

## Curs 10.

# Estimarea calitativă a riscului în sisteme industriale

### Probleme generale

Prevenirea pericolelor asupra mediului, sănătății și siguranței în funcționare este o acțiune care implică activități concertate ale specialiștilor, însumând experiență profesională și interes încă din etapa de proiectare, prin aplicarea de tehnici și metode calitative și cantitative bazate pe date existente sau pe acțiuni sistematice, creative, imaginative. Aceste studii au ca obiectiv principal stabilirea listei de hazarduri posibile și reprezintă primul pas în metodologia de realizare a analizelor și evaluărilor cantitative de hazard și risc. Dintre categoriile de metode de evaluare calitativă a riscului se pot menționa:

- Listele de verificare
- Inspecțiile integrale ale instalațiilor industriale
- Ierarhizarea
- Analiza preliminară de hazard
- Metoda *dar dacă?*
- Analiza modurilor de defectare, a efectelor și stărilor critice
- Analiza eroerilor umane
- Analiza HAZOP

### Listele de verificare

Identifică în general riscuri din categoria celor cunoscute, previzibile și fac trimiteri la standarde. Se cunosc următoarele tehnici:

- DSF – *Diagnosis Safety Form* se bazează pe un chestionar de 50 de întrebări referitoare la probleme de echipament tehnic, mediu înconjurător, organizarea producției etc.
- DCT – *Diagnostique et Conditions du Travail* conține un chestionar asemănător cu cel al metodei anterioare, aprecierea făcându-se în trei trepte: bun, mediu și slab;
- SQD – *Safety Diagnosis Questionnaire* urmărește identificarea situațiilor critice de incompatibilitate între condițiile tehnice și organizatorice, pe de o parte și cerințele de securitate ale activităților, pe de altă parte.
- MORT – *Management Oversight and Risk Three* utilizează un chestionar cu circa 300 de întrebări cu răspunsuri la alegere. Este concentrată pe activitățile umane și a fost concepută cu scopul de a îmbunătăți semnificativ performanțele privind securitatea sistemelor.

### Inspecțiile integrale ale instalațiilor industriale

Într-o interpretare actuală, inspecțiile integrale au apărut ca o necesitate a dezvoltării caracterului măsurabil al performanțelor în ceea ce privește siguranța sistemelor. Aceste inspecții oferă informații deosebit de utile pentru ansamblul activităților legate de proiectarea, construirea, punerea în funcțiune, operarea, scoaterea din exploatare, închiderea, demolarea, depozitarea elementelor componente ale instalațiilor.

Inspecțiile integrale au loc pe trei nivele, în care operatorul, experții și autoritățile au sarcini specifice:

- ◆ Inspectarea constantă a modului de operare a instalației și a elementelor componente de către managerii de proces și de inspectorii operatori cu sarcini speciale;
- ◆ Inspecții inițiale și periodice la intervale prestabilite de către experți independenți, eventual din exteriorul sistemului;
- ◆ Inspecții anunțate ale autorităților locale, pentru acordarea licenței de funcționare, precum și neanunțate.

### **Ierarhizarea**

Presupune identificarea surselor de pericol în faza de proiectare sau compararea instalațiilor de pe o platformă industrială aflată în exploatare. Se cuantifică astfel sursele potențiale de risc acordând nivele corespunzătoare de importanță și se stabilesc măsuri de prevenire.

### **Analiza preliminară de hazard (PHA)**

Se concentrează pe zonele care conțin materiale periculoase și pe utilajele principale, urmărind locurile unde ar putea să apară scăpări de substanțe periculoase sau degajări de energie într-un mod necontrolat. Principalele puncte luate în studiu sunt:

- substanțele participante în proces și pericolul potențial;
- utilajele din sistem;
- interfețele dintre componentele sistemului;
- mediul înconjurător;
- operațiile din sistem;
- dotări;
- echipamente de siguranță.

### **Metoda *Dar dacă?***

Se bazează pe repeterea unor serii de întrebări care urmăresc identificarea evenimentelor neașteptate cu eventuale consecințe nefavorabile și se aplică pe domenii specifice de activitate.

