producție bio-inteligentă.

O astfel de nouă paradigmă, a sistemelor de fabricație cognitive adaptive (*Adaptive Cognitive Manufacturing System*, ACMS), va fi activată și făcută posibilă prin analiza predictivă, luarea de decizii îmbunătățită prin inteligență artificială și comportamentul cognitiv, cum ar fi percepția, planificarea și acțiunile inteligente, precum și o conectivitate eficientă și o integrare perfectă. Caracteristicile ACMS vor include capacitatea de a anticipa schimbările prin analizarea continuă a unei game largi de date colectate la toate nivelurile, intern în cadrul sistemului și extern de la alte site-uri, parteneri, piețe și tendințe globale, planificarea și construirea de strategii solide pentru cel mai adecvat tip de adaptabilitate care să fie implementat și momentul potrivit susținut de scenariile pentru întreruperi în cazul în care există și răspunsuri de atenuare fizice, logice și strategice proporționale. Trebuie subliniat faptul că intervalul de timp pentru care ACMS cu toate caracteristicile și capacitățile sale va fi dezvoltat și implementat în fabrici a fost exclus în mod intenționat, deoarece multe dintre tehnologiile sale compatibile sunt încă în curs de dezvoltare și evoluție.

ElMaraghy și ElMaraghy (2022) consideră că adaptivitatea este cea mai relevantă caracteristică a sistemelor de fabricație în evoluție, reflectând capacitatea de a se adapta la noile condiții și de a fi modificată pentru un nou scop sau utilizare. Se disting patru tipuri de adaptabilitate.

Adaptabilitatea statică este încorporată în flexibilitate pre-planificată prin proiectare. Componentele sistemului, modulele, mașinile, configurația și regulile de operare fac adaptabilitatea statică fezabilă.

Adaptabilitatea dinamică implică schimbări orientate spre acțiune, care afectează sistemul de producție și componentele sale și implică eforturi externe ale specialiștilor (ingineri, tehnicieni și muncitori) pentru a implementa și realiza adaptarea intenționată. Aceasta implică reconfigurarea mașinilor prin adăugarea/eliminarea modulelor, reconfigurarea sistemelor de producție prin adăugarea/înlăturarea și relocarea mașinilor și stațiilor de lucru, schimbarea

rutelor de flux, reconfigurarea mașinilor, logica de control a sistemului și infrastructura de fabrică modificabilă.

Adaptabilitatea cognitivă este diferită de adaptabilitatea statică și dinamică deoarece răspunsurile adaptive sunt declanșate și executate autonom. Cogniția adaptativă umană include conștientizarea de sine a contextului și comportamentele de auto-optimizare. Interacțiunile dintre mașini și componente hardware din sistemul de producție folosesc senzori, IT, IoT, IoP și capacități CPPS. Adaptarea cognitivă utilizează caracteristicile de schimbare încorporate, care permit scalabilitatea agilă și optimă a funcției și a domeniului de aplicare prin schimbarea familiilor de produse și scalabilitatea capacității de producție dincolo de schimbările anticipate și planificate. Mașinile sunt reconfigurate prin adăugarea și eliminarea modulelor. Configurația sistemului de fabricație este modificată prin adăugarea și eliminarea mașinilor. Fluxul de produse este modificat cu sisteme reconfigurabile de manipulare a materialelor (MHS). Inteligența artificială și hibridă om-mașină, cum ar fi detectarea, percepția, anticiparea, predicția, planificarea, acțiunea și luarea deciziilor și controlul descentralizat și autonom inteligent al mașinilor și al producției permit răspunsuri cognitive adaptative sintetizate autonome.

Adaptabilitatea extremă se bazează pe reziliența și capacitatea sistemului de fabricație de a se recupera (parțial sau complet) de la întreruperi extreme multidimensionale neașteptate și de a reveni la starea sau funcționarea normală sau aproape normală a sistemului proiectat, cu întârziere și pierderi minime.

Geamănul digital (DT) al sistemelor de fabricație a evoluat foarte mult, de când termenul a fost inventat pentru prima dată în 2002. În figura 6.5 se prezintă transformarea digitală către geamănul digital cognitiv adaptiv.

Viitorul geamăn digital cognitiv (CDT) va deveni nu numai o reprezentare digitală precisă, ci și un însoțitor inteligent și de creștere al sistemului fizic, inclusiv al subsistemelor, pe tot parcursul ciclului de viață și al evoluției sale. Geamănul digital cognitiv adaptiv va avea, de asemenea, modele încorporate de operatori umani în sistem, nu numai fizic, ci și comportamental, pentru a le capta acțiunile și a le ghida interacțiunea cu roboți și mașini din ce în ce mai inteligenți, adaptivi și cognitivi colaboratori.

