ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

Π.Μ.Σ. «Διοίκηση Κοινοτομίας, Τεχνολογίας & Επιχειρήσεων»

ΔΛΠΕ-5 Ασφάλεια Συστημάτων & Διαχείριση Κινδύνων

Δρ Παναγιώτης Κ. Μαρχαβίλας

Διπλ. Ηλεκ/γος Μηχ/κός & Μηχ/κός Η/Υ (Dipl., MSc., PhD[2)])

4η Διάλεξη, Ξάνθη 2019

4.1

Η Τεχνική του Δένδρου Αστοχιών

(*Fault-Tree Analysis Technique*)

4.1.1 Δένδρα Αστοχιών (Fault Trees)

Η Ανάλυση Δέντρου Αστοχιών **FTA (Fault Tree Analysis)** αποτελεί:

- Μια **μέθοδο** μελέτης **ανεπιθύμητων γεγονότων**, στην οποία ένα γεγονός αναλύεται σε επιμέρους χαμηλότερου επιπέδου γεγονότα, με χρήση της **Λογικής Boolean**.

- Πρόκειται για μια **συμπερασματική** μέθοδο, που ξεκινά από ένα **γεγονός γενικό** και εξειδικεύει σε ένα γεγονός πιο **ειδικό**

- Είναι μία ανάλυση **βλαβών/αποτυχιών**, στην οποία αναλύεται μία **ανεπιθύμητη** κατάσταση ενός συστήματος με τη χρήση της λογικής Boolean, συνδυάζοντας μια σειρά **περιστατικών** χαμηλότερου επιπέδου.

Η Ανάλυση Δέντρου Αστοχιών **FTA (Fault Tree Analysis)** :

-Είναι μία **λογική αναπαράσταση** της σχέσης των βασικών ή πρωταρχικών περιστατικών που μπορούν να προκαλέσουν την **εμφάνιση** ενός ανεπιθύμητου **περιστατικού**, λεγόμενου ως "**κορυφαίο περιστατικό**"

- **Απεικονίζεται** χρησιμοποιώντας συνήθως μία **δενδροειδή** δομή με **λογικές** πύλες **"ΚΑΙ (AND)"** και **"Ή (OR)"**

-Σε μία πύλη "**AND**", το **γεγονός εξόδου** συμβαίνει όταν **συμβούν όλα** τα γεγονότα εισόδου

-Σε μία πύλη "**OR**", αρκεί να συμβεί **μία μόνο είσοδος** για να συμβεί **η αντίστοιχη έξοδος** (Vesely et al., 1981, Hong et al., 2009).

Αποτυχία Συστήματος ή Ατύχημα (Γεγονός Κορυφής)

Το δένδρο λαθών περιέχει σειρές γεγονότων που οδηγούν στην αποτυχία ή το ατύχημα

Οι σειρές των γεγονότων χτίζονται με πύλες **OR** και **AND** ή άλλες λογικές πύλες

Τα γεγονότα πάνω από τις πύλες και τα γεγονότα, που έχουν μια πιο βασική αιτία, απεικονίζονται με τετράγωνα σχήματα.

Οι σειρές στη συνέχεια οδηγούν τελικά σε μια βασική αιτία για την οποία υπάρχει διαθέσιμο ένα ποσοστό αποτυχίας. Οι βασικές αιτίες απεικονίζονται με κυκλικά σχήματα και χαρακτηρίζουν το όριο ανάλυσης του δένδρου λαθών

Δομή των δέντρων σφαλμάτων και διαδοχή γεγονότων

Ιεραρχία στα γεγονότα των Fault Trees

Τα γεγονότα του **δέντρου σφαλμάτων** διέπονται από μια συγκεκριμένη ιεραρχία:

Κορυφαίο γεγονός : Το γεγονός που τοποθετείται στην κορυφή του δέντρου και η ανάλυσή του οδηγεί στη δημιουργία του υπόλοιπου δέντρου

Πρωτεύον γεγονός : Είναι το πρωτεύων και το βασικό λάθος, στο οποίο οφείλεται η δυσλειτουργία του στοιχείου

Δευτερεύον γεγονός : είναι ένα ενδιαφέρον λάθος ή επίδραση, που προέρχεται από ένα άλλο στοιχείο η συσκευή, ή κάποια εξωτερική κατάσταση.

Βασικό γεγονός : είναι ένα γεγονός (λάθος ή όχι) που συμβαίνει στο χαμηλότερο επίπεδο ανάλυσης (δηλ. δεν αναλύεται σε απλούστερα)

Σύμβολα των δέντρων αστοχιών

Γεγονός κορυφής		Το αρχικό ανεπιθύμητο γεγονός ενδιαφέρον για την ανάλυση του δέντρου σφάλματος
Βασικό γεγονός ή γεγονός βάσης		Ένα γεγονός που δεν απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη
Μη ανεπτυγμένο γεγονός		Ένα άλλο γεγονός που δεν είναι αναπτυγμένο περαιτέρω, είτε επειδή είναι χαμηλής συνέπειας είτε επειδή η σχετική πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη
Ενδιάμεσο γεγονός		Ένα γεγονός ελαττωμάτων που είναι αναπτυγμένο περαιτέρω
Πύλη Ή (OR)		Η πύλη Ή δείχνει ότι η έξοδος του γεγονότος πραγματοποιείται μόνο εάν ένα ή περισσότερα από τα γεγονότα εισόδου πραγματοποιούνται. Μπορεί να υπάρξει οποιοσδήποτε αριθμός εισόδων σε μια πύλη Ή
Πύλη ΚΑΙ (AND)		Η πύλη ΚΑΙ χρησιμοποιείται για να δείξει ότι το ατυχές γεγονός εξόδου εμφανίζεται εάν, και μόνο εάν, όλα τα γεγονότα εισαγωγής εμφανίζονται. Μπορεί να υπάρξει οποιοσδήποτε αριθμός εισόδων σε μια πύλη ΚΑΙ

Αξιώματα της Άλγεβρας Boole

[A1]	$ab = ba$	Commutative Law
[A2]	$a + b = b + a$	
[A3]	$(a + b) + c = a + (b + c) = a + b + c$	Associative Law
[A4]	$(ab)c = a(bc) = abc$	
[A5]	$a(b+c) = ab + ac$	Distributive Law

Θεωρήματα της Άλγεβρας Boole

[T1] $a + 0 = a$

[T2] $a + 1 = 1$

[T3] $a \bullet 0 = 0$

[T4] $a \bullet 1 = a$

[T5] $a \bullet a = a$ ✓

[T6] $a + a = a$ ✓ } Idempotent Law

[T7] $a \bullet \bar{a} = 0$

[T8] $a + \bar{a} = 1$

[T9] $a + ab = a$ ✓

[T10] $a(a + b) = a$ ✓ } Law of Absorption

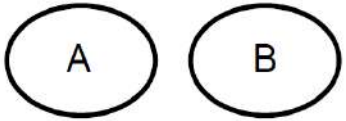
[T11] $a + \bar{a}b = a + b$

where $\bar{a}$ = not a

Πιθανότητα (Probability)

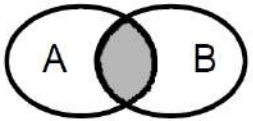
Union

For two events A and B, the union is the event {A or B} that contains all the outcomes in A, in B, or in both A and B.



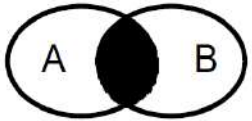
Case 1 - Disjoint Events

$P=P(A) + P(B)$



Case 2 - Non Disjoint Events

$P=P(A) + P(B) - P(A)P(B)$



Case 3 - Mutually Exclusive Events

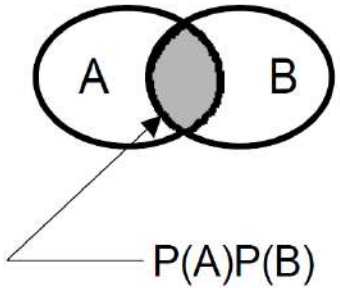
$P=P(A) + P(B) - 2P(A)P(B)$

Note - Exclusive OR is not the same as Disjoint.

Πιθανότητα (Probability)

Intersection

For two events A and B, the intersection is the event {A and B} that contains the occurrence of both A and B.



Case 1 - Independent Events

$P=P(A)P(B)$

Case 2 - Dependent Events

$P=P(A)P(B/A)$

Υπολογισμός της Πιθανότητας βάσει του πλήθους των Cut Sets

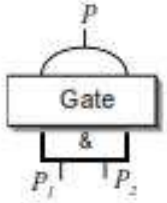
$$P=\Sigma(\text{singles}) - \Sigma(\text{pairs}) + \Sigma(\text{triples}) - \Sigma(\text{fours}) + \Sigma(\text{fives}) - \Sigma(\text{sixes}) + \bullet\bullet\bullet$$

CS {A; B; C; D}

$$P = (P_A + P_B + P_C + P_D) - (P_{AB} + P_{AC} + P_{AD} + P_{BC} + P_{BD} + P_{CD}) + (P_{ABC} + P_{ABD} + P_{ACD} + P_{BCD}) - (P_{ABCD})$$

$$P=P_A + P_B + P_C + P_D - (P_{AB} + P_{AC} + P_{AD} + P_{BC} + P_{BD} + P_{CD}) + (P_{ABC} + P_{ABD} + P_{ACD} + P_{BCD}) - (P_{ABCD})$$

Size and complexity of the formula depends on the total number of cut sets and MOE's.

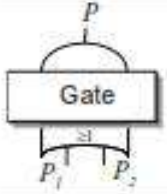


AND-Gate

The output event enters only if all input events apply. The output probability P is calculated with:

$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_{...}$

P_1	P_2	P
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

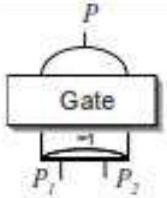


OR-Gate

The output event enters if one of the input events apply.
The output probability P is calculated with:

$P = 1-(1-P_1) \cdot (1-P_2) \cdot (1-P_{..}) ....$

P_1	P_2	P
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1



XOR-Gate (Exclusive-OR)

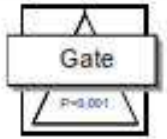
The output event enters if only one of the input events apply but not both.
The output probability P is calculated with:

$P = 1-(1-P_1) \cdot (1-P_2) - P_1 \cdot P_2$

P_1	P_2	P
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Basic-Event

Primary base event or failure. The probability P is defined directly and mostly comes from manufacturer's data of the component. As with the reliability block diagram P is dependent on the time (component age).