### **Analiza modurilor de defectare, a efectelor și stărilor critice**

Se poate efectua atât la nivel calitativ, cât și la nivel cantitativ și este concentrată pe componentele instalației/sistemului. Se bazează, în principiu pe elaborarea unui tabel ce conține următoarele:

- poziția, denumirea, descrierea echipamentului;
- modul de defectare;
- consecințe;
- atribuirea coeficienților critici pe o scală convențională stabilită în prealabil.

Algoritmul metodei implică următoarele etape:

1. definirea sistemului
2. identificarea modului de defectare;
3. analiza cauzelor de defectare;
4. analiza efectelor defecțiunilor;
5. analiza posibilităților de compensare;
6. evaluarea riscului asociat fiecărui mod de defectare;
7. propunerea remedierilor și a măsurilor de prevenire.

## **Analiza erorilor umane**

Erorile umane, definite ca greșeli, lipsă de concordanță între percepții și realitatea obiectivă, confirmată prin practică, sunt inevitabile, nu pot fi prezise. De aceea este foarte costisitor să fie asigurată siguranța, deoarece este dificilă anticiparea mulțimii de posibilități prin care, neatenția sau oboseala pot afecta securitatea procesului/instalației/sistemului. Se pot aplica totuși pachete elaborate de măsuri de prevenire pentru diminuarea contribuției acțiunii umane la accidentele majore, dacă se cunoaște tipul de eroare posibilă.

O clasificare a erorilor umane ar putea fi următoarea:

- erori datorate lipsei momentane de atenție;
- erori datorate unei instruirii sau pregătiri deficitare;
- erori datorate abilităților psihice și fizice slabe ale personalului operator;
- erori datorate unor decizii greșite;
- erori comise de manageri

## **Metoda HAZOP**

Obiectivele metodei HAZOP sunt:

- identificarea locurilor în care există hazarde
- determinarea particularităților proiectelor prin care se pot identifica probabilitățile de apariție a unor evenimente nedorite
- stabilirea informației necesare în proiectare din perspectiva asigurării fiabilității instalației;
- inițierea și dezvoltarea studiilor cantitative de hazard și risc.

## **Metoda HAZOP în procese chimice**

În mod tradițional, siguranța în proiectarea instalațiilor chimice se bazează pe aplicarea unor coduri de proiectare, exploatare și liste de verificare pe baza unei experiențe largi și a cunoștințelor profesionale ale experților și specialiștilor din industrie. Din păcate, o astfel de abordare poate soluționa probleme care au apărut înainte. Odată cu creșterea complexității instalațiilor moderne, aceste metode tradiționale și pierd din pondere, considerându-se că aplicarea lor în faza de proiectare este cea mai recomandabilă. HAZOP a fost elaborată de ICI în anii '60 ca o tehnică aplicată pentru a depăși această problemă și pentru a identifica în mod sistematic hazardele potențiale și problemele de operativitate în noile instalații chimice și petrochimice, atât în procese discontinue, cât și în procese continue. HAZOP poate fi de asemenea utilizată pentru modificări și revizuirii ale proceselor existente.

Prin intermediul HAZOP, se realizează o examinare critică, structurată, a instalațiilor sau proceselor de către o echipă experimentată din staff-ul companiei, în scopul identificării tuturor abaterilor posibile de la un anumit proiect, odată cu efectele nedorite ce apar drept consecințe asupra siguranței, operabilității, mediului. Abaterile posibile sunt descoperite folosind chestionare riguroase ce conțin cuvinte-cheie aplicate proiectului analizat (tabelul 1).