Caracteristicile așteptate ale fabricației în viitor, luând în considerare cele patru axe de evoluție, includ (ElMaraghy ș.a., 2021):

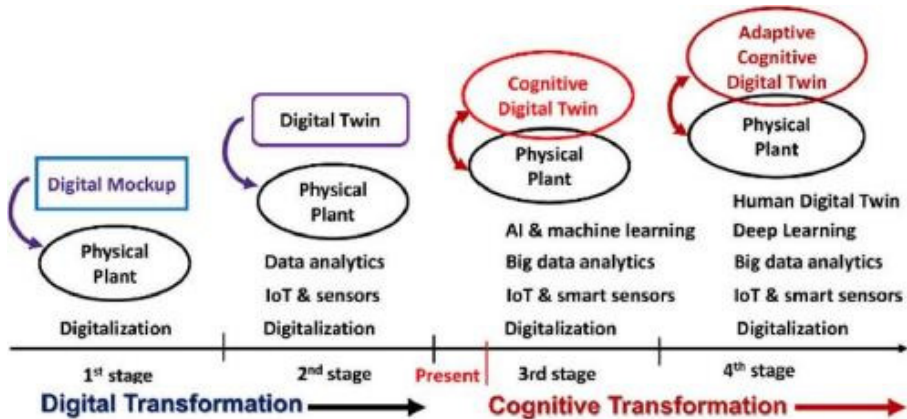


Fig. 6.5. Transformarea digitală către geamănul digital cognitiv adaptiv, după Centrul Intelligent Manufacturing Systems (IMS), U. Windsor (ElMaraghy ș.a., 2021)

**Produsele.** Acestea vor fi mai inteligente, mai complexe și mai ecologice, vor avea sisteme încorporate și inteligență încorporată și vor folosi materiale biodegradabile inteligente și auto-vindecătoare.

**Tehnologiile.** Se va asista la progrese accelerate în tehnologiile exponențiale, inclusiv în calcul, tehnologia informației, comunicații, aplicații de inteligență artificială, învățarea automată și metodologiile de învățare profundă; progrese în tehnologiile de producție transformatoare; dezvoltarea de mașini rezistente, comunicatoare, cognitive și mai autonome; implementarea tehnologiilor de inspirație biologică.

**Modelele de afaceri.** Se vor folosi strategii de afaceri digitale și mai multă diversitate în modele de operare; se va mări modelul „just-in-time” cu scenarii pentru „just-in-time”; se vor utiliza noi rețele strategice de colaborare și parteneriat; se vor implementa modele de afaceri cu plata pe utilizare, cum ar fi leasingul și abonamentul, care probabil vor perturba sistemele de producție cu plăți incrementale pentru performanță și garantarea nivelului de utilizare a priori. Acestea vor asigura o scalabilitate mai eficientă a capacității sistemelor prin partajarea resurselor distribuite între mulți clienți; se va obține o valoare sporită din serviciile digitale; se vor utiliza lanțuri de aprovizionare mai rezistente și rețele de valoare activate de IA care vor contribui în mod semnificativ la competitivitate și vor oferi mai mult sprijin pentru producția locală și inovația locală.

**Sistemele de fabricație.** Acestea vor prezenta flexibilitate maximă, scalabilitate fizică și logică și agilitate; vor utiliza mai mulți factori de adaptare statici, dinamici și cognitivi pentru a îmbunătăți productivitatea și a sublinia toate cele trei fațete ale durabilității; vor spori colaborarea om-mașină și luarea deciziilor partajate, vor înlocui interacțiunile implicite cu partajarea explicită a sarcinilor și se vor bucura de o vizibilitate mai mare pe tot parcursul. Viitoarele sisteme de producție vor folosi inteligența naturală și artificială augmentată hibridă în operarea și controlul sistemelor. Utilizarea de mașini autonome, roboți, planificare și control al producției, diagnosticare îmbunătățită, mentenanță predictivă, iar verificarea calității va fi extinsă. Utilizarea managementului inteligent și a funcțiilor de afaceri; Partajarea extinsă a datelor și a cunoștințelor cu măsurile de securitate cibernetică în vigoare va fi obișnuită.

**Gemenii digitali și fizici** vor deveni inseparabili pentru o funcționare mai eficientă și optimă, dar oamenii vor continua să fie o parte esențială a procesului decizional interactiv la nivel operațional, tactic și strategic.