Sub-Gate

At this point the other representation is interrupted. The given probability P represents the summary of other sub-elements which are not shown further.

Ποσοτική ανάλυση F.T.

Υπολογισμός της **πιθανότητας** του γεγονότος εξόδου

$$P_{AND} = \prod_{i=1}^{n} q_i$$

AND

Σε μία πύλη OR, όπου ένα μόνο από τα γεγονότα εισόδου είναι αρκετό για να συμβεί το γεγονός εξόδου, η πιθανότητα θα είναι:

$$P_{OR} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - q_i)$$

OR

Οι πιθανότητες των πυλών AND και OR μπορούν να υπολογιστούν και από τους κανόνες που δίδονται για τον συνδυασμό των πυλών στον Πίνακα 8.5.

Πίνακας 8.5 Κανόνες για το συνδυασμό των πυλών

AND gate
$P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B)$ σε μονάδες πιθανότητας
$F(A \cdot B) = F(A) \cdot P(B)$ σε μονάδες συχνότητας
Δεν επιτρέπεται: $F(A) \cdot F(B)$ καθώς το αποτέλεσμα δεν είναι συχνότητα

OR gate
$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B)$ σε μονάδες πιθανότητας
$F(A + B) = F(A) + F(B)$ σε μονάδες συχνότητας
Δεν επιτρέπεται: $F(A) + P(B)$ καθώς το αποτέλεσμα είναι χωρίς νόημα
$P(A+B+C)=P(A)+P(B)+P(C) - P(A) \cdot P(B) - P(A) \cdot P(C) - P(B) \cdot P(C) + P(A) \cdot P(B) \cdot P(C)$
$P = \sum(1st\ terms) - \sum(2nd\ terms) + \sum(3nd\ terms - \sum(4th\ terms), \ldots$

Ποσοτική ανάλυση F.T.

Υπολογισμός της **πιθανότητας** του γεγονότος εξόδου

q_i : η πιθανότητα των γεγονότων εισόδου

Ποσοτική ανάλυση F.T.

Υπολογισμός της **πιθανότητας** του γεγονότος εξόδου

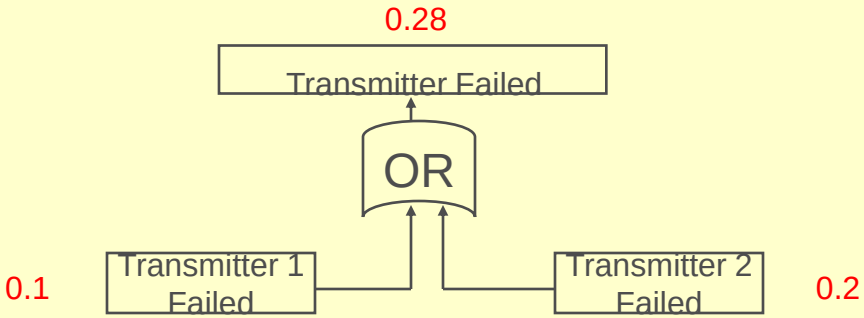
$$P\left(\bigcup_{i=1}^{n} A_i\right) = \sum_{i=1}^{n} P(A_i) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} P(A_i \cap A_j) + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^{n} P(A_i \cap A_j \cap A_k)$$

$$- \ldots + (-1)^{n-1} P(A_1 \cap A_2 \cap \cdots \cap A_n)$$

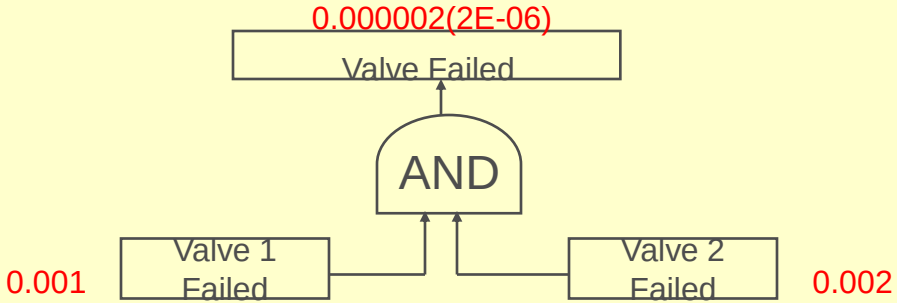
Παραδείγματα FTA (Fault Tree Analysis)

Απλά παραδείγματα

Example 1:



Example 2:



Procedure

Steps to get the final Boolean equation:

1. Replace AND gates with the product of their inputs.

IE1 = A.B

IE2 = C.D

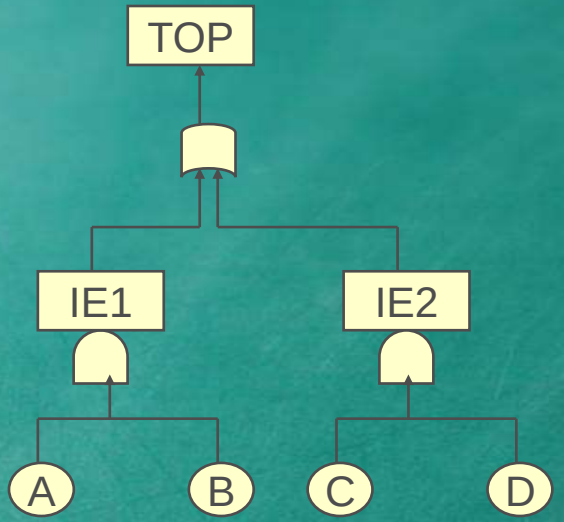
2. Replace OR gates with the sum of their inputs.

TOP = IE1+IE2

= A.B+C.D

3. Continue this replacement until all intermediate event gates have been replaced and only the basic events remain in the equation.

TOP = A.B+C.D



Procedure

Minimal Cut Set theory:

- The fault tree consists of many levels of basic and intermediate events linked together by AND and OR gates. Some basic events may appear in different places of the fault tree.
- The minimal cut set analysis provides a new fault tree, logically equivalent to the original, with an OR gate beneath the top event, whose inputs (bottom)are minimal cut sets.
- Each minimal cut set is an AND gate with a set of basic event inputs necessary and sufficient to cause the top event.

Procedure

Boolean Algebra Reduction Example:

TOP = IE1 + IE2

= (A.B) + (A + IE3)

= A.B + A + (C.D.IE4)

= A.B + A + (C.D.D.B)

= A + A.B + B.C.D.D (D.D = D)

= A + A.B + B.C.D (A + A.B = A)

= A + B.C.D

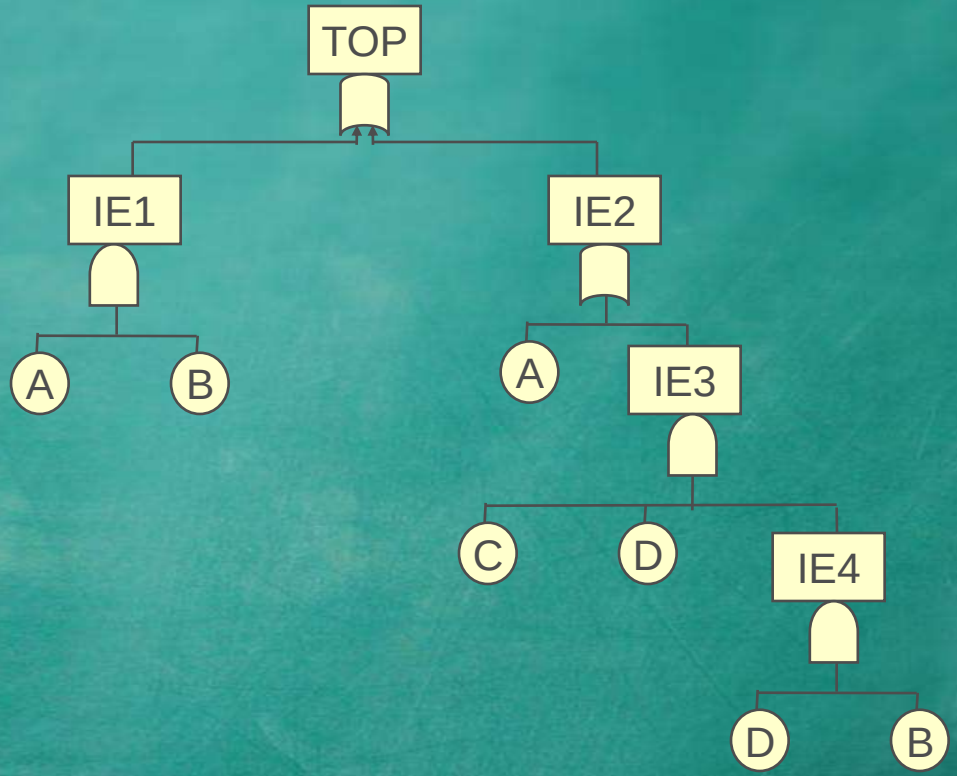
So the minimal cut sets are:

CS1 = A

CS2 = B.C.D

meaning TOP event occurs if

either A occurs OR (B.C.D) occurs.