Deviațiile de la intențiile din proiect sunt create prin cuplarea cuvântului-cheie cu un parametru variabil sau o caracteristică a instalației sau procesului, cum ar fi reacțanții, secvența reacțională, temperatura, presiunea, debitul, faza etc. Cu alte cuvinte:

***cuvânt-cheie + parametru = deviație***

De exemplu, când se consideră un vas de reacție în care se realizează o reacție exotermă și unul din reacțanți trebuie agăugat treptat, cuvântul cheie *mai mult* va fi cuplat cu parametrul *reactant* și deviația/abaterea generată va fi *creșterea rapidă a temperaturii*. După examinarea unei părți din proiect și înregistrarea pericolelor potențiale și a problemelor de operabilitate

asociate cu acestea, studiul progresează, localizându-se pe urmărirea parte a proiectului sau pe următoarea fază a operației. Examinarea se repetă până când a fost studiată întreaga instalație pentru toate modurile de operare majore. Apoi, se pot face recomandări pentru modificări în proiect, în procedura de operare a materialelor, în scopul depășirii problemelor care au fost identificate.

**Tabelul 1.**

Cuvinte-cheie standard și sensul lor generic

Cuvânt-cheie	Sens
Nu	Nici una din intențiile din proiect nu a fost realizată
Mai mult	Creștere cantitativă a unui parametru
Mai puțin	Descrescere cantitativă a unui parametru
Cât și	Se realizează încă o activitate
Parte din	Numai o parte din intențiile de proiectare sunt realizate
Reverse	Se realizează opoziții logice a intențiilor din proiect
Altele decât	Substituție completă. Are loc o altă activitate
Unde altundeva	Aplicabilă pentru curgere, transfer, surse și destinații
Înainte/după	Faza sau o parte din ea se efectuează în afara secvenței
Devreme/târziu	Sincronizarea este diferită față de intenție
Mai repede/mai încet	Faza este realizată/nerealizată la timp

Succesul sau insuccesul studiului depinde de patru aspecte:

- Acuratețea proiectului și a celorlalte date utilizate ca bază pentru studiu
- Pregătirea tehnică și experiența echipei
- Capacitatea echipei de a utiliza metoda ca un sprijin pentru vizualizarea abaterilor posibile, cauzelor și consecințelor
- Capacitatea echipei de a menține sensul proporțiilor, mai ales atunci când se evaluează seriozitatea pericolelor care sunt identificate

La completarea unui studiu HAZOP, rezultatele posibile sunt:

- Îmbunătățiri ale procedurilor de întreținere/exploatare ale programelor de control și a instrucțiunilor care au fost deja implementate cu modificări ale echipamentului realizate cu costuri reduse
- Unele schimbări propuse pot aștepta rezultatul unei evaluări cantitative mai detaliate
- Recomandările majore se implementează treptat, pe măsura dobândirii de capital
- Membrii echipei vor avea atât o înțelegere mai bună a planului/procesului și o mai bună apreciere a hazardurilor și riscurilor potențiale decât dacă studiul nu ar fi fost realizat

HAZOP va produce beneficii în următoarele situații:

- În timpul proiectării sau montajului unei noi instalații sau proces sau modificări majore pentru una existentă
- Când apar hazarde pentru mediu sau calitate sau probleme de costuri asociate cu exploatarea
- După un incident major care implică incendiu, explozie, scăpări de substanțe toxice
- Pentru a justifica de ce un cod de practică sau cod industrial nu poate fi urmat

## Estimarea cantitativă a riscului în sisteme industriale

### Date generale

Studiile HAZOP identifică hazardurile, dar nu oferă informații cantitative asupra valorilor probabilităților de apariție a unor evenimente cu consecințe nedorite. Pentru producerea unui incident trebuie să se asocieze mai multe evenimente: avarii ale utilajelor și echipamentelor de proces, defecțiuni ale sistemelor de control, operare greșită. Astfel se pot defini secvențe ale înlănțuirilor de evenimente care duc la apariția incidentelor hazarduoase, de forma unor arbori logici: arborele evenimentelor (AE), respectiv arborele greșelilor (AG). Dintre etapele comune în analizele cantitative de risc, estimarea frecvenței (probabilității) se referă la trei componente majore: obținerea unor informații din situații asemănătoare petrecute anterior, întocmirea și analiza arborilor logici, analiza defecțiunilor rezultate din situații obișnuite. AE și AG sunt scheme logice care reprezintă desfășurarea evenimentelor posibile și compunerea lor. Primul pornește de la anumite evenimente nedorite și continuă prin prezentarea sub formă arborescentă de jos în sus evoluția tuturor situațiilor posibile, identificabile. Arborele defecțiunilor pornește de la o defecțiune și merge pe sistemul cauză-efect până la epuizarea tuturor posibilităților avute în vedere. În această etapă se utilizează experiența anterioară înglobată în baze de date cu mulțimi de scenarii posibile, cu valori ale probabilităților calculate în funcție de natura hazardului.