**Oamenii** sunt cele mai adaptabile și valoroase active din sistemele de producție. Integrarea experienței umane și a cunoștințelor cu vizibilitatea învățării automate și transformarea digitală și cognitivă ciber-fizică necesită noi abilități și o educație multidisciplinară îmbunătățită. Munca și lucrătorii vor fi mai versatili și flexibile, și vor fi esențiale. Lucrul de la distanță va crește datorită transparenței îmbunătățite a operațiunilor digitale. Natura muncii în sistemele de producție se va schimba și vor fi diferite locuri de muncă, care vor apărea pentru a sprijini noile tehnologii.

Paradigma sistemelor de fabricație cognitive adaptive (ACMS) în evoluție va deveni mai predictivă, adaptativă, centrată pe om și transparentă, și se va bucura de o adoptare industrială sporită.

În concluzie, pe măsură ce fabricația evoluează la următoarea etapă, a sistemelor de fabricație cognitivă adaptivă (ACMS), există provocări tehnologice de bază în viitor. Sunt necesare noi direcții de cercetare pentru a sprijini evoluția viitoarelor sisteme de producție, prin: transformările digitale și cognitive ale acestora, inclusiv suportul fizic, senzorial și cognitiv al sistemelor de fabricație; metodologii statice, dinamice, cognitive și de adaptare extremă; modularitate, flexibilitate, reconfigurabilitate, schimbare și capacitate de răspuns; sisteme de fabricație mai inteligente, cognitive, intensive în cunoștințe, bazate pe date ciber-fizice și inspirate biologic; sisteme autonome mai bine conectate, integrate și



conectate în rețea. Sistemele, subsistemele și componentele complet integrate și în mod inerent inteligente vor defini următoarea generație de mașini, sisteme și întreprinderi inteligente.

## BIBLIOGRAFIE

1. Almada-Lobo, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES), *Journal of Innovation Management*, JIM 3, 4, Pag. 16-21
2. Alsafi, Y., Vyatkin, V. (2010). Ontology-based reconfiguration agent for intelligent mechatronic systems in flexible manufacturing, *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 26, Pag. 381–391, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.12.001>.
3. Anderson, C. (2004). The Long Tail. *Wired Magazine*.
4. Anderson, C. (2006). The Long Tail: Why the Future of Business is Selling Less of More.
5. Andersen, A.-L., Brunoe, T.D., Nielsen, K., Rösiö, C. (2017). Towards a generic design method for reconfigurable manufacturing systems: Analysis and synthesis of current design methods and evaluation of supportive tools, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 42, Pag. 179-195, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.11.006>
6. Armengaud, E., Sams, C., von Falck, G., List, G., Kreiner, C., Riel, A. (2017). Industry 4.0 as Digitalization over the Entire Product Lifecycle: Opportunities in the Automotive Domain. In: Stolfa J., Stolfa S., O'Connor R., Messnarz R. (eds) *Systems, Software and Services Process Improvement. EuroSPI 2017. Communications in Computer and Information Science*, vol. 748. Pag. 334-351, Springer, DOI: 10.1007/978-3-319-64218-5\_28
7. Baldwin, C.Y., Clark, K.B. (2003). Ch. 5. Managing in an Age of Modularity, in Garud, R., Kumaraswamy, A., Langlois, R. (Eds.), *Managing in the Modular Age*, Blackwell Publisher Ltd., Pag. 149-171
8. Banabic, D. (2016). A patra revoluție industrială. Simpozionul «Perspective în Inginerie», Zilele Academice Clujene, Cluj Napoca, 20 Mai, 2016.
9. Banabic, D. (2018). Evoluția tehnicii și tehnologiilor de la prima la a patra revoluție industrială și impactul lor social, Discurs de recepție în Academia Română, 26 Septembrie 2018.