Παραδείγματα FTA (Fault Tree Analysis)

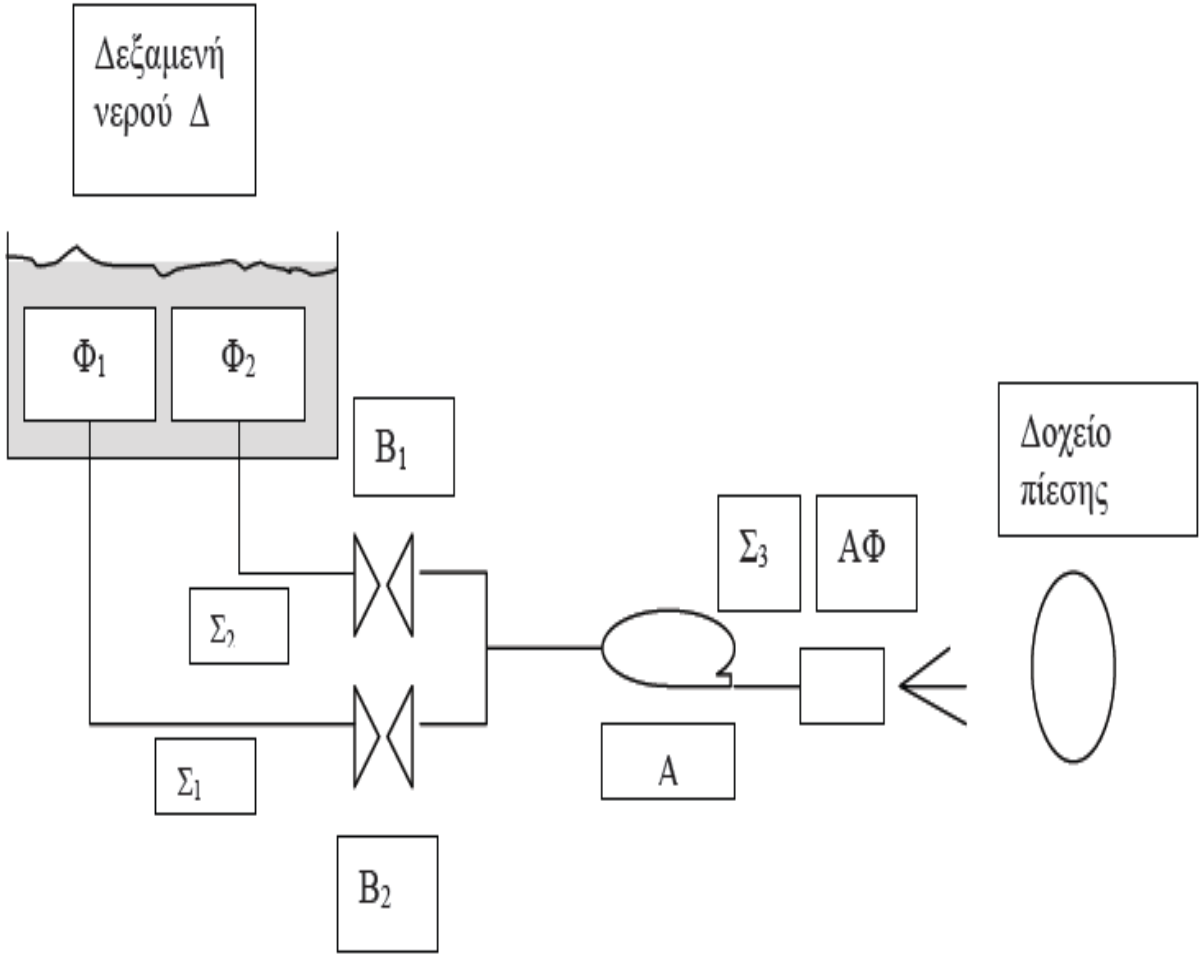
Το διάγραμμα παριστάνει ένα **σύστημα ψύξης** έκτακτης ανάγκης λόγω **υψηλής θερμοκρασίας** στο **δοχείο πίεσης**. Σε αυτή την περίπτωση ενεργοποιείται **η αντλία νερού Α**. Υποθέτουμε ότι το σύστημα μέτρησης της θερμοκρασίας στο δοχείο είναι απολύτως αξιόπιστο.

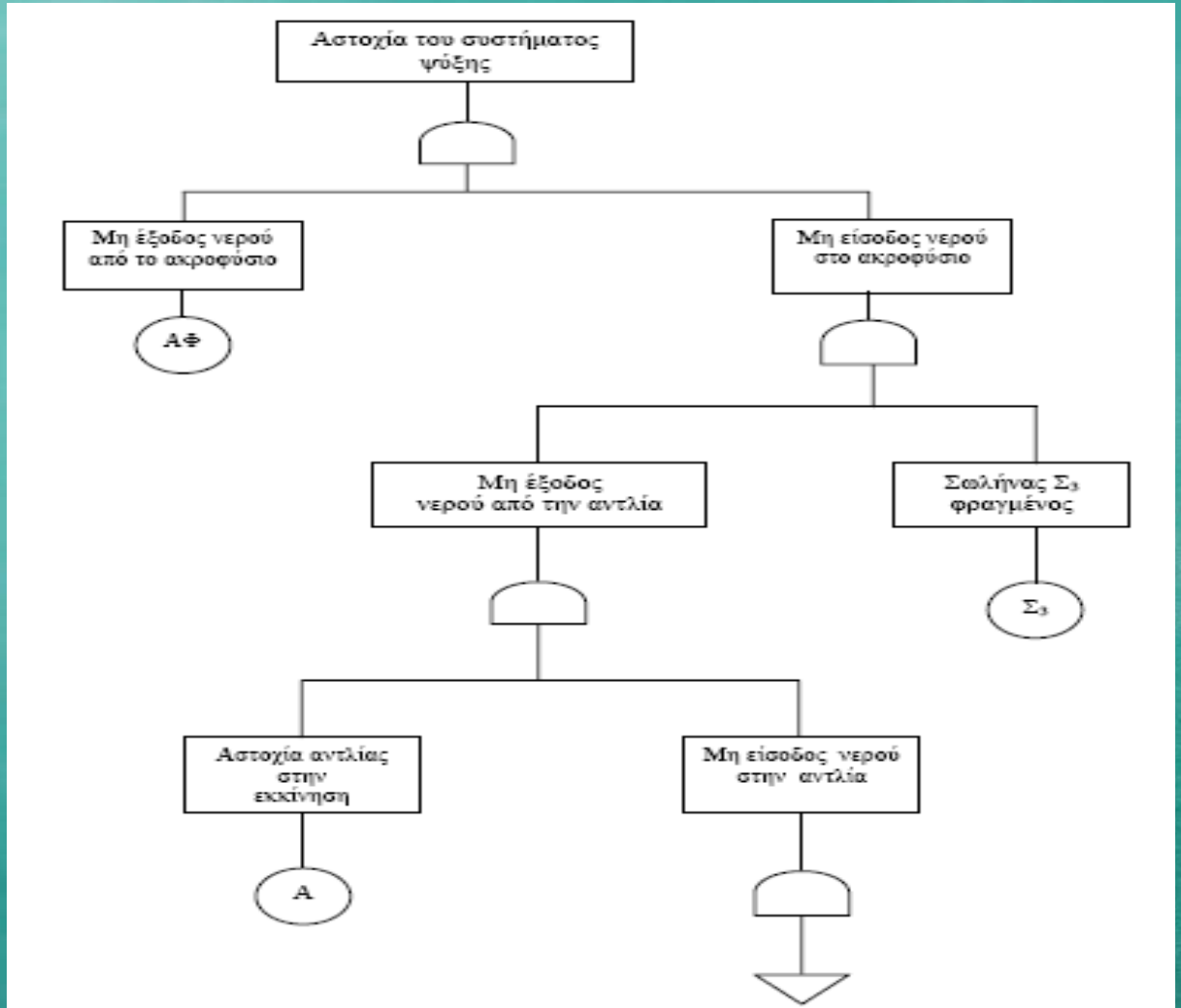
Θεωρούμε το **γεγονός κορυφής** "***αστοχία του συστήματος ψύξης***".

Όταν η **αντλία Α ενεργοποιηθεί**, τότε αντλεί νερό από τη δεξαμενή μέσω των αγωγών Σ_1 και Σ_2 .

Οι αγωγοί αυτοί συνδέονται με τα φίλτρα Φ_1 και Φ_2 μέσα στη δεξαμενή. Οι βαλβίδες B_1 και B_2 είναι συνήθως ανοικτές και κλείνουν μόνο σε περίπτωση που χρειάζεται να αντικατασταθεί η αντλία Α. Το φίλτρο Φ_1, ο αγωγός Σ_1 και η βαλβίδα B_1 αποτελούν τη γραμμή 1 (αντίστοιχα υπάρχει και γραμμή 2). Το νερό διοχετεύεται στο δοχείο υπό πίεση μέσω του ακροφυσίου ΑΦ, το οποίο είναι προσαρτημένο στο σωλήνα Σ_3.

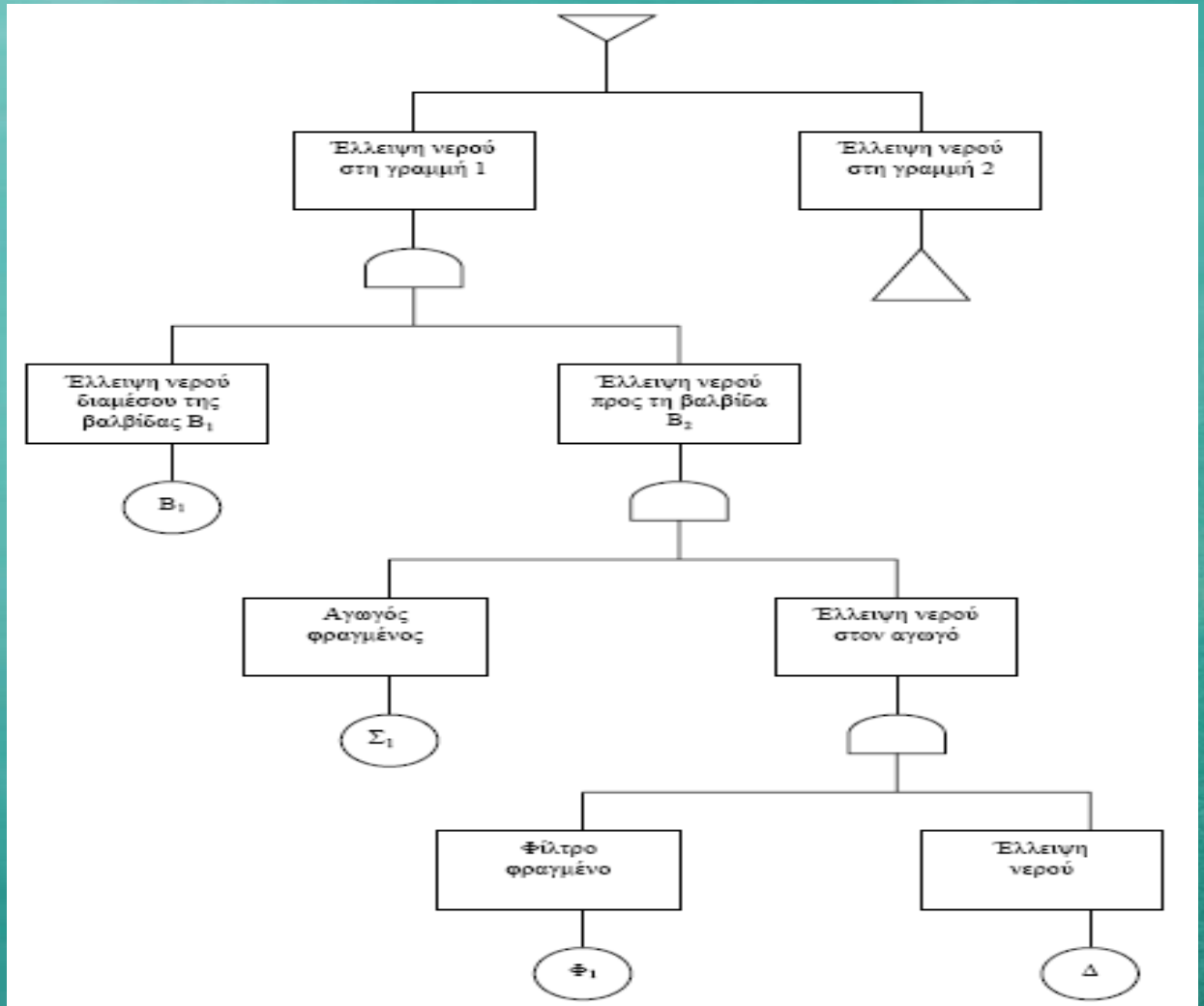
Σύστημα ψύξης έκτακτης ανάγκης λόγω υψηλής θερμοκρασίας σε δοχείο πίεσης