Rezumând, orice analiză HAZAN este alcătuită din trei etape:

1. Estimarea frecvenței repetării accidentului;
2. Estimarea consecințelor asupra: angajaților, comunității locale și mediului ambiant, instalației și profitului;
3. Compararea primelor două etape cu o țintă sau un criteriu pentru a decide dacă hazardurile sunt grave și trebuie luate măsuri pentru a reduce probabilitatea de producere a accidentului.

Metodele utilizate pentru etapa unu sunt probabilistice. Se estimează cât de des se poate întâmpla, în medie, un incident și când nu se poate întâmpla.

Metodele utilizate în etapa a doua sunt parțial probabilistice, parțial deterministice. De exemplu, în cazul unei scurgeri de gaz inflamabil, se poate estima numai probabilitatea că acesta se va aprinde. Dacă aceasta se întâmplă se poate estima căldura radiată și modul în care aceasta se va atenua cu distanța (deterministic). Dacă o persoană este expusă radiațiilor calorice se poate estima probabilitatea de deces sau gradul de vătămare. La valori ridicate ale radiațiilor decesul este sigur și estimarea este deterministă (întotdeauna se va produce decesul). La nivele scăzute, probabilitatea de vătămare va crește cu creșterea dozei de radiații.

### Utilizarea arborilor logici

#### Analiza pe baza arborelui greșelilor (*Fault Tree Analysis*)

Avariile sau defecțiunile se împart în trei clase:



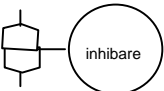

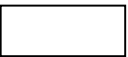


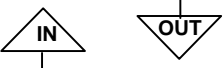
1. *defecțiuni primare*, care apar în condițiile de lucru pentru care echipamentul a fost proiectat;
2. *defecțiuni secundare*, care apar în situații pentru care sistemul nu a fost proiectat;
3. *defecțiuni de comandă*, în care componentul lucrează corect, dar la locul sau momentul nepotrivit

Etapele construirii arborelui greșelilor sunt:

- definirea unui eveniment de vârf (top event), ca de exemplu scăparea de amoniac gazos din vasul de stocare numărul....depozitul....instalația...în timpul funcționării normale;
- definirea limitelor sistemului supus analizei;
- construirea arborelui cu ajutorul următoarelor reguli:
  - \* în interiorul conturului semnelor pentru evenimente se trece descrierea lor (tabelul 2), dar nu se leagă direct două conexiuni între ele (se vor descrie evenimentele după fiecare conexiune;
  - \* construcția arborelui greșelilor se realizează pe nivele pornind de sus, de la evenimentul de vârf
  - \* un nivel este constituit dintr-un șir de conexiuni aflat la aceeași distanță de evenimentul de vârf și de evenimentele imediat anterioare conexiunilor respective
  - \* nu se trece la nivelul imediat următor până când, cel aflat în lucru nu este epuizat.

**Tabelul 2.**

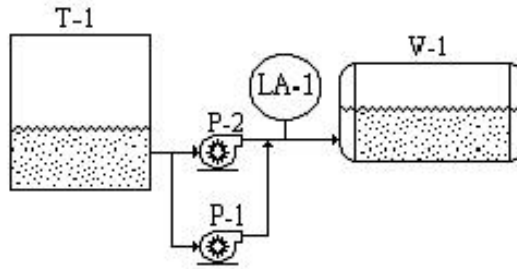
Semne convenționale adoptate în construcția arborelui greșelilor