10. Bi, Z., Zhang, W.J., Wu, C., Luo, C., Xu L. (2021-1). Generic Design Methodology for Smart Manufacturing Systems from a Practical Perspective. Part I—Digital Triad Concept and Its Application as a System Reference Model, *Machines* 2021, 9(10), 207, <https://doi.org/10.3390/machines9100207>
11. Bi, Z., Zhang, W.J., Wu, C., Luo, C., Xu L. (2021-2). Generic Design Methodology for Smart Manufacturing Systems from a Practical Perspective. Part II—Systematic Designs of Smart Manufacturing Systems, *Machines* 2021, 9(10), 208, <https://doi.org/10.3390/machines9100208>
12. Blessing, L.T.M., Chakrabarti, A. (2009). DRM, a Design Research Methodology, © Springer-Verlag London Limited
13. Boccella, A.R., Centobelli, P., Cerchione R., Murino, T., Riedel, R. (2020). Evaluating Centralized and Heterarchical Control of Smart Manufacturing Systems in the Era of Industry 4.0, *Applied Sciences*, 10(3), 755, <https://doi.org/10.3390/app10030755>
14. Bortolini, M., Galizia, F.G., Mora, C. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 49, Pag. 93-106, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.005>
15. Bortolini, M., Galizia, F.G., Mora, C. (2019). Dynamic design and management of reconfigurable manufacturing systems, *Procedia Manufacturing*, Volume 33, 2019, Pag. 67-74, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.010>
16. Brynjolfsson, E., Hu, Y.J., Smith, M.D. (2010). The longer tail: the changing shape of Amazon's sales distribution curve. In: *Proceedings of the Workshop on Information Systems and Economics*, Brynjolfsson, Erik and Hu, Yu Jeffrey and Smith, Michael D., *The Longer Tail: The Changing Shape of Amazon's Sales Distribution Curve*, September 20, 2010. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1679991>
17. Buchi, G., Cugno M., Castagnoli, R. (2018). Economies of scale and network economies in industry 4.0 *Symphonya Emerging Issues in Management* 2, Pag. 66–76, <https://doi.org/10.4468/2018.2.06buchi.cugno.castagnoli>
18. Buchi, G., Cugno M., Castagnoli R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 150, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119790>

19. Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., Yin, B. (2018). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges, in *IEEE Access*, vol. 6, Pag. 6505-6519, DOI:10.1109/ACCESS.2017.2783682
20. Chrysolouris, G., Mavrikios, D., Papakostas, N., Mourtzis, D., Michalos, G., Georgoulas, E.K. (2009). Digital manufacturing: History, perspectives, and outlook. *Journal of Engineering Manufacture*, 223(5), Pag. 451–462, <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1241>
21. Dahmani, A., Benyoucef, L., Mercantini, J.-M. (2022). Toward Sustainable Reconfigurable Manufacturing Systems (SRMS): Past, Present, and Future, *Procedia Computer Science*, Volume 200, Pag. 1605-1614, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.361>
22. Deloitte (2021). The smart factory: Responsive, adaptive, connected manufacturing, [https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4051\\_The-smart-factory/DUP\\_The-smart-factory.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/4051_The-smart-factory/DUP_The-smart-factory.pdf)
23. El Hamdi, S., Oudani, M., Abouabdellah, A. (2019). Towards Identification of the Hierarchical Link between Industry 4.0, Smart Manufacturing and Smart Factory: Concept Cross-Comparison and Synthesis. *International Journal of Supply and Operations Management* 6(3), Pag. 231-244, DOI: [10.22034/2019.3.4](https://doi.org/10.22034/2019.3.4)
24. ElMaraghy, H.A. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *Int. J. Flex. Manuf. Syst.*, 17, Pag. 261–276, <https://doi.org/10.1007/s10696-006-9028-7>
25. ElMaraghy, H., Monostori, L., Schuh, G., ElMaraghy, W. (2021). Evolution and future of manufacturing systems, *CIRP Annals*, Volume 70, Issue 2, Pag. 635-658, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.05.008>
26. ElMaraghy, H., ElMaraghy, W. (2022). Adaptive Cognitive Manufacturing System (ACMS) – a new paradigm, *International Journal of Production Research*, 60:24, Pag. 7436-7449, DOI: [10.1080/00207543.2022.2078248](https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2078248)
27. Fogliatto, F.S., da Silvera, G.J., Borestein, D. (2012). The mass customization decade: an updated review of the literature. *Int. J. Prod. Econ.* 138 (1), Pag. 14–25.
28. Frank, A.G., Dalenogare, L.S., Ayala, N.F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies, *International Journal of Production Economics*, Volume 210, Pag. 15-26, ISSN 0925-5273, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>

29. Geissbauer, R., Vedso, J., Schrauf, S. (2015). Industry 4.0: Building the digital enterprise, PWC, <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>
30. Gerbert, P. ș.a. (2015). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, Boston Consulting Group (BCG), [https://www.bcg.com/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries.aspx](https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx)
31. Gissler, A., Oertel, C., Knackfuß, C. Kupferschmidt, F. (2016). Driving digitization in the auto industry, Accenture Strategy, Arlington, VA, 2-6
32. Gu, X., Koren, Y. (2018). Manufacturing system architecture for cost-effective mass-individualization, Manufacturing Letters, Volume 16, Pag. 44-48, <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.04.002>
33. Gu, X., Koren Y. (2022). Mass-individualization – the twenty-first-century manufacturing paradigm, International Journal of Production Research, 60:24, Pag. 7572-7587, DOI: [10.1080/00207543.2021.2013565](https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2013565)
34. Gumasta, K., Gupta, S.K., Benyoucef, L., Tiwari, M.K. (2011). Developing a reconfigurability index using multi-attribute utility theory, International Journal of Production Research, 49 (6), Pag. 1669-1683, <https://doi.org/10.1080/00207540903555536>
35. Hankel, M., Rexroth, B. (2015). The Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). <https://przemysl-40.pl/wp-content/uploads/2010-The-Reference-Architectural-Model-Industrie-40.pdf>.
36. Helu, M., Morris, K., Jung, K., Lyons, K., Leong, S. (2015). Identifying performance assurance challenges for smart manufacturing, Manufacturing Letters 6 (2015), Pag. 1–4
37. Hermann, F. (2018). The Smart Factory and Its Risks. Systems 2018, 6(4), 38, DOI: 10.3390/systems6040038
38. Hermann, M., Pentek, T., Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Pag. 3928-3937, DOI: 10.1109/HICSS.2016.488
39. Holtkamp, B., Iyer, A. (2017). Industry 4.0—The Future of Indo-German Industrial Collaboration; Bertelsmann Stiftung: Gütersloh, Germany, <http://aei.pitt.edu/102682/>

