

# FAULT TREE ANALYSIS – RISK ANALYSIS METHOD FOR NAVAL INSTALATIONS

**Gabriel OANCEA, Ovidiu RADU**

Naval Forces Research Center

**Abstract:** *One of the most frequently used techniques in risk analyses is fault tree modelling. A fault tree analysis(FTA) can be used to identify the subsystems that are most critical for the operation of a given system, or to analyse how undesirable events occur. This paper describes the design of an fault tree analysis with top event defined as 'loss of propulsion for a ship' followed by quantitative and qualitative approach using algorithms and methods shown in the paper (as example, the algorithm called MOCUS –Method of Obtaining Cut Sets or „Vessley-Fussell” measure of importance that can be applied on fault trees).*

**Keywords:** risk analysis, modelling, fault tree

Una din tehnicile cele mai frecvent utilizate în analizele de risc este analiza arborelui defecțiunilor - AAD. O astfel de analiză poate fi folosită pentru a identifica subsistemele cele mai critice pentru funcționarea unui sistem dat sau pentru a analiza modul în care iau naștere și se produc evenimente nedorite.

În contextul general al analizelor, metoda AAD este utilizată pentru a analiza modul producerii evenimentelor nedorite precum și cauzele acestora. Prin folosirea unei scheme logice sunt vizualizate relațiile dintre cauzele evenimentelor (de exemplu defectarea unei anumite componente a unui motor). Metoda presupune moduri operațional binare, ceea ce înseamnă că un eveniment fie se manifestă, fie nu se manifestă (de exemplu, o alarmă de avarie este dată sau nu).

Schema logică utilizată într-o AAD constă dintr-un set de simboluri de intrare care descriu relațiile dintre cauze și simbolurile care caracterizează aceste cauze. Evenimentul nedorit luat ca țintă pentru analiză este menționat ca eveniment din vârf - evenimentul de top arborelui defecțiunilor. Descrierea evenimentului de top ar trebui să dea răspunsuri la ceea ce tip de eveniment este, când și unde se produce.

Producerea evenimentului de top este întotdeauna dependentă de două sau mai multe condiții sau defecțiuni la un nivel inferior. Principala sarcină în

abordarea Analizei Arborelui Defecțiunilor este de a defini în mod sistematic structura, condițiile sau cauzele care duc direct la evenimentul de top. Aceste evenimente ar trebui să fie definite în așa fel încât numai un număr limitat de cauze să ducă la evenimentul de top. Unele opinii din literatura de specialitate recomandă definirea numai a două cauze la nivelul inferior la un moment dat dar, pentru unele sistem complex de defectare, acest fapt lucru nu poate fi considerat realist. Cauzele care conduc direct la evenimentul de top sunt al doilea nivel al arborelui defecțiunilor.

În cazul în care evenimentele sunt definite și structurate, următoarea sarcină este de a evalua relația logică dintre cauze. În general, fie evenimentul de top depinde de apariția simultană a acestor cauze pe al doilea nivel sau numai una din cauze poate duce la evenimentul de top. În primul caz este folosită o intrare de tip ȘI iar în cel de-al doilea caz este utilizată o intrare de tip SAU. Această procedură se repetă pentru a stabili relațiile logice dintre cauze pe al treilea nivel al AD și așa mai departe. Atunci când cauzele sunt descrise la un nivel de detaliere care asigură validitatea datelor privind defecțiunea, Arborele Defecțiunilor se consideră finalizat și pregătit pentru analiza cantitativă.

Un grup de evenimente de bază în Arborele Defecțiunilor care declanșează evenimentul de top prin producerea lor simultan se numește în literatura de specialitate “cutset” al Arborelui.