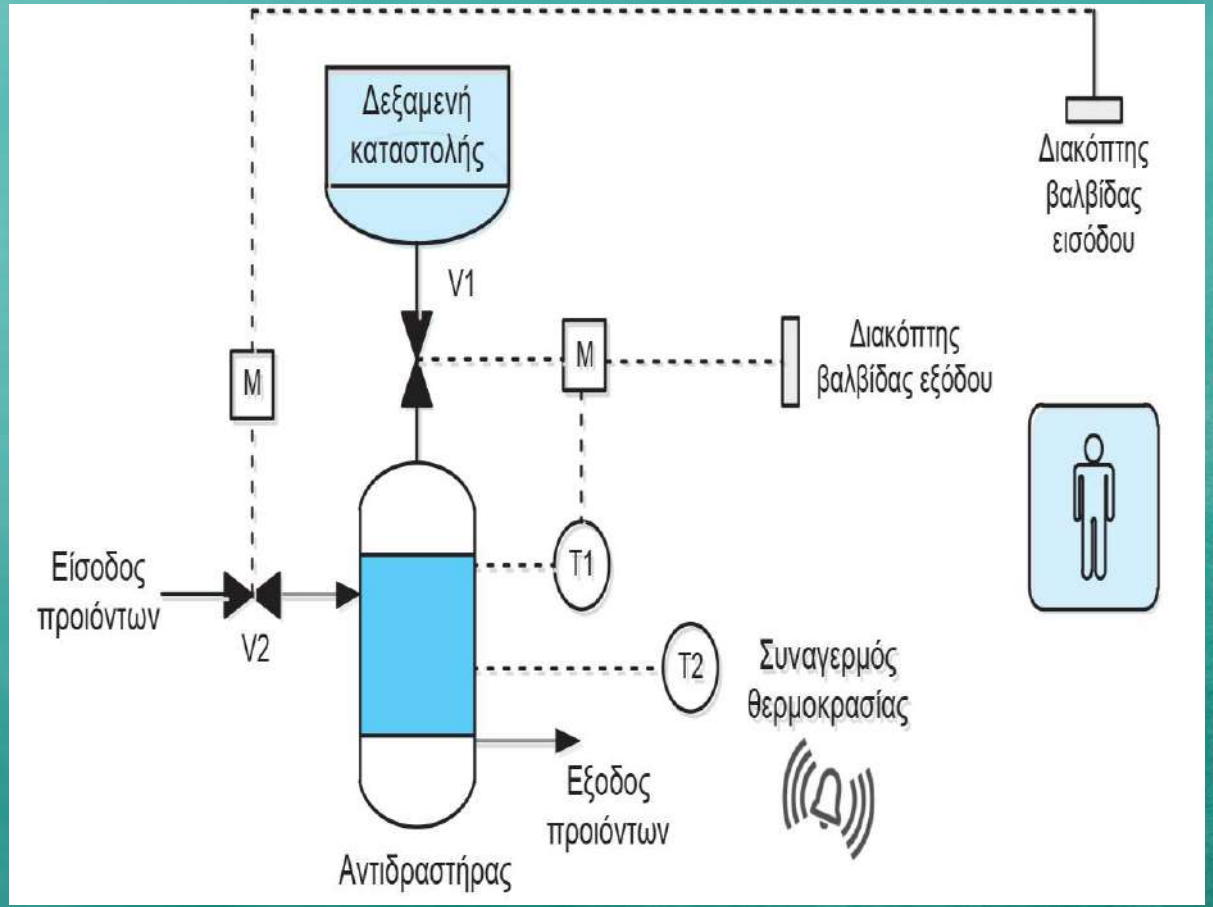


Ανάλυση δένδρου σφαλμάτων FTA στο σύστημα ψύξης *(1/2)*

Ανάλυση δένδρου σφαλμάτων FTA στο σύστημα ψύξης *(2/2)*

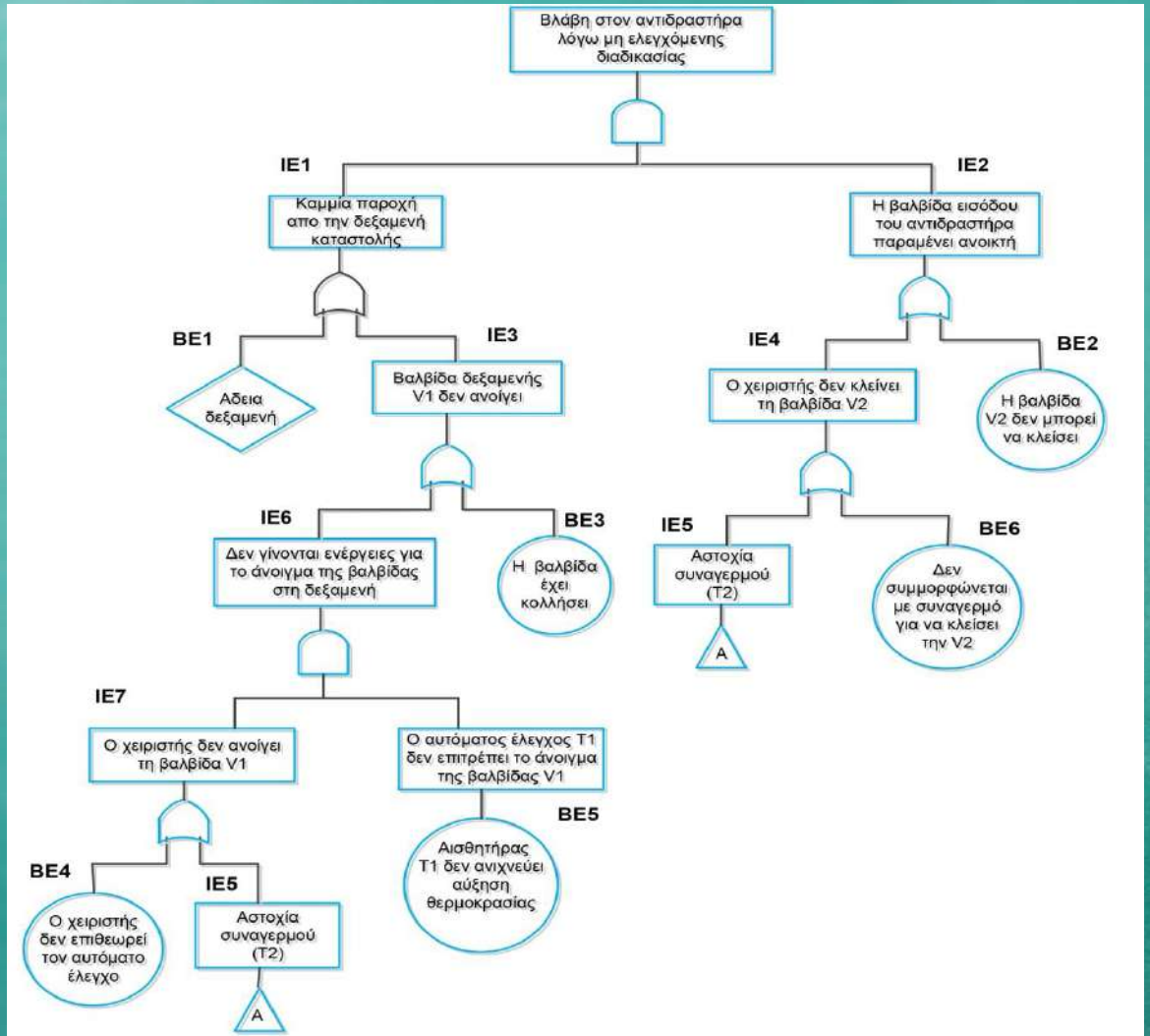


Παράδειγμα FTA σε βλάβη αντιδραστήρα λόγω μη ελεγχόμενης αντίδρασης σε υψηλές θερμοκρασίες