	Poartă ȘI	Conexiune la care evenimentul efect are loc dacă se desfășoară unul sau mai multe din evenimentele cauză ce constituie intrări
	Poartă SAU	Conexiune la care evenimentul efect are loc numai dacă toate evenimentele cauză au loc
	Condiții de inhibare	Evenimentul de ieșire are loc numai atunci când se satisface condiția de inhibare scrisă în interiorul etichetei
	Eveniment de BAZĂ	De la ele pornesc secvențele cauză-efect cărora li se pot atribui probabilități de apariție
	Eveniment INTERMEDIAR	Conform denumirii
	Eveniment NEDEZVOLTAT	Depinde de alte evenimente anterioare neluate în considerare în cadrul analizei și nu i se poate atribui o valoare precisă pentru probabilitatea de apariție
	Eveniment EXTERN	Condiție sau eveniment care apare la granița sistemului
	Simboluri de transfer	Pentru cazul când schema este împărțită pe mai multe pagini; în interior se notează un simbol de corespondență

- soluționarea arborelui greșelilor presupune găsirea secvențelor minimale. O secvență reprezintă un șir de evenimente care conduc la un accident. Secvențele minimale sunt succesiuni de acest tip care conțin un număr minim de evenimente.

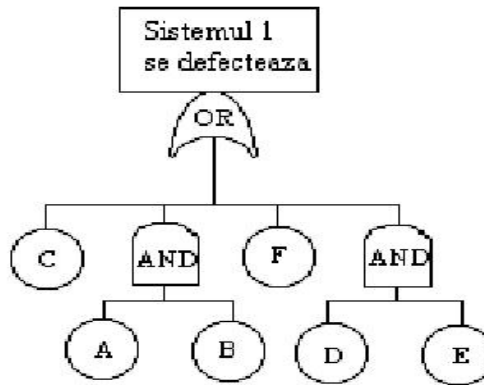
**Exemplu:**

Acidul sulfuric este pompat dintr-un vas-depozit la presiune atmosferică, T1, într-un vas de proces presurizat, V1 (fig. 15). Această operație poate fi realizată folosind două pompe: P1 este acționată de un motor Diesel; P2 are un motor electric. În timpul funcționării normale sistemul utilizează pompa P2. În eventualitatea unei urgențe, pompa P1 poate intra în lucru. Dacă P2 se defectează, operatorul are 4 minute la dispoziție pentru a comuta P1 înainte să se producă un pericol potențial. Există o alarmă de debit minim, LA1, pe vasul de proces V1.



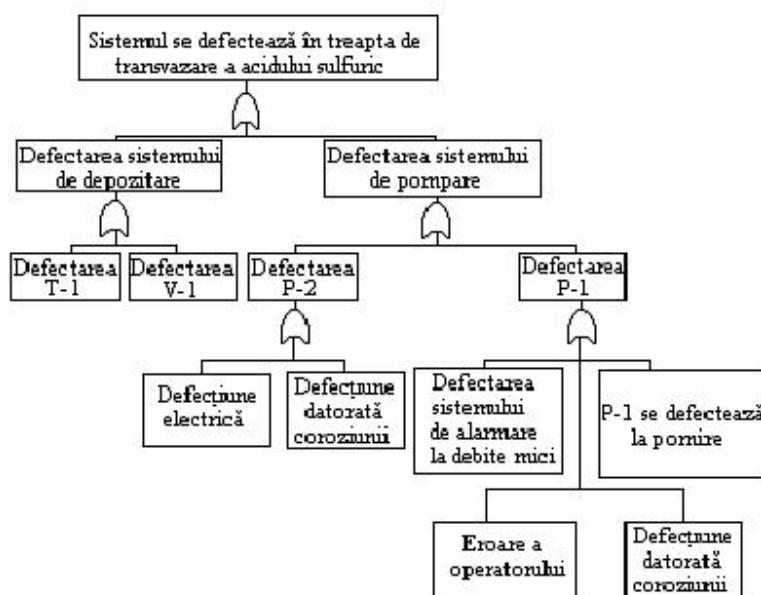
**Fig. 15.** Analiza pericolului (hazardului) la transportul unui lichid periculos

Prima treaptă în analiza cu arborele greșelilor (într-o manieră de analiză deductivă) este definirea clară a evenimentului major. În fig. 16. evenimentul major este "defectarea sistemului".