Pentru a stabili cutset-urile se poate aplica un algoritm numit MOCUS - Method of Obtaining Cut Sets ( Metodă de obținere a cutset-urilor). Algoritmul MOCUS cuprinde patru etape: **a.** luarea în considerare a evenimentului de top; **b.** înlocuirea evenimentului cu evenimente de pe al doilea nivel în funcție de următoarele criterii: în cazul în care evenimentele de pe nivelul inferior sunt conectate printr-o intrare SAU, sunt scrise în rânduri separate; dacă acestea sunt conectate printr-o intrare ȘI, sunt scrise în coloane separate; **c.** Se realizează succesiv pasul 2 pentru toate evenimentele care nu sunt evenimente de bază; **d.** Când toate evenimentele sunt evenimente de bază, evenimentele din fiecare rând constituie un cutset.

Analiza cantitativă a Arborelui Defecțiunilor folosește probabilitatea de defectare  $q_i$  a evenimentelor de bază și intrările arborelui pentru a calcula probabilitatea evenimentului de top  $Q_0$ . Pentru evenimente de bază combinate printr-o intrare de tip SAU este utilizată structura serie. Pentru evenimente combinate printr-o intrare de tip ȘI este utilizată structura paralel (dacă se utilizează aceste ecuații menționăm că fiabilitatea  $p_i = 1 - q_i$ , unde  $q_i$  este probabilitatea defectării).

Figura 1 ilustrează structurile serie și paralele folosind diagrame bloc.

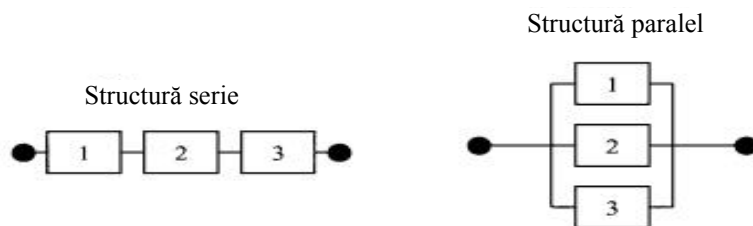


Figura 1 Structuri generale de sistem

Structura serie:  $P_{SF} = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i$

Structura paralelă:  $P_{SF} = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot \dots \cdot (1 - P_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$

$P_{SF}$  = fiabilitatea structurii,  $P_i$  = fiabilitatea structurii  $i$ . Fiabilitatea  $P$  este definită ca probabilitatea de supraviețuire (a unei componente sau sistem) și este dependentă de timpul de operare și condițiile de exploatare. Probabilitatea de cedare  $Q$  este egală cu probabilitatea de non-supraviețuire ( $1 - P$ ).

## 2. Abordare cantitativă-evaluare

O măsură uzuală a importanței aplicată la Arborele Defecțiunilor este măsura de importanță Vessley-Fussell,  $I^{VF}$  [1]. Aceasta este probabilitatea ca cel puțin un cutset minimal ce conține evenimentul pe bază  $i$  este defect la momentul  $t$ , astfel că evenimentul de top este declanșat în momentul  $t$ . Acest lucru poate fi calculat prin folosirea următoarei ecuații:

$$I^{VF}_{(i/t)} = \frac{Q_{Ki}(t)}{Q_0(t)} ; I^{VF}(i/t) = P \text{ (Cel puțin un cutset ce conține}$$

evenimentul pe bază  $i$  este defect la momentul  $t$  | Sistemul cedează la timpul  $t$ );  $Q_{Ki}(t)$  este probabilitatea ca un cutset minimal ce conține cauza de bază  $i$  este defect la momentul  $t$  și  $Q_0$  este probabilitatea de apariție a evenimentului de top.

Cele  $m$  cutset-uri minime în care cauza de bază  $i$  este prezentă nu sunt independente deoarece aceleași cauze de bază pot fi prezente în mai mult de un cutset. Cu toate acestea, presupunând că cele  $m$  cutset-uri sunt independente, limita superioară a  $Q_{Ki}$  poate fi estimată folosind  $I^{VF}(i/t)$  de mai sus. Această ipoteză este implementată în următoarea ecuație:

$$I^{VF}_{(i/t)} \approx \frac{1 - \prod_{j=1}^m (1 - Q_{Kij}(t))}{Q_0(t)}$$

unde  $m$  = numărul de cutset-uri minimale în care cauza de bază  $i$  este prezentă.