40. ISO 9241-210: 2010. Ergonomics of human system interaction-Part 210: Human-centred design for interactive systems. International Standardization Organization (ISO)
41. Jiang, P., Leng, J., Ding, K., Gu, P., Koren, Y. (2016). Social manufacturing as a sustainable paradigm for mass individualization, Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture 1–8, IMechE 2016
42. Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. National Security of Science and Engineering (Acatech), Germania, April 2013.
43. Kagermann, H. (2014). Chancen von Industrie 4.0 nutzen. In: Bauernhansl, T., ten Hompel, M. and Vogel-Heuser, B. (Eds.), Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien und Migration, Pag. 603–614
44. Kang, H.S., Lee, J.Y., Choi, S. s.a. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech 3, Pag. 111–128, <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
45. Khanna, K., Kumar, R. (2019). Reconfigurable manufacturing system: a state-of-the-art review, Benchmarking: An International Journal, Vol. 26 No. 8, Pag. 2608-2635, <https://doi.org/10.1108/BIJ-05-2018-0140>
46. Kibira, D., Morris, K.C., Kumaraguru, S. (2016). An analysis of technologies and standards for designing smart manufacturing systems, J Res Natl Inst Stand Technol. 2016, 121, Pag. 282–313, DOI:[10.6028/jres.121.013](https://doi.org/10.6028/jres.121.013)
47. Koren, Y. (2010). The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems, Wiley, ISBN 978-0-470-58377-7
48. Koren, Y. (2013). The rapid responsiveness of RMS, Int J Prod Res, 51 (23–24), Pag. 6817-6827, <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.856528>
49. Koren, Y. (2020). The Emergence of Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs)', in Benyoucef, L. (Ed.) Reconfigurable Manufacturing Systems: From Design to Implementation, Springer International Publishing, Pag. 1-9.
50. Koren, Y., Gu, X., Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. Frontiers of Mechanical Engineering, 13, Pag. 121–136, <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>

51. Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G., Van Brussel, H. (1999). Reconfigurable Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP* 48 (2), Pag. 527–540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63232-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63232-6)
52. Koren, Y., Shpitalni, M., Gu, P., Hu, S.J. (2015). Product Design for Mass-Individualization. *CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation. Procedia CIRP* 36, Pag. 64 – 71, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.050>
53. Kumar, G., Goyal, K.K., Batra, N.K. (2019). Evolution, principles and recent trends in reconfigurable manufacturing system, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1240, 2nd International Conference on New Frontiers in Engineering, Science & Technology (NFEST) 18–22 February 2019, Kurukshetra, Haryana, India, doi:10.1088/1742-6596/1240/1/012161
54. Kusiak, A. (2018). Smart Manufacturing, *International Journal of Production Research*, Vol. 56, (No. 1-2), Pag. 508-517, <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
55. Lameche, K., Najid, N.M., Castagna, P., Kouiss, K. (2017). Modularity in the design of reconfigurable manufacturing systems, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 50, Issue 1, Pag. 3511-3516, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.939>
56. Lee, E.A. (2018). Cyber physical systems: Design challenges. In: *Proceedings of the 11th IEEE Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing*; Orlando, FL, USA. Piscataway: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
57. Lee, S.; Ryu, K. (2022). Development of the Architecture and Reconfiguration Methods for the Smart, Self-Reconfigurable Manufacturing System. *Appl. Sci.*, 12, 5172. <https://doi.org/10.3390/app12105172>
58. Leng, J., Liu, Q., Ye, S., Jing, J., Wang, Y., Zhang, C., Zhang, D., Chen, X. (2020). Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 63, 101895, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101895>
59. Leng, J., Wang, D., Shen, W., Li, X., Liu, Q., Chen, X. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, Pag. 119–137, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>