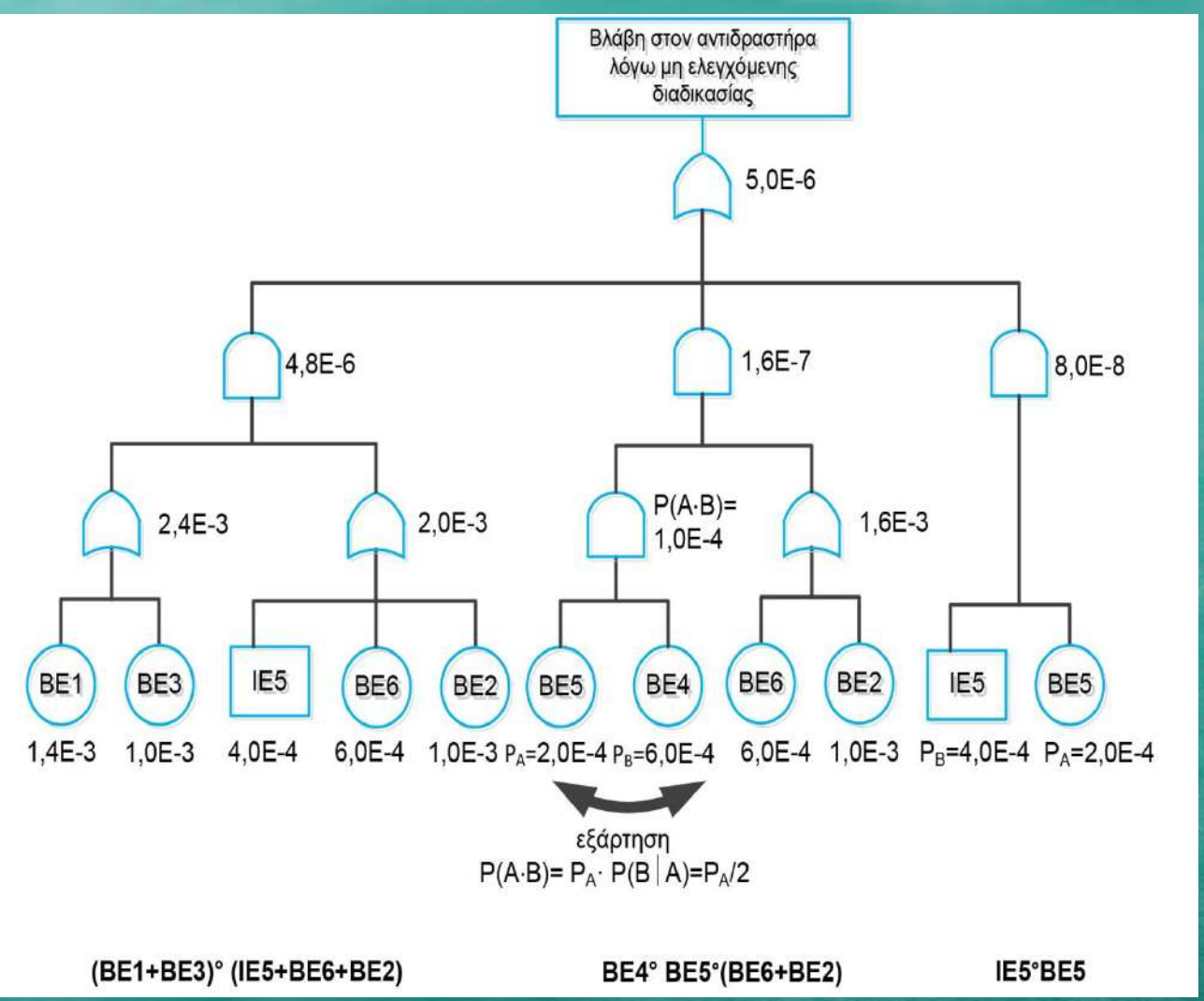
Διάταξη ελέγχου θερμοκρασίας του αντιδραστήρα (CCPS, 2008)

F.T. για βλάβη σε αντιδραστήρα λόγω μη-ελεγχόμενης διαδικασίας (CCPS, 2008)



Βήματα	Boolean αναπαράσταση
1	T = IE1°IE2
2	T= (BE1+IE3) ° (IE4+BE2)
3	T= (BE1+BE3+IE6) ° (IE5+BE6+BE2)
4	T= (BE1+BE3+IE7°BE5) ° (IE5+BE6+BE2)
5	T= (BE1+BE3+ (BE4+IE5) °BE5) ° (IE5+BE6+BE2)
6	T= (BE1+BE3+BE4°BE5+IE5°BE5) ° (IE5+BE6+BE2)
7	T= (BE1+BE3+BE4°BE5)°(IE5+BE6+BE2)+BE5°IE5°(IE5+(BE6+BE2))
8	T= (BE1+BE3+BE4°BE5)°(IE5+BE6+BE2)+ BE5°IE5+BE5°IE5(BE6+BE2)
9	T=(BE1+BE3)°(IE5+BE6+BE2)+BE4°BE5°(IE5+BE6+BE2)+(BE5°IE5)
10	T=(BE1+BE3)°(IE5+BE6+BE2)+BE4°BE5°(BE6+BE2)+ BE4°(BE5°IE5)+(BE5°IE5)
11	T=(BE1+BE3)°(IE5+BE6+BE2)+BE4°BE5°(BE6+BE2)+ (BE5°IE5)

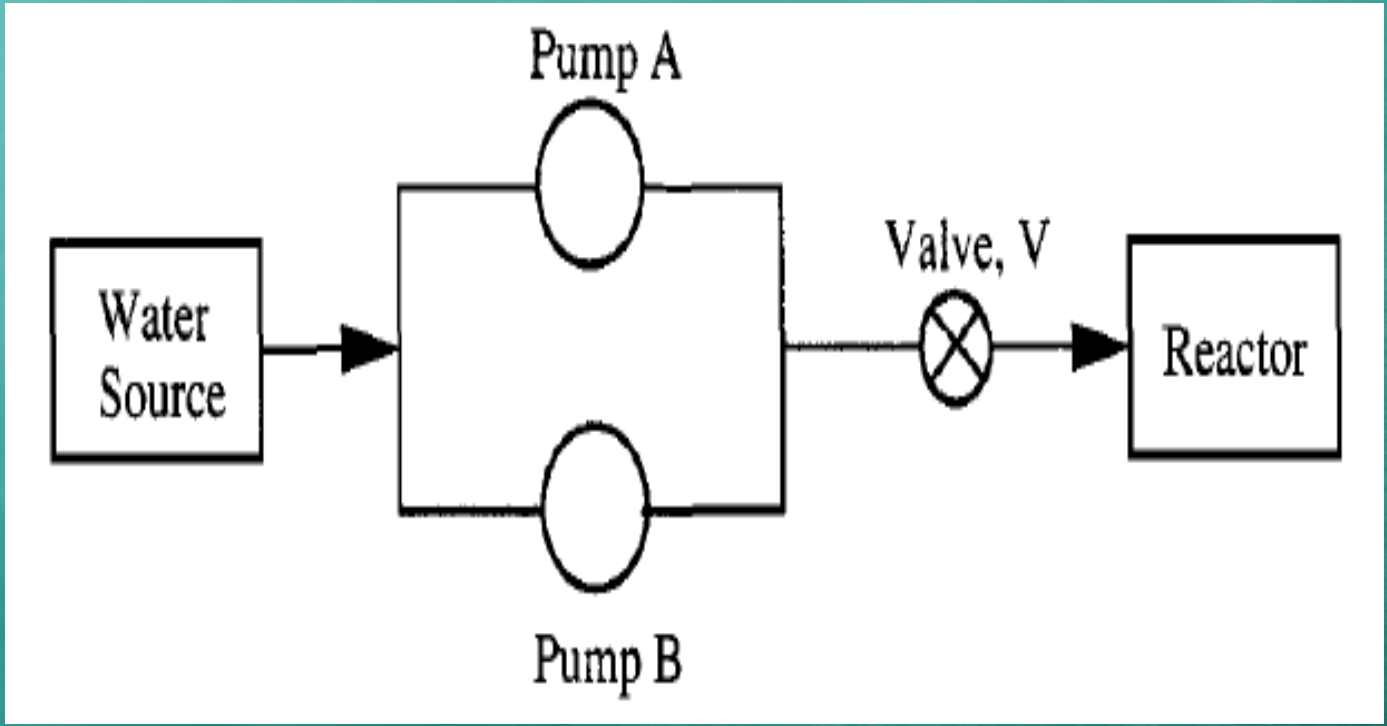
Υπολογισμός ελαχίστων τομών (minimal cut sets) με χρήση της Boolean άλγεβρας



Αναπαράσταση ελαχίστων τομών στο δένδρο F.T. και υπολογισμός πιθανότητας του γεγονότος κορυφής

Άσκηση εφαρμογής της τεχνικής FTA

Στο απλό σύστημα άντλησης νερού του παρακάτω σχήματος, το οποίο αποτελείται από μια πηγή νερού (water source), δύο αντλίες παράλληλα συνδεδεμένες (pump A, B), μια βαλβίδα (valve V), και έναν αντιδραστήρα (reactor), μία διακοπή της ροής του νερού στον αντιδραστήρα αποτελεί το ανεπιθύμητο γεγονός που είναι μια αποτυχία του συστήματος.