## 3. Exemplu de aplicare a metodei Arborelui defectelor pentru pierderea propulsiei unei nave

Se va construi un Arbore al Defecțiunilor pentru cazul în care evenimentul de top este pierderea de puterii de propulsie pentru navă urmat de o

analiza cantitativă și calitativă pentru acesta folosind algoritmi și metodele descrise în continuare. Se presupune că informațiile prezentate în Tabelul 1 sunt în mod obișnuit disponibile și cunoscute [2].

Defecțiunea	Descrierea defecțiunii	Fiabilitate - Probabilitatea $p$	Defectare - Probabilitatea $q$
F1	Lipsă alimentare combustibil	0.730	0.270
F2	Avarierea arborelui cotit	0.973	0.027
F3	Pistoane supraîncălzite	0.984	0.016
F4	Cuplaj defect	0.948	0.052
F5	Reductor defect	0.764	0.236
F6	Avarierea liniei de axe	0.971	0.029
F7	Defectarea elicei cu pas reglabil - EPR	0.813	0.187

**Tabelul 1** Date privind defecțiunile pentru o perioadă de navigație de un an (336 zile)

### 3.1 Abordarea Calitativă: Construirea Arborelui Defectelor

Evenimentul de top este deja definit ca "pierderea propulsiei navei". Există trei evenimente independente, care pot rezulta în evenimentul de top. Acestea sunt "pierderea transmisiei puterii de propulsie" în linia de arbori sau reductor, "pierderea generării energiei de propulsie" de la motoare, și "pierderea consumului puterii de propulsie" din cauza unor defecțiuni la elice. Doar unul dintre aceste evenimente trebuie să se producă pentru a declanșa evenimentul de top. Prin urmare, aceste trei evenimente trebuie să fie combinate printr-o intrare de tip SAU. Arborele Defecțiunilor poate fi structurat după cum se arată în Figura 2.

Evenimentul "pierderea transmisiei puterii de propulsie" poate fi cauzat de o defecțiune a reductorului și / sau a liniei de axe și prin urmare aceste defecțiuni trebuie combinate prin utilizarea unei intrări de tip SAU. Evenimentul "pierderea consumului puterii de propulsie" include doar cazul defectării elicei cu pas reglabil (EPR). În ceea ce privește cazul de "pierderea generării energiei de propulsie", atât motoarele tribord cât și tribord trebuie să cedeze în a transmite puterea către reductor. Prin urmare, trebuie să fie folosită o intrare de tip ȘI pentru aceste două evenimente. Există două modalități pentru ca fiecare motor să nu mai poată transmite putere către reductor: defectarea cuplajului și respectiv cedarea motorului în sine.

O intrare de tip SAU trebuie să fie utilizată pentru aceste evenimente deoarece unul este suficient pentru ca motorul să nu mai reușească transmiterea puterii către reductor. Evenimentele legate de defectarea motoarelor principale (atât tribord cât și babord) arătate în Figura 2 necesită tratarea în detaliu. cauzele evenimentelor de bază ale defectării 1, 2, 3 (vezi Tabelul 1), sunt toate grupate în evenimentul "defectarea motorului principal", acestea trebuind să fie combinate prin utilizarea unei intrări de tip SAU atâta timp cât fie și numai una din cauze este suficientă pentru ca motorul principal să cedeze. Principalele

moduri de defecțiuni la motor pot fi aranjate / modelate într-un Arbore al Defecțiunilor așa cum se arată în Figura 2.