60. Liu, Q., Leng, J., Yan, D., Zhang, D., Wei, L., Yu, A., Zhao, R., Zhang, H., Chen, H. (2021). Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 58, Part B, Pag. 52-64, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.04.012>
61. Lopes Nunes, M., Pereira, A.C., Alves, A.C. (2017). Smart products development approaches for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing* 13, Pag. 1215–1222, DOI: 1-s2.0-S2351978917306704-main
62. Lu, Y., Morris, K.C., Frechette S. (2016). Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems, NISTIR 8107, National Institute of Standards and Technology, February 2016, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8107>
63. Lucke, D., Constantinescu, C., Westkämper, E. (2008). Smart factory-a step towards the next generation of manufacturing, in *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, Springer, Pag.115–118.
64. Maass, W., Janzen, S. (2007). Dynamic Product Interfaces: A Key Element for Ambient Shopping Environment, 20th Bled eConference "eMergence: Merging and Emerging Technologies, Processes, and Institutions", Bled, Slovenia.
65. Maler-Speredelozzi, V., Koren, Y., Hu, S.J. (2003). Convertibility Measures for Manufacturing Systems, *CIRP Annals*, 52 (1), Pag. 367-370, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60603-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60603-9)
66. Mehrabi, M.G., Ulsoy, A.G., Koren, Y. (2000). Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11 (4), Pag. 403-419, <https://doi.org/10.1023/A:1008930403506>
67. Meindl, B., Ayala, N.F., Mendonça, J., Frank, A.G. (2021). The four smarts of Industry 4.0: Evolution of ten years of research and future perspectives, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 168, 120784, ISSN 0040-1625, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120784>
68. Moghaddam, M., Cadavid, M.N., Kenley, C.R., Deshmukh, A.V. (2018). Reference architectures for smart manufacturing: A critical review, *Journal of Manufacturing Systems*, 49, Pag. 215–225, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.006>
69. Morgan, J., Halton, M., Qiao, Y., Breslin, J.G. (2021). Industry 4.0 smart reconfigurable machines. *J. Manuf. Syst.*, 59, Pag. 481–506, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.001>



70. Mourtzis, D. (2016 ). Challenges and future perspectives for the life cycle of manufacturing networks in the mass customisation era. *Logistics Research*, Vol. 9, Issue 1, Pag.. 1–20,  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12159-015-0129-0>
71. Oztemel, E., Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, Pag. 127–182, <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
72. Papakostas, N., Efthymiou, K., Georgoulas, K., Chryssolouris, G. (2013). On the Configuration and Planning of Dynamic Manufacturing Networks. In: Windt K. (eds) *Robust Manufacturing Control. Lecture Notes in Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-30749-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30749-2_18)
73. Pîrvu, B. C., Zamfirescu, C.B. (2017. Smart factory in the context of 4<sup>th</sup> industrial revolution: challenges and opportunities for Romania, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 227, 012094,  
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/227/1/012094>
74. Qu, Y.J., Ming, X.G., Liu, Z.W., Zhang, X.Y., Hou, Z.T (2019). Smart manufacturing systems: state of the art and future trends. *Int J Adv Manuf Technol* 103, Pag. 3751–3768, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03754-7>
75. Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., Madsen, E.S. (2014). The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions, *Procedia Engineering* 69, Pag. 1184–1190,  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.108>
76. Raja Santhi, A., Muthuswamy, P. (2023). Industry 5.0 or industry 4.0S? Introduction to industry 4.0 and a peek into the prospective industry 5.0 technologies. *Int J Interact Des Manuf* 17, Pag. 947–979,  
<https://doi.org/10.1007/s12008-023-01217-8>
77. Renzi, C., Leali, F., Cavazzuti, M., Andrisano, A.O. (2014). A review on artificial intelligence applications to the optimal design of dedicated and reconfigurable manufacturing systems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 72 (1), Pag. 403-418,  
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5674-1>
78. Romero, M., Guedria, W., Tanetto, H., Barafort, B. (2020). Towards a characterization of smart systems: A systematic literature review. *Computers in Industry*, Volume 120, September 2020, 103224,  
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103224>

79. Ruessmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries, The Boston Consulting Group, [https://www.bcg.com/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries](https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries)
80. Schlick, J., Stephan P., Loskyll M., Lappe D. (2014). Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung, in: Bauernhansl, T., M. ten Hompel, and B. Vogel-Heuser, eds., Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Springer, Wiesbaden, Pag. 57-84.
81. Schlund, W.S., Marrenbach, D., Ganschar, O. (2014). Industry 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland, BITKOM /Fraunhofer IAO, [https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Publikation\\_2753.html](https://www.bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Publikation_2753.html)
82. Schröder, C. (2016). The Challenges of Industry 4.0 for Small and Medium-Sized Enterprises. Friedrich-Ebert-Stiftung: Bonn, Germany, <http://library.fes.de/pdf-files/wiso/12683.pdf>
83. Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution, WEF, Geneve.
84. Stark, R., Damerau, T., Lindow, K. (2018). Industrie 4.0—Digital Redesign of Product Creation and Production in Berlin as an Industrial Location. In: Sandler U. (eds) The Internet of Things. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, Pag. 171-186, [https://doi.org/10.1007/978-3-662-54904-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54904-9_10)
85. Sufian, A.T., Abdulah, B.M., Ateeq, M., Wah, R., Clements, D. (2019). A Roadmap Towards the Smart Factory, 2019 Developments in eSystems Engineering (DeSE), Pag. 978-983, DOI: 10.1109/DeSE.2019.00182
86. Suh, N.P. (1998). Axiomatic Design Theory for Systems, Research in Engineering Design, 10, Springer-Verlag London Limited, Pag. 189–209
87. Tao, F., Cheng, J., Qi, Q. et al. (2018-1). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94, Pag. 3563–3576, <https://doi-org.am.e-nformation.ro/10.1007/s00170-017-0233-1>
88. Tao, F., Qi, Q., Liu, A., Kusiak, A. (2018-2). Data-driven smart manufacturing, Journal of Manufacturing Systems, Volume 48, Part C, Pag. 157-169, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006>
89. Tseng, M.M., Jiao, R.J., Wang, C. (2010). Design for mass personalization. CIRP Ann. Manuf. Technol. 59 (1), Pag. 175–178

90. Tseng, M.M., Wang, C. (2014). Modular Design, in Laperrière, L., Reinhart, G. (Eds.), CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Springer, Pag. 895-897
91. Țăpîrdea, A., Drăghici, G. (2022). Literature Review about Manufacturing Systems for Mass Customisation and Individualisation, Acta Technica Napocensis, Series-Applied Mathematics Mechanics and Engineering, Volume: 65, Issue: 3, Pag. 895-904, Special Issue: SI, ISSN 1221-5872, WOS:000953026700043
92. Țăpîrdea, A., Drăghici, G. (2022). Big Data Role in Smart Manufacturing, Acta Technica Napocensis, Series-Applied Mathematics Mechanics and Engineering, Volume: 65 Issue: 4, Pag. 1371-1378, Special Issue: SI, ISSN 1221-5872, WOS:000969679100054
93. Wang, B., Tao, F., Fang, X., Liu, C., Liu, Y., Freiheit, F. (2021). Smart Manufacturing and Intelligent Manufacturing: A Comparative Review, Engineering, Volume 7, Issue 6, Pag. 738-757, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.017>
94. Wang, G.X., Huang, S.H., Yan, Y., Du, J.J. (2017). Reconfiguration schemes evaluation based on preference ranking of key characteristics of reconfigurable manufacturing systems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89 (5), Pag. 2231-2249, <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9243-7>
95. Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R.X., Wu, D. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications, Journal of Manufacturing Systems, Vol. 48(C), Pag. 144-156, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003>
96. Wang, S., Wan, J., Li, D., Zhang, Z. (2016). Implementing Smart Factory of Industry 4.0: An Outlook, International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2016, Article ID 3159805, <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>
97. Wang, W., Koren, Y. (2012). Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems, Journal of Manufacturing Systems, 31 (2), Pag. 83-91, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.11.001>
98. Wang, X., Wang, Y., Tao, F., Liu, A. (2021). New paradigm of data-driven smart customization through digital twin. Journal of Manufacturing Systems, Volume 58, Part B, Pag. 270–280, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.023>