**Fig. 16.** Analiză de risc folosind arborele defecțiunilor

Există două porți (variante) **ȘI** (AND), **SAU** (OR) și A-F evenimente de bază. În figura 17, evenimentul major devine "sistemul nu mai transportă acid sulfuric" de la T1 la V1 pentru o perioadă neîntreruptă mai mare sau egală cu 4 minute, din cauza defectării echipamentului sau a erorii operatorului.



**Fig. 17.** Analiză folosind arborele defecțiunilor la curgerea unui fluid

Următoarea treaptă este conceperea a două sau mai multe evenimente intermediare, conectate la evenimentul major într-o manieră logică. Două evenimente intermediare, fie defectarea sistemului de depozitare sau defectarea sistemului de pompare, pot rezulta în evenimentul major, printr-o poartă OR. Defectarea sistemului de depozitare se poate produce dacă se defectează fie T1, fie V1. Acesta ar fi evenimentul de bază printr-o poartă OR. Defectarea sistemului de pompare se poate produce dacă se defectează ambele pompe, P1 și P2. Acestea sunt evenimentele de bază într-o poartă AND. Defectarea lui P2 ar putea fi cauzată de defectarea motorului electric sau coroziunea pompei, care sunt evenimente de bază printr-o poartă OR. Cauzele defectării lui P1 ar putea fi: eroarea operatorului, P1 se defectează la pornire, se defectează alarma de debit minim, coroziunea pompei. Acestea sunt evenimente de bază într-o poartă OR (figura 17).

Metoda de analiză folosind arborele defecțiunilor are deci următoarele etape:

- definirea evenimentului major;
- definirea evenimentelor intermediare;
- identificarea tuturor porților și a evenimentelor de bază;
- rezolvarea tuturor conflictelor.

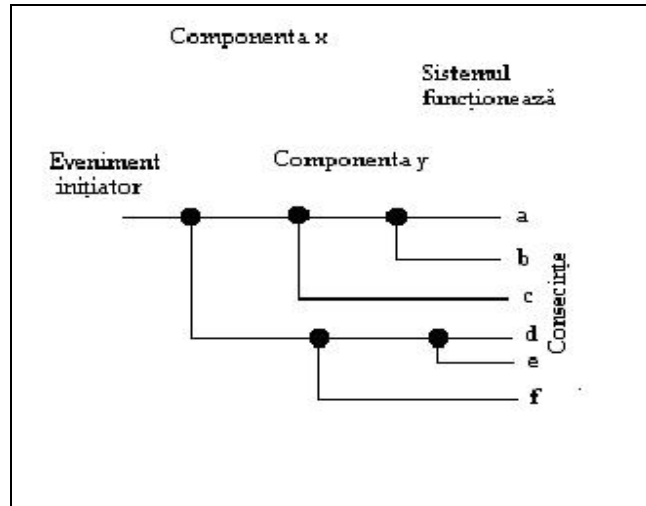
### **Analiza folosind arborele evenimentelor (*Event Tree Analysis, ETA*)**

ETA este un model logic inductiv care identifică rezultatele posibile dintr-un eveniment inițiator dat. Un eveniment inițiator va fi, în mod obișnuit, la originea unui accident sau incident. ETA consideră răspunsurile operatorilor și ale sistemelor de siguranță la un eveniment inițiator. Această tehnică este cea mai potrivită pentru analiza proceselor complexe care implică câteva sisteme de siguranță sau proceduri de urgență.