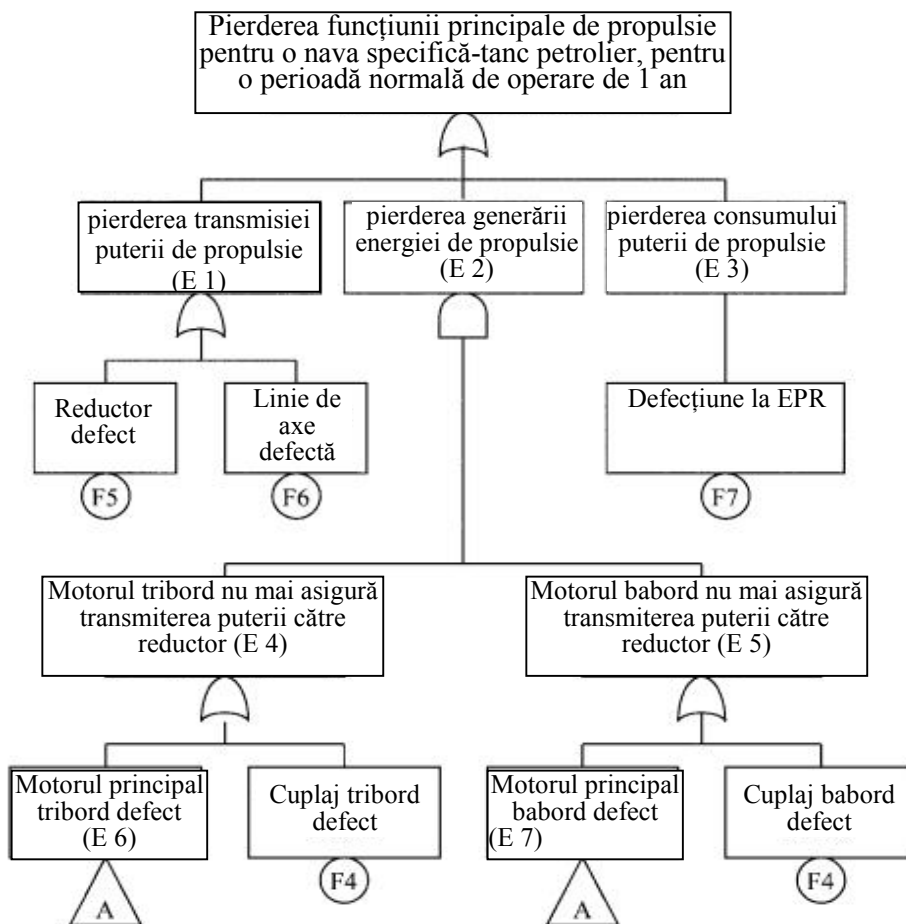


Figura 2 Arborele defecțiunilor pentru evenimentul de top “Pierdere propulsiei unei nave de tip Tanc petrolier”

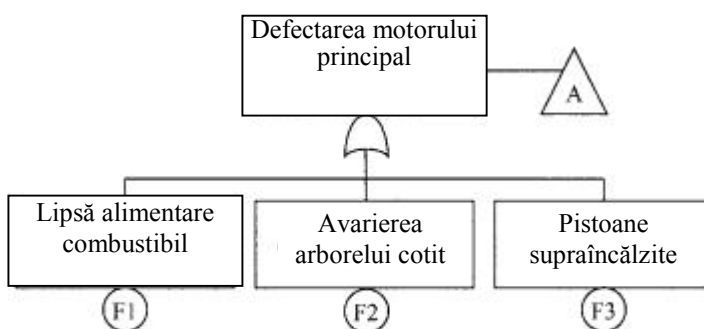


Figura 3 Moduri defectare ale motorului principal

### 3.2 Abordarea calitativă: stabilirea cutset-urilor minimale

Se aplica algoritmul MOCUS (s-a notat cu: subscript  $s$  = Tribord, subscript  $p$  = babord):

Pasul 1: “Pierderea funcției principale de propulsie pentru o navă specifică - tanc petrolier, într-o perioadă normală de operare de 1 an”

Pasul 2:

E 1
E 2
E 3

Pasul 3.1: - pentru evenimentul "pierderea transmisiei puterii de propulsie" (E 1 în structura arborelui):

F 5
F 6
E 2
E 3

Pasul 3.2: -pentru evenimentul "pierderea generării energiei de propulsie" (E 2 în structura arborelui):

F 5	
F 6	
E 4	E 5
E 3	

Pasul 3.3: - pentru evenimentul "motorul principal tribord nu mai transmite putere la reductor" (E 4 în structura AD):

F 5	
F 6	
As	E 5
F4s	E 5
E 3	

Pasul 3.4: - pentru evenimentul "defectarea motorul principal tribord" (E 6 în structura arborelui; vezi Figura 8.12 și 8.13):