- 
99. Wee, D., Breunig, M., Kelly, R., Mathis, R. (2016). Industry 4.0 after the initial hype - Where manufacturers are finding value and how they can best capture it, McKinsey Digital
  100. Wei, S., Hu, J., Cheng, Y., Ma Y., Yu, Y. (2017). The essential elements of intelligent Manufacturing System Architecture, 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Xi'an, China, 2017, Pag. 1006-1011, DOI: 10.1109/COASE.2017.8256234
  101. Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems, IFAC-PapersOnLine, Volume 48, Issue 3, Pag. 579-584, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.143>
  102. Zawadzki, P., Żywicki, K. (2016). Smart Product Design and Production Control for Effective Mass Customization in the Industry 4.0 Concept. Management and Production Engineering Review 7(3), Pag. 105-112, DOI: 10.1515/mper-2016-0030
  103. Zehl, S. Implementation Strategy Industrie 4.0—Report on the results of the Industrie 4.0 Platform. Available online: <https://www.bitkom.org/NP-Themen/Branchen/Industrie-40/20160107-implementation-strategyindustrie40-en.pdf> (accessed on 3 September 2018).
  104. Zhang, C., Wenjun, X., Liu, J., Liu, Z., Zhou, Z., Pham, D.T. (2019). A Reconfigurable Modeling Approach for Digital Twin-based Manufacturing System, Procedia CIRP 83, Pag. 118–125, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.141>
  105. Zhang, C., Xu, W., Liu, J., Liu, Z., Zhou, Z., Pham, D.T. (2021). Digital twin-enabled reconfigurable modeling for smart manufacturing systems, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 34, Issue 7-8, Pag. 709-733, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0951192X.2019.1699256>
  106. Zhang, X., Ming, X., Liu, Z. et al. (2019). An overall framework and subsystems for smart manufacturing integrated system (SMIS) from multi-layers based on multi-perspectives. Int J Adv Manuf Technol 103, Pag. 703–722, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03593-6>
  107. Zhang, X., Ming, X. (2021). An implementation for Smart Manufacturing Information System (SMIS) from an industrial practice survey, Computers & Industrial Engineering, Volume 151, 106938, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106938>

108. Zhang, X., Ming, X. (2021-2). Further expansion from Smart Manufacturing System (SMS) to Smart Manufacturing Implementation System (SMIS): industrial application scenarios and evaluation. *Int J Adv Manuf Technol* 115, Pag. 3791–3809, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07411-w>
109. Zhang, X., Ming, X. (2023). A Smart system in Manufacturing with Mass Personalization (S-MMP) for blueprint and scenario driven by industrial model transformation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34, Pag. 1875–1893, <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01883-z>
110. Zhang, X., Ming, X., Yin, D. (2020). Application of industrial big data for smart manufacturing in product service system based on system engineering using fuzzy DEMATEL. *Journal of Cleaner Production*, Volume 265, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121863>
111. Zheng, P., Wang, H., Sang, Z. et al. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering* 13(2), Pag. 137–150, <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5>
112. Zhou, F., Ji, Y., Jiao, R.J. (2013). Affective and cognitive design for mass personalization: Status and prospect. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(5), Pag. 1047–1069, <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0673-2>

Această carte este concepută ca o resursă esențială pentru profesioniștii din domeniul industrial, cercetătorii, studenții și toți cei interesați să înțeleagă complexitatea și potențialul sistemelor de fabricație inteligente. În paginile ei, vom explora cum convergența tehnologiilor avansate – precum Internet of Things (IoT), inteligența artificială (AI), robotică, simulare și realitate augmentată – redefinește nu doar fabricarea produselor, ci și lanțurile de aprovizionare, procesele decizionale și experiența utilizatorului final. Sistemele de fabricație inteligente sunt nucleul Industriei 4.0. Ele reprezintă o simbioză între mașini, oameni și date, capabile să răspundă rapid la schimbările din piață, să optimizeze resursele și să creeze produse personalizate. Această carte explorează nu doar principiile fundamentale, ci și aplicațiile practice, provocările și tendințele viitoare din acest domeniu. Exemplele concrete și studiile de caz oferite demonstrează cum implementarea acestor sisteme poate duce la o creștere a eficienței, sustenabilității și competitivității (Acad. Dorel Banabic).

*Autorul, George Drăghici, a obținut diploma de inginer mecanic, specialitatea TCM, la Universitatea Politehnica Timișoara, în anul 1972, când a început și cariera universitară la Catedra de Tehnologia Construcțiilor de Mașini, în prezent Departamentul de Ingineria Materialelor și Fabricației, ocupând succesiv posturile de asistent (1972), șef de lucrări (1980), conferențiar (1990) și profesor (1992). De asemenea, a ținut cursuri la universități din Algeria și Franța. Este doctor din anul 1980 și conducător de doctorat din anul 1990. Este director al Centrului de Cercetări în Inginerie Integrată, înființat la Universitatea Politehnica Timișoara, centru de cercetare recunoscut în anul 2001 de Consiliul Național al Cercetării Științifice din Învățământul Superior. A fost membru în peste 150 comitete științifice ale unor conferințe organizate în țară și străinătate. Este autor a 10 invenții brevetate, peste 260 lucrări științifice și peste 30 cărți, capitole de carte și manuale universitare, publicate în țară și străinătate. Din anul 2016 este profesor emerit al Universității Politehnica Timișoara.*



Editura POLITEHNICA

ISBN 978-606-35-0631-4