Σύστημα άντλησης νερού

4.2

Η Τεχνική του Δένδρου Γεγονότων

(*Event-Tree Analysis Technique*)

4.2.1 Δένδρα Γεγονότων (Event Trees)

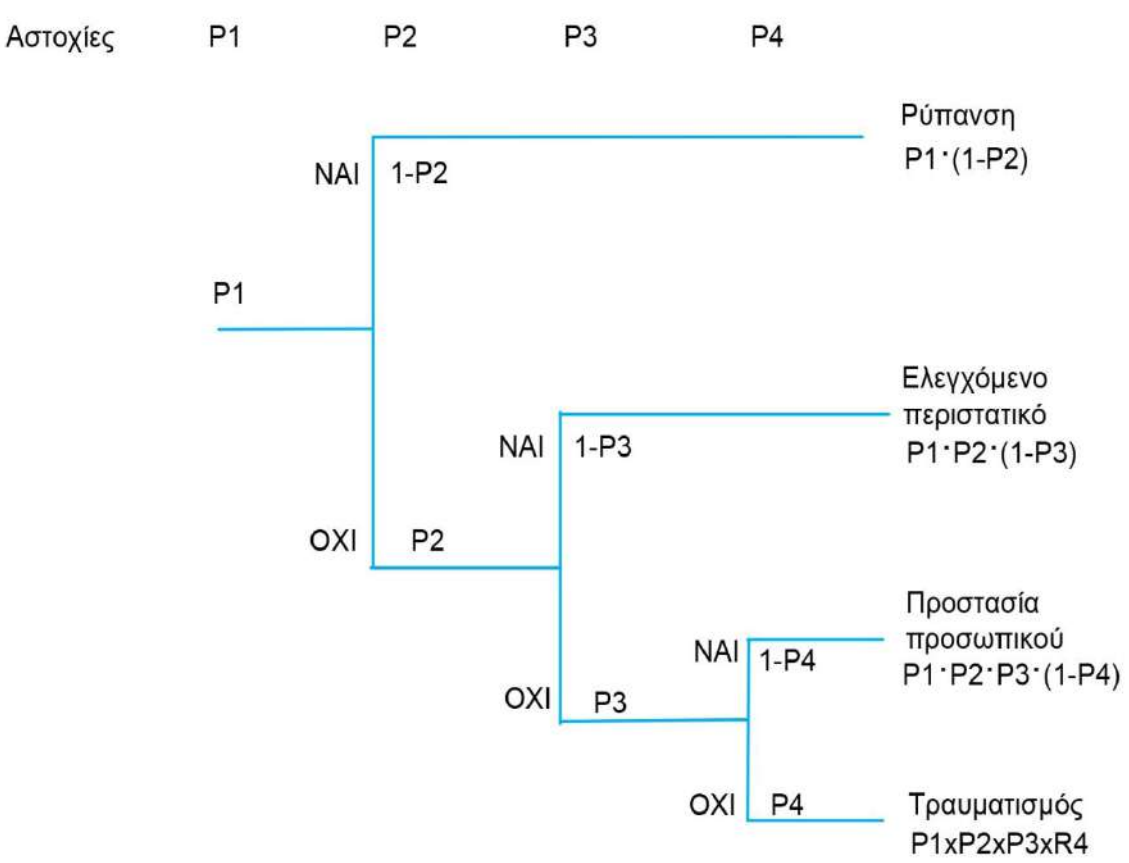
Η ανάλυση του Δέντρου Γεγονότων **ETA (Event Fault Tree Analysis)** αποτελεί:

- Μια **μέθοδο** μελέτης **ανεπιθύμητων γεγονότων**, στην οποία αναπαρίσταται γραφικά η λογική σειρά με την οποία μπορούν να εμφανιστούν τα γεγονότα σε ένα σύστημα

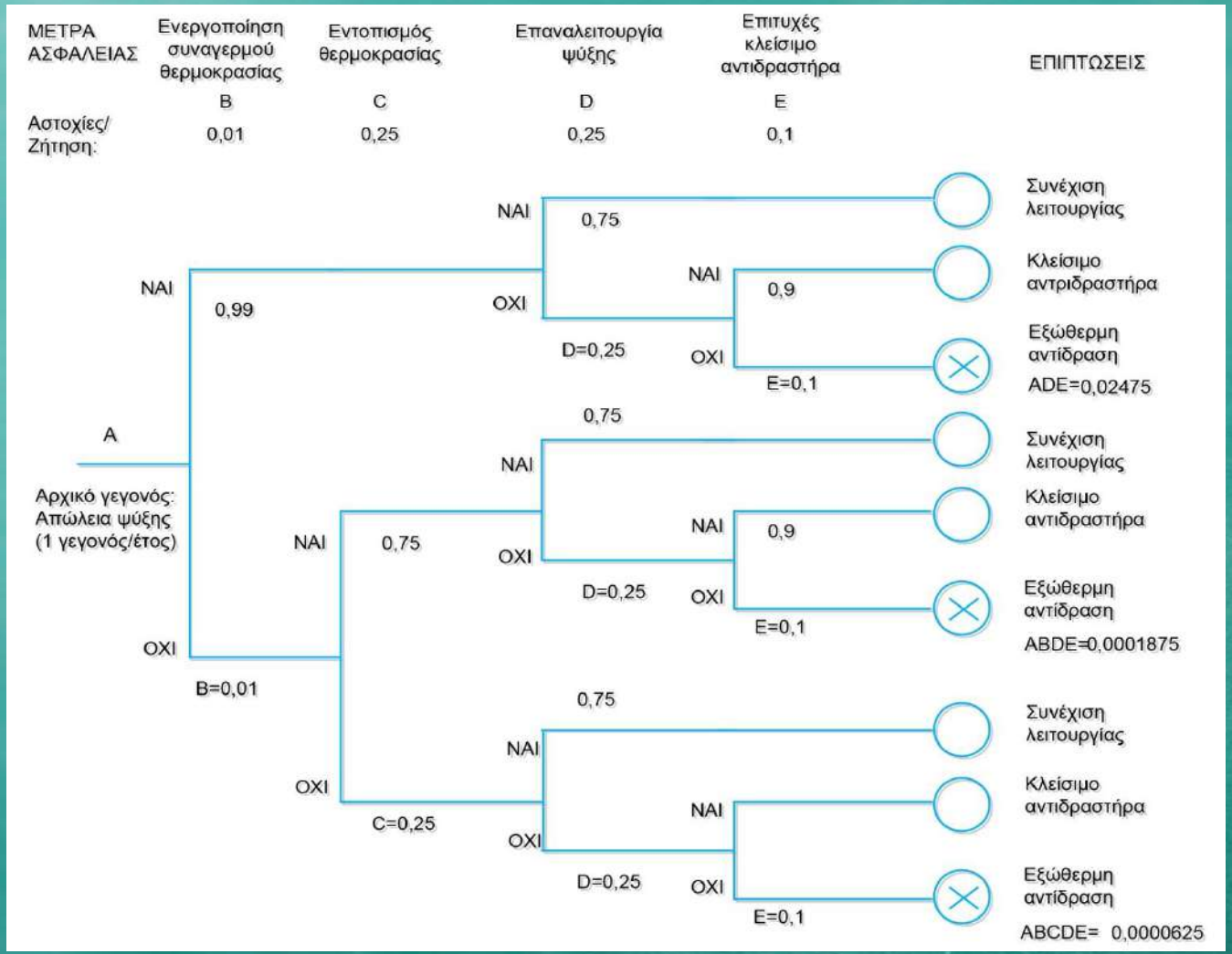
- Ξεκινά με ένα **αρχικό γεγονός** (ή ανεπιθύμητο γεγονός) και εξετάζει κατά πόσο ία σειρά από **διορθωτικές** ενέργειες και φραγμούς ασφαλείας μπορούν να **ανακόψουν** την πορεία του γεγονότος προς ένα ή περισσότερα είδη ατυχημάτων

Μοντελοποίηση επιπτώσεων διαρροής καυσίμου με δένδρο γεγονότων

Α Διαρροή καυσίμου	Β Αποφυγή φωτιάς	Γ Πυρόσβεση	Δ Εκκένωσης χώρου	Επιπτώσεις



Δένδρο γεγονότων για απώλεια μηχανισμού ψύξης ενός αντιδραστήρα (Crowl & Louvat, 2011)



Event Trees

Quantitative Risk Analysis

Event Trees - Overview

- Definitions
- Steps
- Occurrence frequency
- Mean Time between Shutdown
- Mean Time Between Runaway
- Example

Accidents do happen!

- When an accident or process deviation (i.e. an "event") occurs in a plant, various safety systems (both mechanical and human) come into play to prevent the accident from propagating.
- These safety systems either fail or succeed.

Event Trees

- Event trees are used to follow the potential course of events as the event moves through the various safety systems. The probability of success or failure of each safety intervention is used to determine the overall probability of each final outcome.

Event Trees

- An Event Tree is used to determine the frequency of occurrence of process shutdowns or runaway systems.
- Inductive approach
  - Specify/Identify an initiating even and work forward.
  - Identifies how a failure can occur and the probability of occurrence

Steps to Construct an Event Tree

- Identify an initiating event of interest.
- Identify the safety functions designed to deal with the initiation followed by the impact of the safety system
- Construct the event tree
- Describe the resulting accident event sequences.

Identify an initiating event

- May have been identified during a HAZOP as a potential event that could result in adverse consequences.
- Usually involves a major piece of operating equipment or processing step, i.e. a HAZOP "Study Node".

Identify safety functions

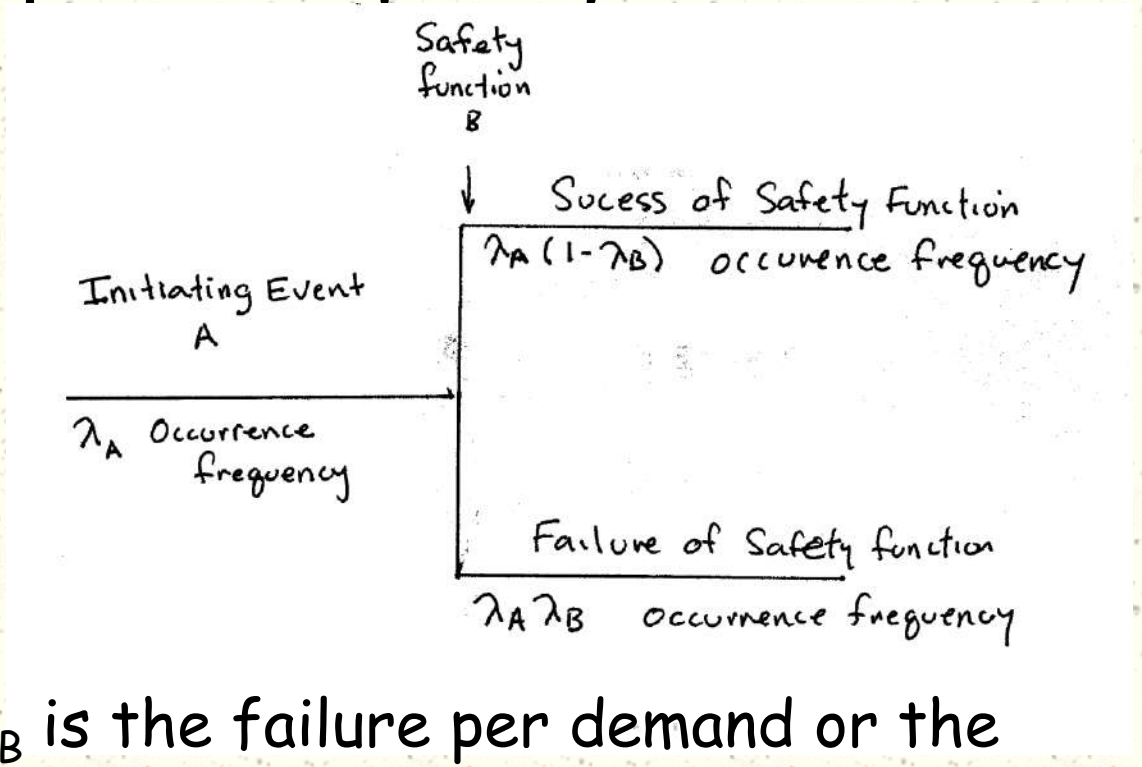
- From PID, process flow sheet, or procedures find what safety systems are in place and what their functions are.
- These can include things such as automatic controllers, alarms, sensors, operator intervention, etc.
- On you Event Tree write across the top of the page in the sequence of the safety interventions that logically occur.
- Give each safety intervention an alphabetic letter notation.