F 5	
F 6	
F 1s	E 5
F 2 s	E 5
F 3 s	E 5
F 4 s	E 5
E 3	

Pasul 3.5: - pentru evenimentul "defectarea motorul principal babord" (E 7 în structura arborelui; vezi Figura 8.12 și 8.13):

K 1	F 5	
K 2	F 6	
K 3	F 1 s	F 1p
K 4	F 2 s	F 1p
K 5	F 3 s	F 1p
K 6	F 4 s	F 1p
K 7	F 1 s	F 2p
K 8	F 2 s	F 2p
K 9	F 3 s	F 2p
K 10	F 4 s	F 2p
K 11	F 1 s	F 3p
K 12	F 2 s	F 3p
K 13	F 3 s	F 3p
K 14	F 4 s	F 3p
K 15	F 1 s	F 4p
K 16	F 2 s	F 4p
K 17	F 3 s	F 4p
K 18	F 4 s	F 4p
K 19	F 7	

Pasul 4:

Există 19 combinații de cauze de bază posibile (sau disfuncționalități ale evenimentelor de bază) pentru sistemul de propulsie (fiecare rând). Există de cele mai multe ori două cauze de bază în fiecare cutset. Este preferabil să avem pe cât posibil cât mai multe cauze de bază în fiecare cutset. Cutset-urile K1, K2 și K19 includ doar o cauza de bază. Prin urmare, evenimentul de top se produce atunci când apare una din aceste cauze de bază. Așadar, ar fi preferabil să se implementeze redundanța sau alte măsuri de îmbunătățire a fiabilității pentru aceste cutset-uri. Spre exemplu, ar putea fi o soluție utilizarea a două sisteme de propulsie (elice) independente pentru asigurarea redundanței sistemului și a reduce astfel riscul de apariție eveniment de top dar acest lucru este însă greu practicabil.

### 3.3 Abordarea cantitativă: Calcule în Arborele Defecțiunilor

Există mai multe calcule ce pot fi efectuate. Probabilitatea de apariție a evenimentului de top a  $Q_0$  prezintă un interes special. Probabilitățile pentru fiecare cutset sunt de asemenea importante. Ecuțiile pentru structurile serie sunt folosite pentru a calcula intrările SAU iar cele pentru structurile paralele sunt utilizate pentru a calcula intrările de tip ȘI (reamintim că fiabilitatea  $p_i = 1 - q_i$ , unde  $q_i$  este probabilitatea defectării). Date privind defecțiunile sunt prezentate în Tabelul 1.

Așa cum se arată în Tabelul 3, probabilitatea pentru evenimentul de top de "pierdere a funcției principale de propulsie pentru navă specializată pentru un an de funcționare normală" este 0.465. Acest lucru înseamnă că există șansa de 46,5% că această defecțiune să se producă, ceea ce este de nedorit și potențial foarte periculos, în cazul în care evenimentul va avea loc.

### 3.4 Abordarea cantitativă: evaluarea importanței cauzei de bază

Pentru a evalua importanța diferitelor cauze de bază, probabilitatea de defectare a cutset-urilor este calculată așa cum este arătat în Tabelul 4, folosind datele privind probabilitatea de defectare prezentate în Tabelul 1.

În conformitate cu măsura importanței componenteii Vessley-Fussell, rangul importanței cauzelor de bază (sau defecțiunilor) este stabilit după cum se arată în Tabelul 5.