Prima treaptă în conceperea unui arbore al evenimentelor este definirea unui eveniment inițiator, care poate conduce la defectarea sistemului: *defectarea echipamentului, eroare umană, defecțiuni în sistemul de utilități, dezastre naturale* (fig. 18). Următoarea etapă este identificarea acțiunilor intermediare pentru a elimina sau reduce efectele evenimentului inițiator. Arborele evenimentelor cuprinde două ramuri pentru fiecare eveniment intermediar, una pentru



o exploatare de succes și alta pentru o exploatare cu deficiențe a sistemului. Partea superioară reprezintă succesul, iar partea inferioară eșecul. Într-un exemplu simplificat, evenimentul inițiator devine defectarea lui P2. Există câteva etape de răspuns la evenimentul inițiator, care includ alarma de debit minim, răspunsul operatorului și defectarea lui P1.

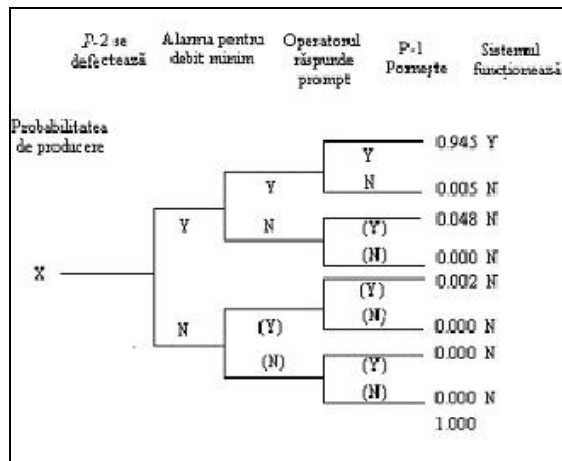


**Fig. 18.** Analiza folosind arborele evenimentelor

Evaluarea folosind arborele de analiză a evenimentelor (fig. 19) cuprinde următoarele etape :

1. P2 se defectează și devine evenimentul inițiator. Probabilitatea acestui eveniment a fost definită ca fiind 1.
2. Alarma de debit minim la vasul V1 poate lucra sau se poate defecta. Dacă ea lucrează, se parcurge ramura superioară. Dacă ea nu lucrează, se parcurge ramura inferioară. Alarma are o probabilitate de succes de 0.998.
3. Operatorul fie răspunde, fie nu răspunde la alarmă. Probabilitatea de a răspunde este 0.952.
4. Ultimul răspuns este că operatorul pune în funcțiune pompa P1. Probabilitatea acestui eveniment este 0.995.

Pe baza fig. 5, probabilitatea oricărei ramuri a arborelui evenimentelor de a se produce este dată de produsul probabilităților evenimentului pe acea ramură. Ramura superioară are o probabilitate de succes de  $1 * 0.998 * 0.952 * 0.995 = 0.945$ . Valoarea totală aditivă pentru probabilitățile tuturor ramurilor este  $0.945 + 0.005 + 0.048 + 0.002 = 1$ .



**Fig. 19.** Analiza folosind arborele evenimentelor pentru exemplul transportului fluidului

Analiza folosind arborele evenimentelor este cea mai bună pentru analiza evenimentelor inițiatore care pot conduce la efectul final al evenimentelor. Fiecare ramură a arborelui evenimentelor reprezintă o secvență separată a relațiilor între funcțiile de siguranță pentru evenimentul inițiator.

Evaluarea riscului aplicând metoda *arborele evenimentelor* poate fi rezumată astfel:

- identificarea evenimentelor inițiatore care se pot materializa în accidente;
- identificarea funcțiilor de siguranță pentru a diminua evenimentul inițiator;
- construirea arborelui evenimentelor;
- descrierea rezultatelor unui accident și a probabilităților acestuia.

Pentru același sistem și aceleași ipoteze privind probabilitățile se pot obține rezultate identice prin ambele metode. Arborele defectiunilor este mai cuprinzător decât arborele evenimentelor, deoarece acesta se bazează pe un singur eveniment legat de defectiune. Numeroși oameni sunt tentați să gândească logic despre sistemele de siguranță, utilizând abordarea prin arborele evenimentelor. Arborele greșelilor are pentru numeroși oameni o abordare logică deficitară. Combinarea ambelor metode este mai de durată, dar ambele abordări au avantaje.