Construct the Event Tree

- Horizontal lines are drawn between functions that apply
- Vertical lines are drawn at each safety function that applies
  - Success – upward
  - Failure – downward
- Indicate result of event
  - Circle – acceptable result
  - Cross-circle – unacceptable result

Construct Event Tree (cont.)

- Compute frequency of failures



λ_B is the failure per demand or the unavailability of safety function B

Occurrence Frequency

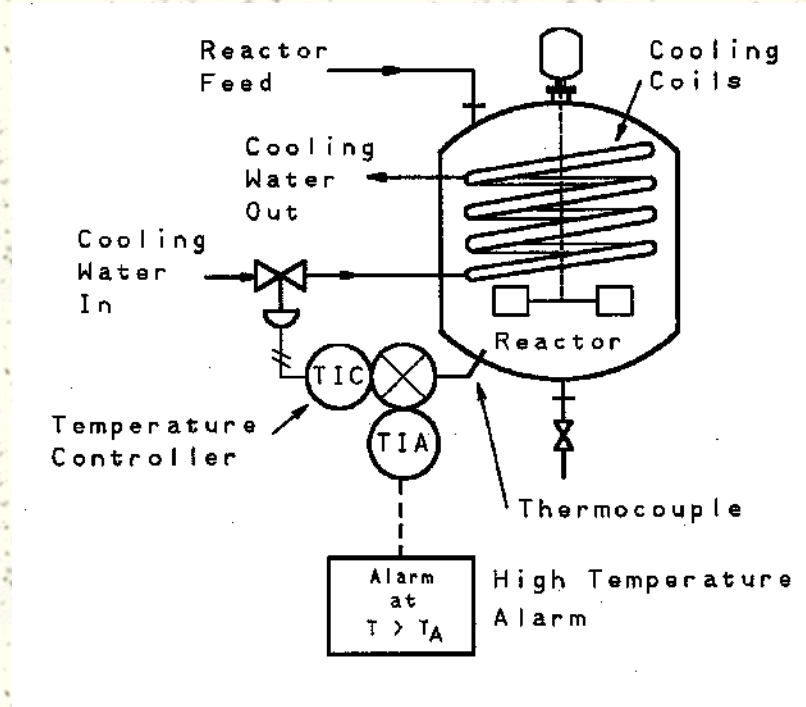
- Follow process through with each step to calculate the frequency of each consequence occurring.
- Typically three final results
  - Continuous operation
  - Shutdown (safely)
  - Runaway or fail

Mean time between Shutdown

- Mean Time Between Shutdown, MTBS is calculated from:
  - MTBS=1/Σoccurrences of shutdowns
- Mean Time Between Runaway, MTBR is calculated from:
  - MTBR=1/ Σoccurrences of runaways

Example – Loss of coolant to reactor

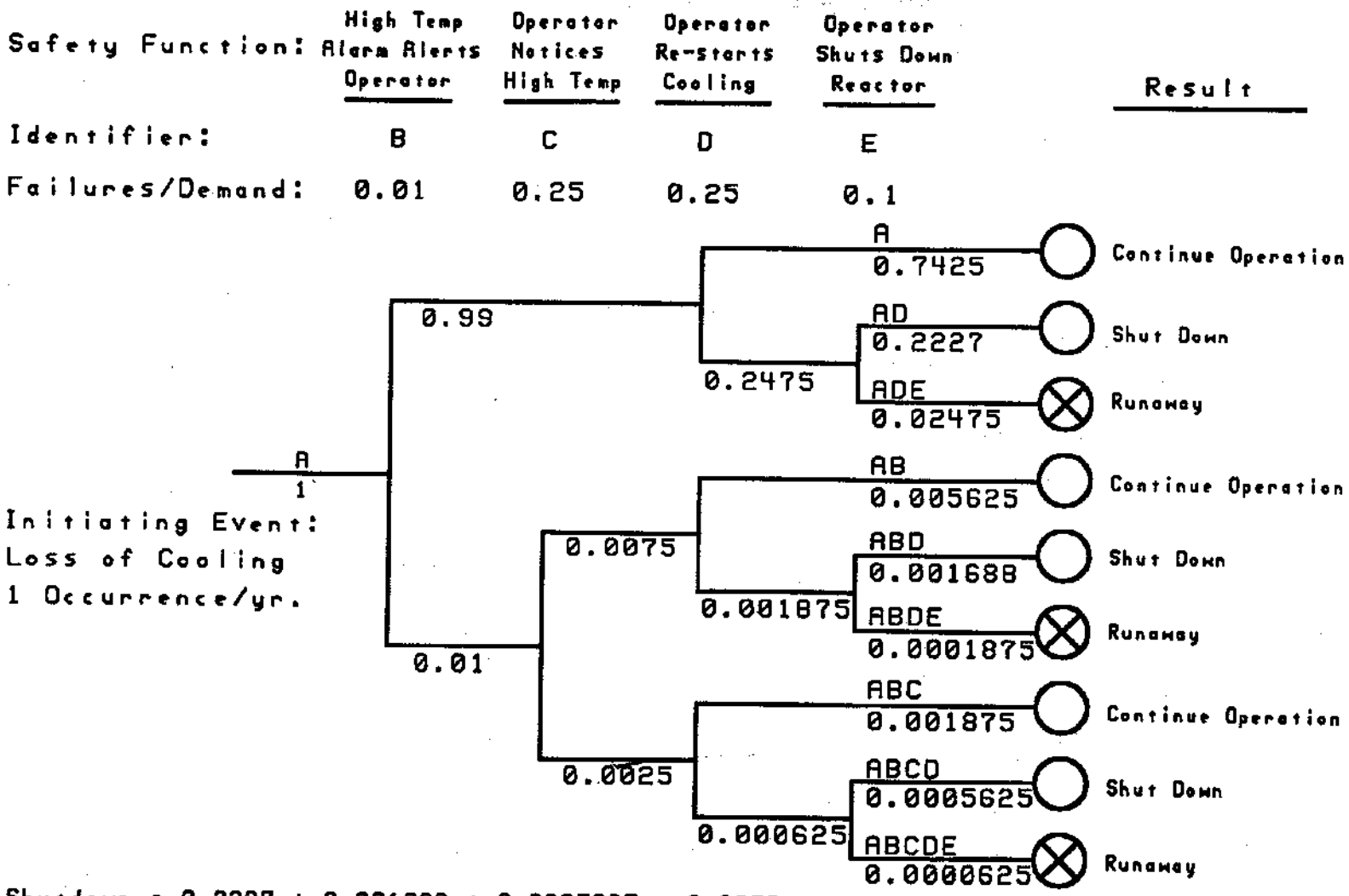
- Four safety interventions
  - High temperature alarm
  - Operator noticing the high temperature during normal inspection
  - Operator re-establishes the coolant flow
  - Operator performs emergency shutdown of reactor



Example – Loss of coolant

- Assume loss of coolant occurs once per year (occurrence frequency 1/yr)
- Alarm fails 1% of time placed in demand (failure rate of 0.01 failures/demand)
- Operator will notice high reactor temperature 3 out of 4 times (0.25 failures/demand)
- Operator will successfully restart coolant flow 3 out of 4 times (0.25 failures/demand)
- Operator successfully shuts down reactor 9 out of 10 times (0.10 failures/demand)

Resulting Event Tree Analysis



Shutdown = 0.2227 + 0.001688 + 0.0005625 = 0.2250 occurrences/yr.

Runaway = 0.02475 + 0.0001875 + 0.0000625 = 0.02500 occurrences/yr.