$Q_{E7} = 1 - P_{E7} = 1 - [p_{F1} \cdot p_{F2} \cdot p_{F3}] = 1 - [(1-q_{F1}) \cdot (1-q_{F2}) \cdot (1-q_{F3})]$	0,301
$Q_{E6} = 1 - [(1-q_{F1}) \cdot (1-q_{F2}) \cdot (1-q_{F3})]$	0,301
$Q_{E5} = 1 - [(1-Q_{E7}) \cdot (1-q_{F4})]$	0,337
$Q_{E4} = 1 - [(1-Q_{E7}) \cdot (1-q_{F4})]$	0,337
$Q_{E2} = 1 - P_{E2} = 1 - [1 - (1 - P_{E4}) \cdot (1 - P_{E5})] = Q_{E5} \cdot Q_{E4}$	0,118
$Q_{E3} = q_{F7}$	0,187
$Q_{E1} = 1 - [(1-q_{F5}) \cdot (1-q_{F6})]$	0,258
$Q_{E0} = 1 - [(1-Q_{E1}) \cdot (1-Q_{E2}) \cdot (1-Q_{E3})]$	0,465

**Tabel 3** Calculul probabilității evenimentului de top  $Q_0$

K1	F5		$Q_{K1} = 0,236$	$1 - Q_{K1} = 0,764$
K2	F6		$Q_{K2} = 0,029$	$1 - Q_{K2} = 0,971$
K3	F1s	F1p	$Q_{K3} = 0,073$	$1 - Q_{K3} = 0,927$
K4	F2s	F1p	$Q_{K4} = 0,0073$	$1 - Q_{K4} = 0,9927$
K5	F3s	F1p	$Q_{K5} = 0,0043$	$1 - Q_{K5} = 0,9957$
K6	F4s	F1p	$Q_{K6} = 0,014$	$1 - Q_{K6} = 0,986$
K7	F1s	F2p	$Q_{K7} = 0,0073$	$1 - Q_{K7} = 0,9927$
K8	F2s	F2p	$Q_{K8} = 0,00073$	$1 - Q_{K8} = 0,99927$
K9	F3s	F2p	$Q_{K9} = 0,00043$	$1 - Q_{K9} = 0,99957$
K10	F4s	F2p	$Q_{K10} = 0,0014$	$1 - Q_{K10} = 0,9986$
K11	F1s	F3p	$Q_{K11} = 0,0043$	$1 - Q_{K11} = 0,9957$
K12	F2s	F3p	$Q_{K12} = 0,00043$	$1 - Q_{K12} = 0,99957$
K13	F3s	F3p	$Q_{K13} = 0,00026$	$1 - Q_{K13} = 0,99974$

K14	F4s	F3p	$Q_{K14} = 0,00083$	$1 - Q_{K14} = 0,99917$
K15	F1s	F4p	$Q_{K15} = 0,014$	$1 - Q_{K15} = 0,986$
K16	F2s	F4p	$Q_{K16} = 0,0014$	$1 - Q_{K16} = 0,9986$
K17	F3s	F4p	$Q_{K17} = 0,00083$	$1 - Q_{K17} = 0,99917$
K18	F4s	F4p	$Q_{K18} = 0,056$	$1 - Q_{K18} = 0,944$
K19	F4s	F4p	$Q_{K19} = 0,187$	$1 - Q_{K19} = 0,813$

**Tabel 4 Calculul probabilității defectării cutset-urilor**

	Cutset-uri relevante	$1 - \prod (1 - Q_{Ki})$	$I^{VF}$	rang
F1	K3, K7, K11, K15	0,0966	0,208	3
F2	K4, K8, K12, K16	0,0098	0,021	6
F3	K5, K9, K13, K17	0,0061	0,013	7
F4	K6, K10, K14, K18	0,071	0,150	4
F5	K1	0,236	0,507	1
F6	K2	0,029	0,062	5
F7	K19	0,187	0,402	2

**Tabel 5 Importanța rangurilor bazată pe măsura importanței componenteii Vesslev-Fussell**

Rangul componentelor este rangul “reparației”. Dacă propulsia este pierdută, cea mai probabilă defecțiune este legată de reductor, așa cum este dată în cauza de bază/ eveniment disfuncțional F 5, și așa mai departe.

## NOTE BIBLIOGRAFICE

[1] Svein Kristiansen, *MaritimeTransportation Safety Management and Risk Analysis*, ed. Butterworth-Heinemann, 2005, pag 233.

[2] Svein Kristiansen, *MaritimeTransportation Safety Management and Risk Analysis*, ed. Butterworth-Heinemann, 2005, pag 234.