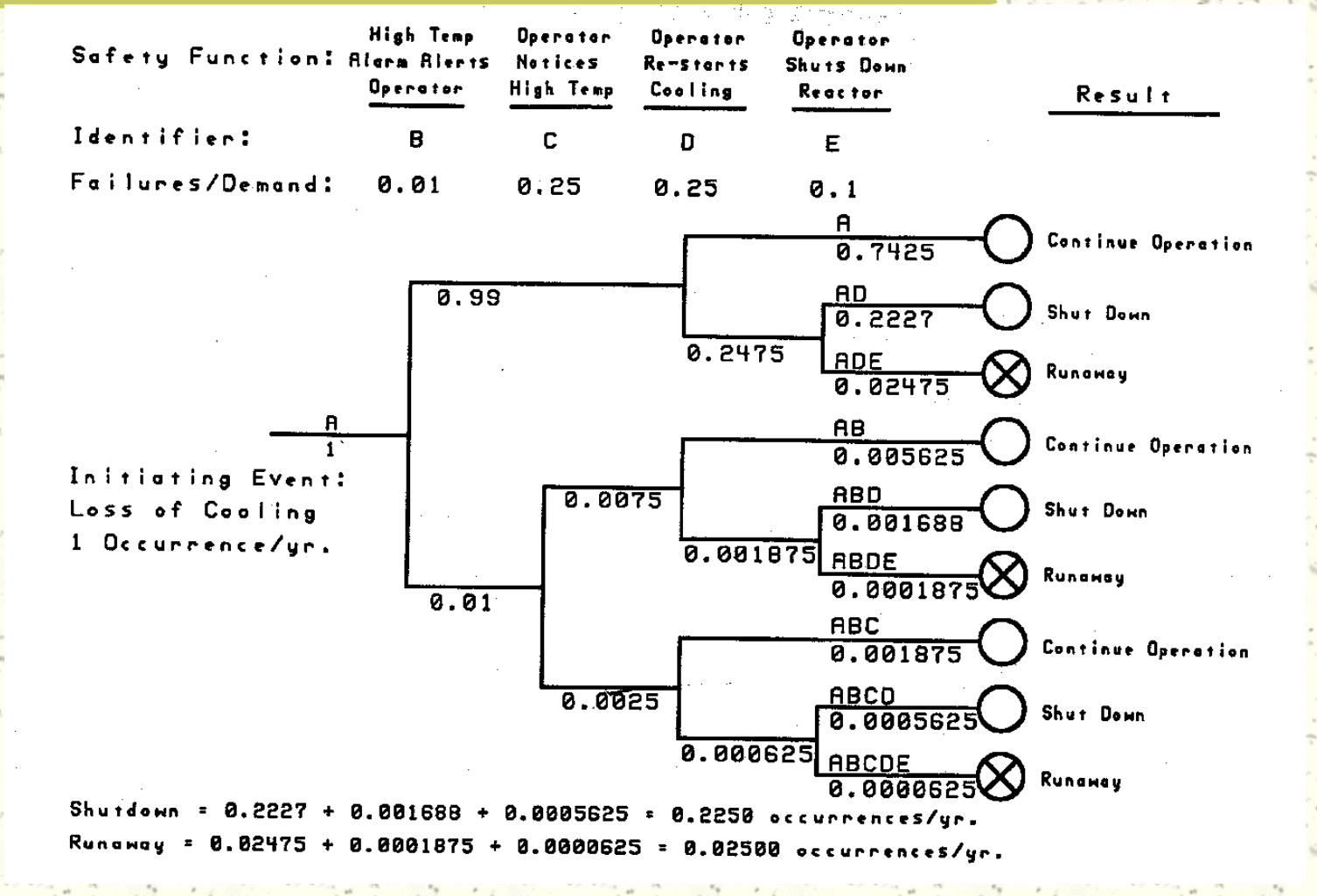
Example – Possible outcomes

- The lettering is used to identify each final outcome.
- For instance, ABDE
  - Indicates that after Initiating event A occurs, that safety system B failed (high T alarm), that safety system D failed (the operator was unable to re-start the coolant) and safety system E failed (the operator was unable to successful shut down the reactor).

Example – Determination of MTBS

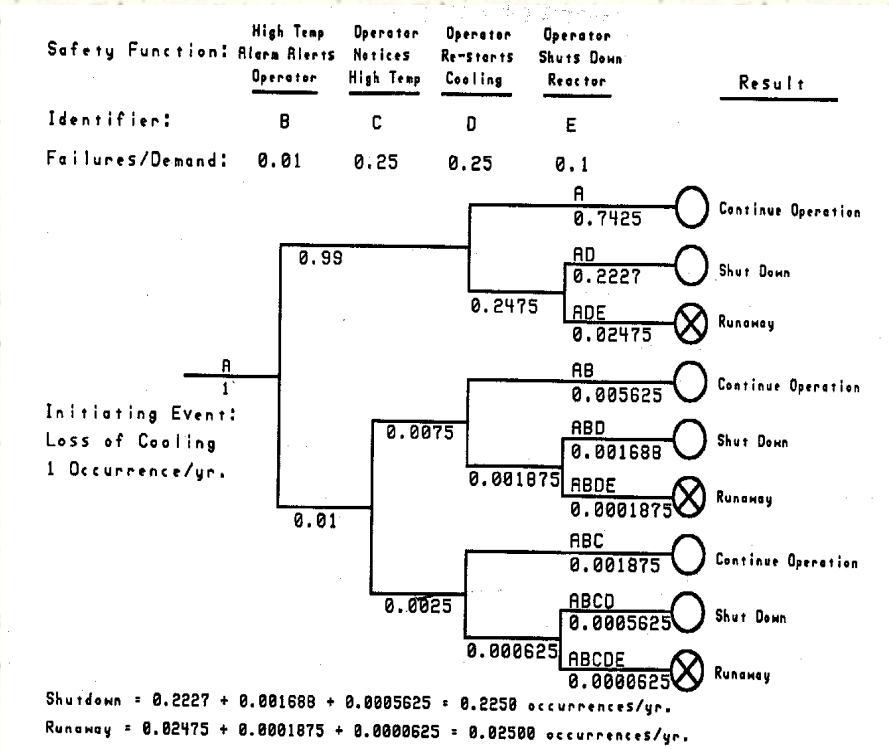
- For Mean Time Between Shutdowns take the reciprocal of the sum of all sequences that resulted in a shutdown. (Example gives 1/.225 = 4.4yrs)
- For Mean Time Between Runaway do the same thing with all sequences that resulted in a runaway. (Example gives 1/0.250 = 40yrs)

What is wrong with the logic of this example analysis?



What is wrong?

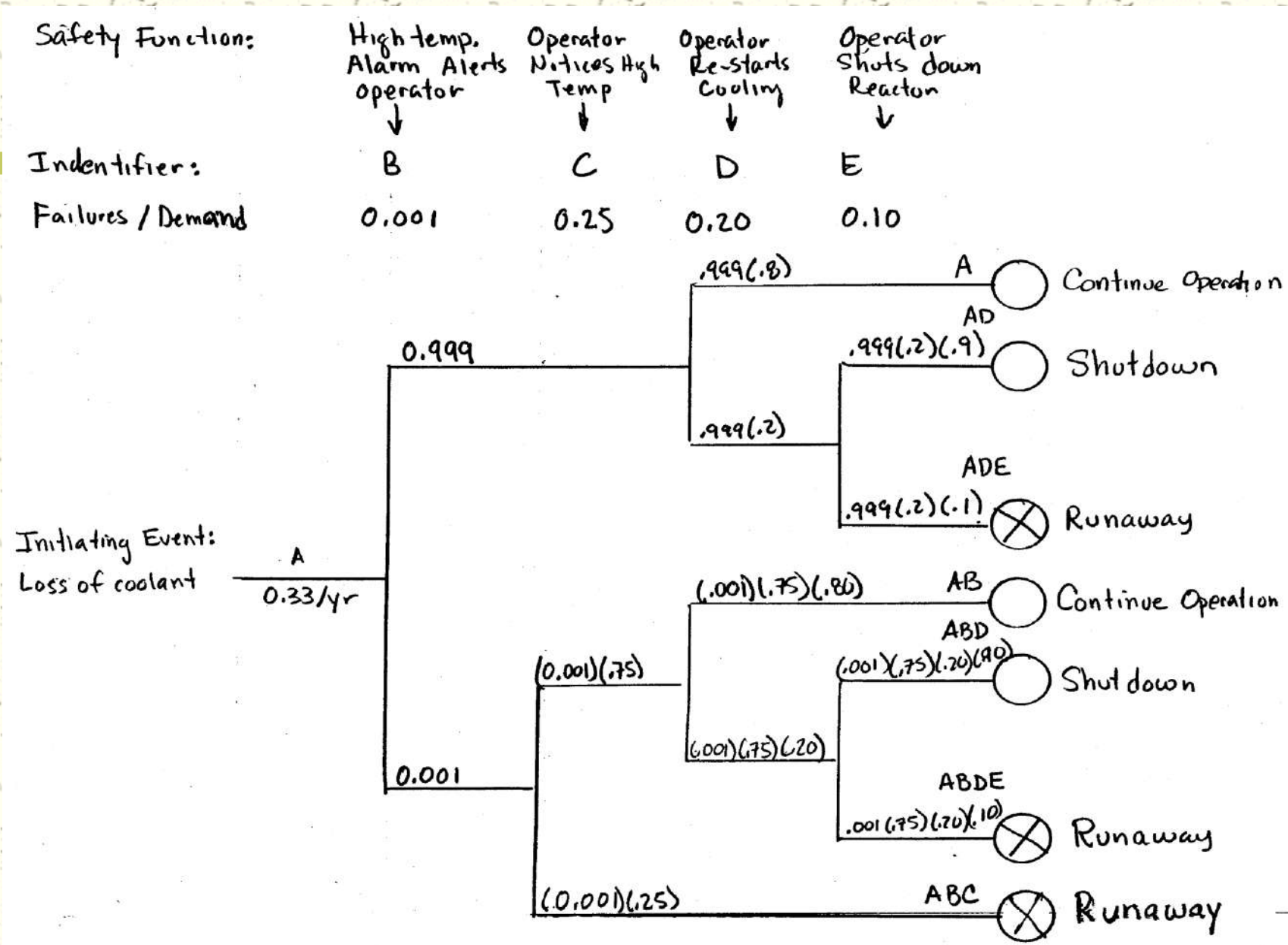
- If the operator fails to notice the high temperature after the alarms fails, then he/she will never restart the cooling.



In Class Example

- Construct an Event Tree and determine the MTBS and MTBR for a loss of coolant for the reactor shown in Figure 11-8.
  - Assume loss of coolant occurs once every three years.
  - Alarm fails 0.1% of time placed in demand
  - Operator will notice high reactor temperature 3 out of 4 times
  - Operator will successfully restart coolant flow 4 out of 5 times
  - Operator successfully shuts down reactor 9 out of 10 times

Solution - Construct Event Tree



Solution Continued – Occurrence Frequency

Event A $0.999 \times 0.8 = 0.7992$

Event AD $0.999 \times 0.2 \times 0.9 = 0.17982$

Event ADE $0.999 \times 0.2 \times 0.1 = 0.01998$

Event AB $0.001 \times 0.75 \times 0.80 = 0.0006$

Event ABD $0.001 \times 0.75 \times 0.20 \times 0.9 = 0.000135$

Event ABDE $0.001 \times 0.75 \times 0.20 \times 0.10 = 0.000015$

Event ABC $0.001 \times 0.25 = 0.00025$

Solution Continued - Mean Time Between Events

Mean Time Between Shutdowns

$$MTBS = \frac{1}{\sum \text{Occurences of Shutdown}}$$

$$MTBS = \frac{1}{0.17982 + 0.000135} = 5.56\,yrs$$

Mean Time Between Runaways

$$MTBR = \frac{1}{\sum \text{Occurences of Runaways}}$$

$$MTBR = \frac{1}{0.01998 + 0.000015 + 0.00025} = 49.4\,yrs$$